



PROGRAMA DE DOCTORADO EN

URBANISMO Y REPRESENTACIÓN EN LA ARQUITECTURA

E.T.S. ARQUITECTURA

OCTUBRE 2021

TESIS DOCTORAL:

VIRTUALIZACIÓN DEL PATRIMONIO

Definición de una metodología de documentación y
difusión del patrimonio arquitectónico

Presentada por David Marcos González
para optar al grado de
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Jesús I. San José Alonso
José Ignacio Sánchez Rivera



Universidad de Valladolid

 **ESDUVa**
Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid



Universidad de Valladolid



PROGRAMA DE DOCTORADO EN

URBANISMO Y REPRESENTACIÓN EN LA ARQUITECTURA

E.T.S. ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL:

VIRTUALIZACIÓN DEL PATRIMONIO

**Definición de una metodología de
documentación y difusión del patrimonio
arquitectónico**

Presentada por David Marcos González para optar

al grado de

Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Jesús I. San José Alonso

José Ignacio Sánchez Rivera

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer tanto al Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica, perteneciente al departamento de Urbanismo y Representación de la Arquitectura en la Universidad de Valladolid, como a la empresa Geobit Consulting la posibilidad que me han dado de poder participar en la realización de los trabajos utilizados como caso de estudio. Además de facilitarme el acceso a los instrumentos de medición, los diferentes programas informáticos y equipos de procesado.

A mis directores de tesis, Jesús I. San José Alonso y José Ignacio Sánchez Rivera, por su dedicación, correcciones e información. También por su ejemplo como investigadores y como personas.

También a Juan José Fernández Martín y José Martínez Rubio, cuyos consejos y orientación me han servido enormemente.

A todos mis compañeros y amigos, por animarme y ponerme una sonrisa en los momentos difíciles y hacerme pasar el tiempo jovialmente.

Y por supuesto a mi familia, y en especial a mi padre, que durante este largo periodo me han apoyado y dado ánimos en todo momento.

RESUMEN

El objetivo de la investigación es definir y establecer una metodología de documentación óptima y aplicable a cualquier campo de estudio asociado a un objeto existente, fundamentalmente patrimonio cultural tangible (arquitectura, arqueología, escultura, geología,...), con miras a permitir obtener modelos tridimensionales de una gran precisión geométrica y radiométrica de los objetos documentados. Estos modelos servirán de diferente forma a satisfacer los objetivos principales de cada proyecto. Inicialmente se hará mención de algunas de las técnicas de levantamiento existentes, tanto las modernas como las tradicionales, para valora sus ventajas y desventajas.

El escaneado láser y la fotogrametría digital permite obtener estos modelos tridimensionales de alta precisión, cuyo procesado permitirá obtener una documentación con una gran definición métrica y geométrica del objeto.

Por otra parte gracias a la existencia de nuevas herramientas de difusión a través de la web, y a los nuevos dispositivos de visualización, podremos generar nueva información, muy valiosa, a partir de los modelos tridimensionales obtenidos con la fotogrametría. De igual manera podremos crear contenidos y entornos virtuales donde el espectador podrá sumergirse y experimentar nuevas sensaciones en la percepción del espacio.

ABSTRACT

The objective of the research is to define and establish an optimal documentation methodology applicable to any field of study associated with an existing object, fundamentally tangible cultural heritage (architecture, archeology, sculpture, geology, ...), with a view to making it possible to obtain three-dimensional models of a great geometric and radiometric precision of the documented objects. These models will serve in a different way to satisfy the main objectives of each project. Initially, mention will be made of some of the existing lifting techniques, both modern and traditional, to assess their advantages and disadvantages.

Laser scanning and digital photogrammetry allow these high-precision three-dimensional models to be obtained, the processing of which will allow obtaining documentation with a high metric and geometric definition of the object.

On the other hand, thanks to the existence of new dissemination tools through the web, and to new display devices, we will be able to generate new, very valuable information from the three-dimensional models obtained with photogrammetry. In the same way, we can create content and virtual environments where the viewer can immerse themselves and experience new sensations in the perception of space.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
1. ELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	17
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN	23
1. ANTECEDENTES	23
2. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE LEVANTAMIENTO	24
3. TÉCNICAS O MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO.....	27
3.1. Definiciones de fotogrametría.....	28
3.2. Historia	28
3.3. Clasificación de la fotogrametría.....	28
3.4. Técnicas o herramientas de fotogrametría.....	30
3.4.1. Rectificación fotográfica (levantamiento desde una fotografía)	31
3.4.2. Restitución fotogramétrica (pares estereoscópicos).....	34
3.4.3. Colecciones de fotografías convergentes (múltiples fotografías).....	35
3.4.4. Escáner láser tridimensional	37
3.4.5. Documentación fotográfica desde vehículo aéreo no tripulado	48
CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODO	59
1. PLANIFICACIÓN PREVIA.....	64
2. TOMA DE DATOS.....	64
2.1. Escáner láser	65

2.1.1. Replanteo de dianas, targets o puntos de referencia.....	68
2.1.2. Configuración escaneo	70
2.1.3. Posicionamiento de escaneos	78
2.1.4. Captura de datos. Realizar escaneos	79
2.1.5. Georreferenciación. Sistema de coordenadas de referencia	80
2.2. Fotogrametría terrestre.....	80
2.2.1. Fotografía convergente	85
2.2.2. Fotografía divergente o panorámica equirectangular.....	86
2.3. Fotogrametría aérea mediante el uso de RPAS	93
2.3.1. Flujo de trabajo de planificación de vuelo	94
3. PROCESADO O REGISTRO DE LOS DATOS	104
3.1. Escáner láser	104
3.1.1. Preparación de proyecto de escaneo	107
3.1.2. Importar datos de escaneo	108
3.1.3. Procesado de las nubes de puntos.....	109
3.1.4. Registro de los puntos.....	119
3.1.5. Exportación de los puntos de escaneo.....	121
3.2. Fotogrametría	125
3.2.1. Acciones previas.....	126
3.2.2. Importar fotografías	131
3.2.3. Orientación fotografías	133
3.2.4. Creación de la nube densa	137
3.2.5. Creación de la malla de triángulos	138
3.2.6. Texturizado.....	140
3.2.7. Creación de ortofotos	142
3.2.8. Exportación de los resultados	144
3.3. Metodología híbrida.....	147
3.3.1. De escáner láser a fotogrametría.....	147
3.3.2. De fotogrametría a escáner láser	148

4.	DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS A TRAVÉS DE LOS NUEVOS SERVICIOS WEB 2.0	148
4.1.	Documentación planimétrica	149
4.2.	Nubes de puntos	149
4.3.	Mallas tridimensionales	151
4.3.1.	Reproducciones 3d.....	151
4.3.2.	Visores web.....	155
4.3.3.	Realidad virtual, aumentada y mixta.....	158
 CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDIO		167
1.	CASO 1. DIGITALIZACIÓN 3D PARA INVESTIGACIÓN. IGLESIA DEL SANTO SEPULCRO EN TORO, ZAMORA.....	169
1.	Antecedentes	171
2.	Planificación previa del trabajo	179
3.	Toma de datos	179
4.	Procesado de los datos.....	181
5.	Resultados	183
2.	CASO 2. DIGITALIZACIÓN 3D PARA COPIA DE SEGURIDAD O BACKUP. NUESTRO PADRE JESÚS NAZARENO, VALLADOLID	193
1.	Antecedentes	195
2.	Planificación previa del trabajo	196
3.	Toma de datos	197
4.	Resultados	204
3.	CASO 3. DIGITALIZACIÓN 3D PARA REALIZACIÓN DE RÉPLICA. CAPITELES ROMÁNICOS DEL MUSEO ARQUEOLÓGICO NACIONAL DE MADRID.....	213
1.	Antecedentes	215
2.	Planificación previa del trabajo	220
3.	Toma de datos.....	221
4.	Resultados	223
4.	CASO 4. DIGITALIZACIÓN 3D PARA DEFINICIÓN DE PROYECTO EXPOSITIVO. INTERIOR DE LA CATEDRAL DE CÁDIZ	229
1.	Antecedentes	231
2.	Planificación previa del trabajo	233

3. Toma de datos	234
4. Procesado de los datos.....	236
5. Resultados	239
5. CASO 5. DIGITALIZACIÓN 3D DE UNA RUINA PARA ESTABLECER UNA HIPÓTESIS. EL CONVENTO DE LOS VALLES EN TORRESANDINO, BURGOS ...	245
1. Antecedentes	247
2. Planificación previa del trabajo	250
3. Toma de datos	251
4. Procesado de datos	255
5. Resultados	257
6. CASO 6. DIGITALIZACIÓN 3D DE UN NÚCLEO URBANO PARA SU ESTUDIO Y ANÁLISIS. LA CALZADA DE BÉJAR, SALAMANCA	267
1. Antecedentes	269
2. Planificación previa del trabajo	272
3. Toma de datos	273
4. Procesado de datos	276
5. Resultados	278
7. CASO 7. DIGITALIZACIÓN 3D PARA RESTAURACIÓN. EL ARTESONADO DE LA CABECERA DE LA IGLESIA DE SANTA MARÍA EN FUENTES DE NAVA, PALENCIA.....	287
1. Antecedentes	289
2. Planificación previa del trabajo	293
3. Toma de datos	293
4. Procesado de los datos.....	295
5. Resultados	297
8. CASO 8. DIGITALIZACIÓN 3D PARA DOCUMENTACIÓN. CATEDRALES DE PLASENCIA, CÁCERES	305
1. Antecedentes	307
2. Planificación previa del trabajo	310
3. Toma de datos	311
4. Resultados	314
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	323

CAPÍTULO 6. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	327
CAPÍTULO 7. DIFUSIÓN DEL TRABAJO.....	329
1. CONFERENCIAS	329
2. ARTÍCULOS PUBLICACIONES	329
3. COMUNICACIONES A CONGRESOS.....	329
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	331
CAPÍTULO 9. ÍNDICE DE TABLAS	339
CAPÍTULO 10. ÍNDICE DE FIGURAS.....	343

CAPÍTULO

1

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. ELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

El interés por documentar la arquitectura, en su sentido más amplio, no es una cuestión de la actualidad, sino que ha estado presente desde el principio de la civilización. Un ejemplo importante de esto del acceso al conocimiento de una arquitectura a través del levantamiento arquitectónico lo podemos ver sobre todo en una serie de movimientos surgidos durante los siglos XVIII y XIX. Desde las expediciones enviadas por Napoleón a Egipto y Siria durante los años 1798-1801, los dibujos de viajes realizados por el pintor renacentista David Roberts (1796-1864) o el movimiento surgido en Francia de las “Beaux Arts” (1850-1968). Todas las documentaciones llevadas a cabo durante estos siglos se realizaban mediante un levantamiento analítico, el cual plasmaba la forma y estado de los elementos arquitectónicos, reflejando las dimensiones reales de los objetos. A pesar de ser unos dibujos que carecen de datos métricos se han convertido en una documentación muy importante, ya que reflejan muy bien y nos dan información de cómo eran esos bienes patrimoniales en ese momento, algunos de los cuales en la actualidad ya han desaparecido.



Figura 1. Vista frontal del templo de Luxor. Dibujo de viajes realizado por el pintor renacentista David Roberts en el año 1838 durante su expedición en Egipto. Fuente: <https://egiptoaldescubierto.es> [Consultado: 11/03/2019]

A finales del siglo XIX empiezan a surgir metodologías y herramientas que permiten realizar la documentación de la arquitectura, sin acceder a ella, reflejando datos métricos con mayor precisión, dando un nuevo sentido a la documentación que entendemos como levantamientos científicos.

Estas herramientas también fueron evolucionando con el paso de los años lo que implicó la facilidad de la toma de datos y mejorar la precisión y los resultados obtenidos. Las primeras herramientas de fotogrametría analógica fueron los restituidores analógicos y estos fueron sustituidos por instrumentos más precisos, los escáneres láser.

En un principio cuando se realizaba la documentación de un edificio el fin último era la creación de documentos planimétricos de precisión que registraran el estado del edificio en ese momento y que sirvieran de apoyo a posibles proyectos o intervenciones futuras, además de dejar un registro documental del mismo. En la actualidad ese proceso de documentación busca conseguir algo más, y es facilitar el conocimiento de la existencia y situación de ese edificio a diferentes agentes sociales mediante el uso de herramientas de difusión web.

Todas estas herramientas de digitalización además de permitirnos documentar la arquitectura con gran precisión también permiten realizar diagnósticos del estado de la misma pudiendo detectar deformaciones estructurales o determinadas patologías constructivas. Son muchos los estudios científicos que demuestran este aspecto (Falcone et al., 2021; Vacca et al., 2016).

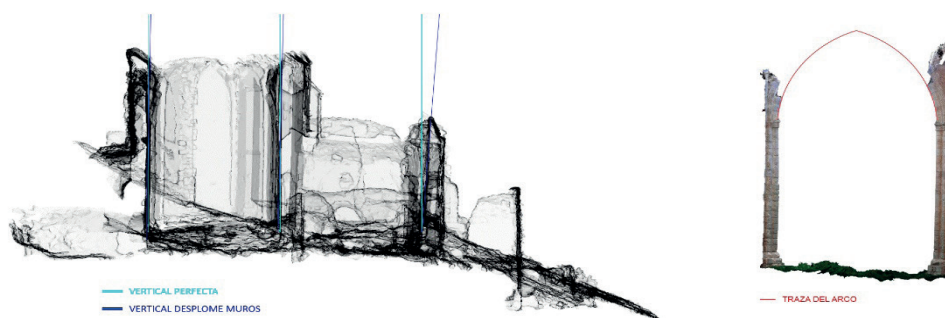


Figura 2. Análisis de deformaciones estructurales utilizando la nube de puntos, obtenida mediante escaneado láser, como base para el diagnóstico. Fuente: elaboración propia

A fecha de hoy existen muchas líneas de investigación sobre la utilización de herramientas para la digitalización de edificios y el planteamiento de metodologías de trabajo, ya que en los últimos años se ha extendido mucho el uso de estas herramientas por los datos de gran calidad métrica que ofrecen (Esteve et al., 2017; Herraiz et al., 2013; Saleri et al., 2013; Morales et al., 2014).

Desde el punto de vista metodológico y tecnológico empleado en la digitalización y documentación del patrimonio, mi interés y trayectoria profesional me ha permitido ir experimentando con las diferentes técnicas, observar su evolución e ir definiendo una metodología aplicable a diferentes y variados campos, no solo patrimonio arquitectónico, sino también en campos de la arqueología, antropología, geología o ingeniería.

Ya en el año 2012 durante el Proyecto Fin de Máster del MIA (Máster de Investigación en la Arquitectura) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid, desarrollé una base personal para una metodología de levantamiento arquitectónico, que con el transcurso de los he ido mejorando y actualizando.

El levantamiento arquitectónico es uno de los instrumentos básicos e indispensables para el arquitecto en trabajos en donde se actúe sobre edificios construidos. El levantamiento no sólo constituye la base documental técnica de toda intervención en un bien cultural inmueble, sino que define en gran medida, el desarrollo y el éxito de todas las etapas de trabajo llevadas a cabo posteriormente.

Durante todo el proceso de levantamiento arquitectónico es cuando el arquitecto entra en verdadero contacto y analiza el edificio. Debemos tener siempre presente que el levantamiento de un bien no se reduce a la simple medición geométrica espacial del conjunto. En nuestro caso un levantamiento conlleva la medición y el estudio exhaustivo de cada espacio y cada elemento significativo del edificio o espacio a intervenir, así como de la decoración o elementos identificativos del propio edificio, destacables para el posterior trabajo a realizar.

El tiempo empleado en la ejecución de este paso, nunca será tiempo perdido. Dependiendo de las características arquitectónicas de una construcción, un levantamiento detallado puede suponer desde varios días hasta varios meses. Al iniciar la redacción de un levantamiento debemos recordar, que las omisiones o errores cometidos en su ejecución, por razones de premura o falta de rigor, repercutirán directamente, no sólo, en las etapas posteriores de proyecto y en costosos errores durante la ejecución de las obras propuestas; sino también en la carencia de un registro documental adecuado de información previa al inicio de los trabajos de intervención, lo cual, con el paso del tiempo, puede ser irrecuperable.

Es en este momento, donde contar con unos buenos instrumentos, así como una buena metodología de trabajo es imprescindible para la buena consecución del mismo. Este buen instrumental, en ningún momento podrá sustituir a la visita al edificio con cinta métrica, lapicero y bloc de dibujo, y por tanto no debemos entenderle limitado al uso de las nuevas tecnologías, que indudablemente nos aportan unos beneficios significativos. El estudio de estos nuevos instrumentos, nos permitirá una mejora considerable, tanto en precisión como en tiempo de ejecución, facilitándonos la tarea, pero por supuesto no sustituyen, sino que complementan al trabajo de observación, dibujo analítico e interpretación, realizados sobre el terreno, que son imprescindibles para la consecución de un buen levantamiento.



Figura 3. El croquis de trabajo permite analizar en detalle el objeto de estudio en el proceso de toma de datos del levantamiento arquitectónico. Fuente: elaboración propia

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación tiene como objetivo establecer una metodología de levantamiento que sea operativamente correcta y funcional para, en nuestro caso, poder documentar un edificio tanto exterior como interiormente optimizando los recursos, pero que a su vez esta metodología pueda ser extrapolable para la documentación 3d en otras ramas o campos de investigación. En el trabajo se expondrá un estudio y comparación de todos los métodos de levantamiento, tanto los tradicionales como los nuevos para poder definir esta metodología de levantamiento 3d, y se aplicarán en una serie de casos de estudio para comprobar su efectividad.

No siempre los procesos nuevos tienen que sustituir a los tradicionales, ni tendremos que limitarnos únicamente a los tradicionales, sino que se debe lograr una compatibilidad entre ellos. Dependiendo del fin del levantamiento que se va a llevar a cabo, es imprescindible conocer todas las posibilidades de documentación para tener un óptimo resultado, combinando todos los métodos a nuestra disposición.

Normalmente cuando se realiza un proyecto de levantamiento arquitectónico motivado por la intervención en el edificio, este se centra en la obtención de datos métricos del edificio para la realización posterior de documentos planimétricos detallados que muestren el estado actual del objeto. Simplificando, podemos englobar en tres apartados los objetivos de un levantamiento. En primer lugar, el “conocer”, el conocimiento del objeto, comprendiendo por conocimiento comprender, entender, analizar, explicar, en este aspecto el objeto actúa sobre nosotros, el conocimiento modifica la percepción que tenemos inicialmente del objeto.

El segundo apartado tenemos “proponer” y aquí hacemos referencia a: intervenir, consolidar, conservar, restaurar, rehabilitar, proteger. El levantamiento tiene por objetivo redactar un proyecto que proponga cosas, En este caso somos nosotros (el proyecto) el que modifica el objeto.

El último bloque es “difundir”, entendiendo como tal aglutinar intereses, captar financiación, reunir sinergias, educar, sensibilizar. En este caso tanto el objeto inicial como su proyecto pretenden actuar sobre el resto de la sociedad.

En esta tesis demostraremos que un levantamiento adecuado, puede dar satisfacción a los tres apartados.

La documentación generada muestra una información muy importante que al final únicamente es manejada por técnicos especializados o por instituciones. Este protocolo de levantamiento no solo nos va a permitir la obtención de datos métricos para la generación de documentación planimétrica necesarias para un proyecto arquitectónico, sino que, sirviéndonos de los avances tecnológicos del momento, podremos ir un paso más allá, utilizando los resultados obtenidos para su posterior difusión.

El otro objetivo del trabajo es la difusión del levantamiento, lo que está relacionado con la creación de modelos virtuales, tours virtuales y visualización o renderizado en tiempo real mediante software utilizado en la industria del videojuego.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

1. ANTECEDENTES

La fotogrametría es una técnica actualmente básica y fundamental para la documentación de cualquier objeto, ya sea arquitectura, escultura, arqueología, medicina o ingeniería. Es una técnica que nos permitirá obtener la geometría de un objeto a partir de fotografías.

Esta técnica no es algo actual, sino que se lleva utilizando desde la invención de la fotografía ¹, si bien en la actualidad es conocida y utilizada de forma global, sin apenas tener conciencia de ello, gracias a la gran evolución que ha habido tanto en el hardware como en el software. En la actualidad ha llegado a tal punto el desarrollo de los programas de fotogrametría que podemos realizar modelos fotogramétricos con una gran calidad geométrica y de color utilizando un simple teléfono móvil (se pueden conseguir modelos 3d con color real y una precisión centimétrica).

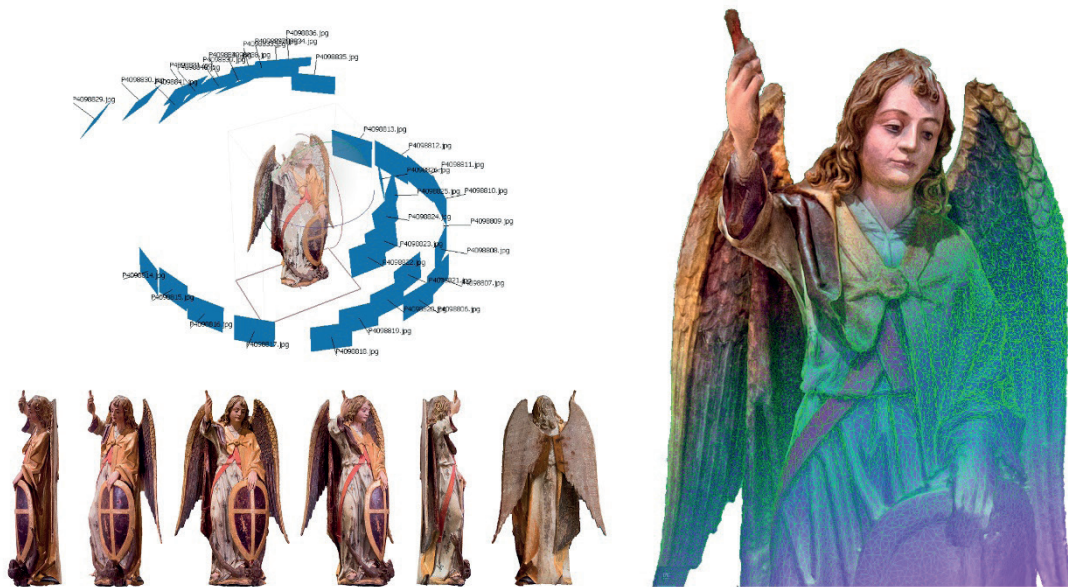


Figura 4. Prueba de modelo fotogramétrico obtenido a partir de fotografías capturadas con un teléfono móvil. Fuente: elaboración propia. Escultura de madera policromada de San Miguel Arcángel de Alejo de Vahía. Museo de Becerril de Campos

¹ En 1858 el francés Laussedat, consiguió obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones de terreno a partir de la fotografía, siendo este el primer inicio de la fotogrametría, que en su día se conoció con el nombre de fotogrametría ordinaria.

2. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE LEVANTAMIENTO

En el levantamiento, al igual que ha ocurrido en todas las ramas de las ciencias analíticas, se ha producido un gran avance tecnológico en la instrumentación, lo que ha provocado que los métodos de trabajo también hayan evolucionado de manera notable.

Hasta no hace tantos años cuando una persona se enfrentaba a un trabajo de documentación o levantamiento de un elemento arquitectónico suponía un gran esfuerzo y tiempo de trabajo, tanto en la toma de datos como en la elaboración de la documentación. Las herramientas que se utilizaban para realizar el levantamiento de un edificio eran fundamentalmente la cinta métrica y flexómetro, para medir las distancias; la plomada, para determinar los desplomes; y los jalones, para poder calcular las alturas.



Figura 5. Herramientas de medición tradicionales. De izquierda a derecha: cinta métrica y flexómetro, plomada y jalón. Ilustración propia

La metodología de medición utilizada con estos instrumentos es la triangulación, y se basa en la trigonometría para determinar la posición exacta de puntos, medidas de distancias o áreas de figuras. El método de la triangulación para calcular distancias se remonta a la antigüedad, esta técnica ya se conocía en el Antiguo Egipto y se reflejó en el papiro de Ahmes o papiro matemático de Rhind. El papiro contiene 87 problemas matemáticos y el número 57 describe el *seqt* o *seked* como la pendiente (hipotenusa) de un triángulo rectángulo, definido como la relación de dos números enteros (catetos)². (Robins & Shute, 1987)

² Robins, R. Gay, and Charles C. D. Shute. 1987. *The Rhind Mathematical Papyrus: An Ancient Egyptian Text*. London: British Museum Publications Limited. ISBN 0-7141-0944-4



Figura 6. Fragmento del papiro de Ahmes o de Rhind. Fotografía de Paul James Cowie

Posteriormente, y debido a la evolución en las investigaciones de la óptica con luces de espectro no visible, aparecieron otros instrumentos más tecnológicos basados en el láser, que permitían realizar con mayor precisión las mediciones como fueron las estaciones totales o los distanciómetros láser. Estas nuevas herramientas permitían medir puntos con más precisión y de forma más fácil.



Figura 7. De izq. a dcha. estación total Leica TCR1203 R300 y distanciómetro láser Leica D5. Ilustración propia

Esta evolución tecnológica ha seguido avanzando y ha hecho que aparezcan múltiples instrumentos de captura de datos métrico-dimensionales, cada vez más sofisticados, capaces de llegar a precisiones, velocidades y capacidades de proceso de datos cada vez mayores.

Estas nuevas tecnologías incluyen desde instrumentos que se han ido modernizando con el paso del tiempo, como cámaras de fotos métricas de una precisión y calidad mucho mayor o distan-

ciómetros láser cada vez más compactos y completos, hasta instrumentos completamente nuevos, como los escáneres láser tridimensionales, con los que se pueden alcanzar precisiones muy superiores. O los aparatos de vuelo no tripulado (UAV) desde los que hacer reconocimientos visuales y reconstrucciones tridimensionales desde puntos de vista antes impensables.

Para la realización de cualquier levantamiento arquitectónico siempre será necesaria la intervención de un técnico, ya sea un arquitecto u otro tipo de especialista, responsable de la evaluación e interpretación de los datos empíricos que se toman.

Esto supone que el levantamiento de un edificio, llevado a cabo por dos personas diferentes nunca será igual, aunque las mediciones sean exactamente las mismas.

Partiendo de esta premisa, la medición de los elementos del edificio no tienen por qué ser tomados únicamente con cinta métrica, ya que si disponemos de un distanciómetro láser podremos utilizarlo porque además de tener mayor precisión siempre nos dará una mayor autonomía y comodidad.

Tampoco será necesario recurrir a estaciones topográficas clásicas, cuando tengamos la oportunidad de contar con las modernas estaciones robotizadas o los sistemas de posicionamiento global (gps).



Figura 8. Evolución de los equipos topográficos. De izquierda a derecha: Pentax AL-320, Pentax PCS-1S, Leica TCR 305, Leica TCR 1200 y GPS Leica Smartrover. Fuente: elaboración propia

La parte de la interpretación de los datos y su posterior representación, para la redacción de la documentación correspondiente, también ha sufrido un evidente desarrollo en los últimos años, y no sólo por el uso del ordenador, sino por los accesorios periféricos que van asociados al mismo. Cada día se está generalizando cada vez más la utilización de tabletas digitalizadoras que nos permiten la realización de documentaciones más interpretativas que técnicas, y acercan el tradicional dibujo a mano alzada a la documentación o dibujo asistido generado por ordenador.



Figura 9. La realización del dibujo digital se asemeja más al tradicional gracias a la evolución de las tabletas gráficas. A la izquierda una de las primeras tabletas en las que se dibujaba en una superficie pero el dibujo se visualizaba en una pantalla externa. A la derecha una tableta con pantalla integrada, lo que facilita el dibujo ya que la posición de la punta del lapicero coincide con el trazo dibujado. Imágenes de www.wacom.com [Consultado: 12/02/2018]

Aunque pueda llegar a parecerlo, el uso de estas nuevas tecnologías no nos proporcionará resultados automáticos, sino que nos ayudará a automatizar los procesos no analíticos, más pesados, y en los que la interpretación del técnico no es importante, sino que se basan en una interpretación anterior, o preparan los datos para su posterior valoración.

Otro punto que ha favorecido el aumento de uso de estos instrumentos durante el trabajo de campo, ha sido la disminución de tamaño y peso de los equipos informáticos, unida a su autonomía de funcionamiento.

Los ordenadores portátiles, así como las “tablets”, nos permiten aproximar al trabajo de campo una manera de tomar los datos diferente a la realizada mediante el lapicero y el cuaderno de croquis, y esto es importante, diferente, pero no excluyente, ya que nada sustituye el trabajo de observación, análisis, interpretación, selección y valoración que conlleva el trabajo de croquización y medición directa.

3. TÉCNICAS O MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

La fotogrametría es una técnica que permite crear modelos 3d a partir de fotografías 2d, es decir, permite determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. En definitiva, la fotogrametría es “medir sobre fotos”. Es una técnica de medición indirecta ya que las mediciones no se realizan sobre el objeto sino sobre las fotografías.

La fotogrametría se apoya fundamentalmente en las relaciones matemáticas de la geometría proyectiva y de la visión estereoscópica³.

Si trabajamos con una foto podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica; o, dicho de otro modo, información tridimensional.

³ La visión estereoscópica es la capacidad que tiene el ser humano de integrar en una sola imagen tridimensional, en relieve y con suficiente profundidad las dos imágenes que nos llegan desde cada uno de nuestros ojos.

3.1. Definiciones de fotogrametría

Existen múltiples definiciones del término fotogrametría, de entre las que destacamos las siguientes:

- La fotogrametría puede definirse como el arte, ciencia y tecnología cuyo fin es el de obtener información cuantitativa fiable relativa a objetos físicos y su entorno, mediante procesos de registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing- 1979).
- La fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas del objeto fotografiado (ISPRS. Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos).
- La fotogrametría es la técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías (H. Bonneval-1972).
- Combinación eficaz de los sistemas de topografía, las técnicas de fotografía y los mecanismos de la informática para la documentación, análisis y valoración del patrimonio (J. San Jose-1998).

3.2. Historia

Según Gottfried Konecny (1981/5) la fotogrametría se desarrolla y evoluciona en cuatro etapas:

- a. Metrofotografía: a partir de 1850 hasta 1900. Se inicia con la invención de la fotografía por Niepce y Daguerre en 1839 en Francia. El término Metrofotografía fue ideado por el coronel francés Laussedat hacia 1851; a quien se lo considera el fundador de la Fotogrametría.
- b. Fotogrametría analógica: desde 1900 a 1960, ciclo que se inicia con dos inventos importantísimos, por un lado, la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría y por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y el aeroplano.
- c. Fotogrametría analítica: desde 1969 hasta 1980, ciclo iniciado por la aparición de las computadoras.
- d. Fotogrametría digital: desde 1980 hasta nuestros días, ciclo iniciado a partir del lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik de origen ruso y por el uso del satélite Landsat de origen estadounidense.

3.3. Clasificación de la fotogrametría

La fotogrametría se puede clasificar según el tipo de fotografías desde la posición donde hayan sido capturadas, y según el tipo de tratamiento de procesamiento que se les aplique a esas fotografías.

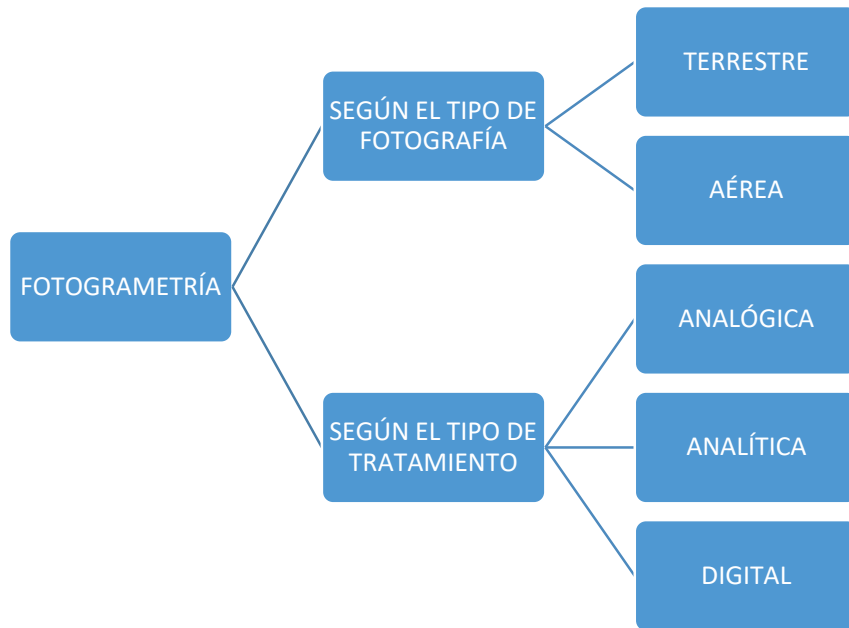


Figura 10. Clasificación de la fotogrametría

Existen varias formas de hacer fotogrametría:

- Fotogrametría terrestre: En este caso las estaciones se encuentran a nivel del suelo. Tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología, aunque cada vez se está utilizando en muchos más campos.
- Fotogrametría aérea: Es cuando las estaciones se encuentran en el aire. Se aplica para la elaboración de planos y/o mapas para el desarrollo de proyectos de ingeniería.
- Fotogrametría Analógica. Se basa en el tratamiento físico de la imagen. Los aparatos de restitución usados pueden ser ópticos o mecánicos. El operador realizaba la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico nivelado y escalado. Esta es la Fotogrametría Clásica.
- Fotogrametría analítica: Surge a partir de la utilización de restituidores analíticos y la incorporación de las computadoras. No hay tratamiento físico. Se encarga de aplicar los modelos matemáticos a objetos físicos. Con el restituidor analítico se agilizan los tiempos y se lograban niveles de detalle a diferentes escalas.
- Fotogrametría digital: Con la evolución tecnológica de los ordenadores, se sustituye la imagen analógica por la imagen digital, del mismo modo que se empiezan a utilizar programas informáticos. En la actualidad la fotogrametría digital es la más utilizada, pero sigue conviviendo con la fotogrametría analítica.

Las técnicas o métodos de documentación a través de la fotogrametría son muy diversos, sobre todo a partir de la evolución tecnológica que se produjo a mediados de los años 90.

Las imágenes digitales se cargan en el ordenador y el operador puede identificar con buena precisión los puntos homólogos o bien el ordenador realiza estas operaciones por comparación de imágenes; finalmente el resultado es una imagen en formato ráster o vectorial.

Lo interesante de esta salida (digital) es que puede ser utilizada como información de base para la generación de los conocidos Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Según su tratamiento es posible determinar lo siguiente:

Tipo de fotogrametría	Entrada de datos	Procesamiento	Salida de datos
Analógica	Película fotográfica	Analógico (óptico – mecánico)	Analógica
Analítica	Película fotográfica	Analítico (Computadora)	Analógica
Digital	Imagen digital	Analítico (Computadora)	Digital

Tabla 1. Tipos de fotogrametría según su tratamiento

3.4. Técnicas o herramientas de fotogrametría

La utilización de fotografía en los levantamientos arquitectónicos proviene de los primeros tiempos de la fotografía, cuando se empezó a generalizar el uso de esta.

Ya sea como fotografías de apoyo, para su posterior uso en la elaboración de documentación o la aclaración de dudas durante la redacción de los levantamientos; como fotografías métricas, para la utilización en el levantamiento de alzados u otro tipo de paramento mediante la rectificación de imágenes; o bien como generación de pares estereoscópicos para su posterior restitución, mediante aparatos de procesamiento analítico o digital. Procesos que se basan en la utilización de las imágenes obtenidas con cámaras fotográficas, que solamente han cambiado en función de su calidad o capacidad, pero cuyo uso sigue siendo el mismo.



Figura 11. Evolución de los equipos fotográficos. De izquierda a derecha: cámara métrica Hasselblad 500c; cámara réflex digital SLR Nikon D700, cámara micro cuatro tercios Olympus EPM1, cámara sin pantalla Olympus AIR, micro cámara foto/vídeo GoPro Hero 10. Fuente: elaboración propia

Aun así, se han desarrollado nuevos métodos para el levantamiento, sobre todo levantamientos tridimensionales de edificios o parte de los mismos. A la utilización de pares estereoscópicos, esto es, parejas de fotografías con el eje de proyección convergente y separadas en su origen una longitud proporcional a la distancia al objetivo, se les une la posibilidad de utilizar colecciones de fotografías convergentes, en las que simplemente hay que variar la posición del observador y mantener puntos de observación comunes entre ellas. O incluso el levantamiento mediante una única

fotografía en la que se conocen las posiciones de los principales ejes de fuga. Los programas de fotogrametría digital también han ido evolucionando y actualmente también existe la posibilidad de utilizar fotografías esféricas para generar modelos fotogramétricos (Barba et al., 2019)

3.4.1. RECTIFICACIÓN FOTOGRÁFICA (LEVANTAMIENTO DESDE UNA FOTOGRAFÍA)

La rectificación fotográfica se considera una técnica o método dentro del campo de la fotogrametría. En determinadas ocasiones, la simplicidad de los paramentos a levantar, por encontrarse contenidos sobre una superficie plana, hace que sea más sencillo la utilización de una sola fotografía, que por medio de la corrección de la distorsión de la imagen y de las fugas que provoca la perspectiva, así como su posterior escalado, se aproximan a un resultado métrico acabado. Evidentemente por la forma de proceder este es un proceso completamente informatizado por lo que las fotografías a utilizar tienen que estar en formato digital.

Se trata en definitiva de la utilización de la rectificación fotográfica, donde es posible, gracias al avance de los sistemas de representación gráfica digital, la acción de “deformar” una imagen fotográfica, para conseguir corregir las distorsiones generadas por la perspectiva, de forma que el eje de visión sea exactamente perpendicular al plano del paramento.



Figura 12. Rectificación fotográfica. A la izquierda imagen original y a la derecha imagen rectificada. Fuente: elaboración propia

Siendo el eje óptico de la imagen perpendicular al paramento objeto de la rectificación, conseguiremos un documento en el que se conservan las proporciones del elemento, aunque con una escala indeterminada, que podremos corregir con un adecuado levantamiento métrico de las medidas generales.

Existen diferentes métodos para conseguir la rectificación fotográfica correcta.

- Método matemático, basado en la utilización de ecuaciones matemáticas.
- Método óptico, basado en la utilización de elementos ópticos que utilizan la reflexión y refracción, como sucede con la cámara clara.
- Método gráfico, consistentes en la determinación del triángulo de fugas de un sistema de cuadrícula fugada.
- Método gráfico-numérico que completa el proceso gráfico, mediante la determinación de la inclinación de la cámara fotográfica.

No nos interesa exponer aquí tanto la explicación de los métodos llevados a cabo, como el proceso y el resultado en sí.

Una aspecto muy importante a tener en cuenta es que, siempre que se vaya a realizar una rectificación fotográfica, previamente tendrá que haber sido calculada la calibración de la cámara con el objetivo que se vaya a utilizar para la realización de las fotografías. Estos patrones de calibrado variarán en una misma cámara según el objetivo utilizado y nos permitirán calcular los parámetros internos, externos y posibles distorsiones de la cámara a partir de un conjunto de puntos (rejilla de calibración) con coordenadas conocidas.

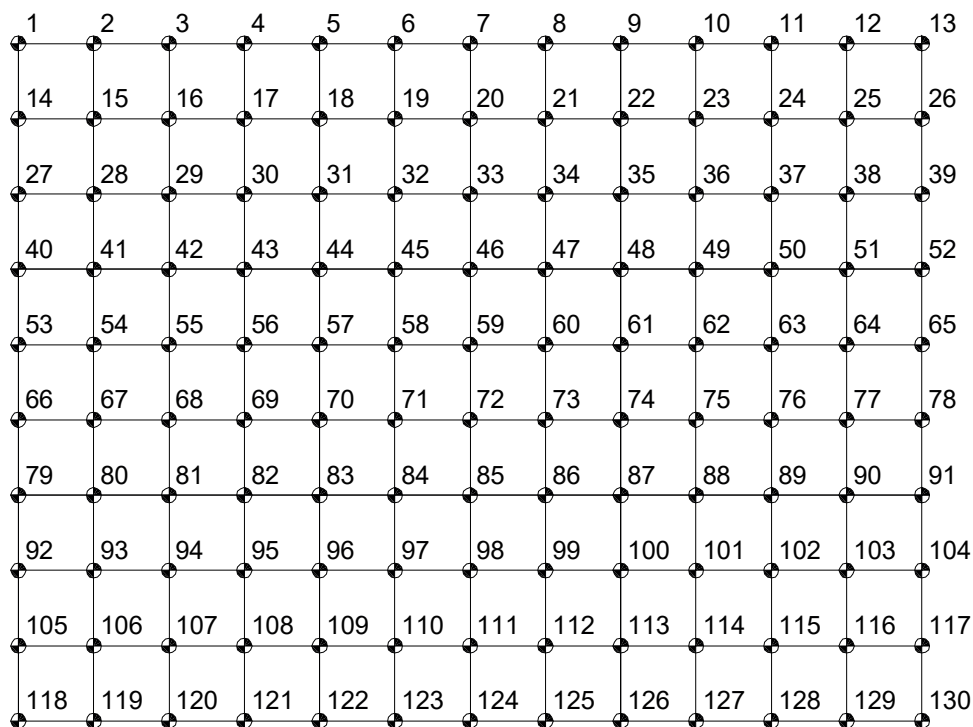


Figura 13. Rejilla de calibración. Fuente: ASRix. [Consultado: 12/03/2017]

El proceso más utilizado es la rectificación, realizada mediante la utilización de programas tales como ASRix, que nos permitirán, mediante una correspondencia de puntos homólogos entre la fotografía y los datos tomados en el campo, o bien mediante cualquier otra técnica, conseguir un mosaico de fotografías rectificadas, que se aproximen bastante al modelo real.

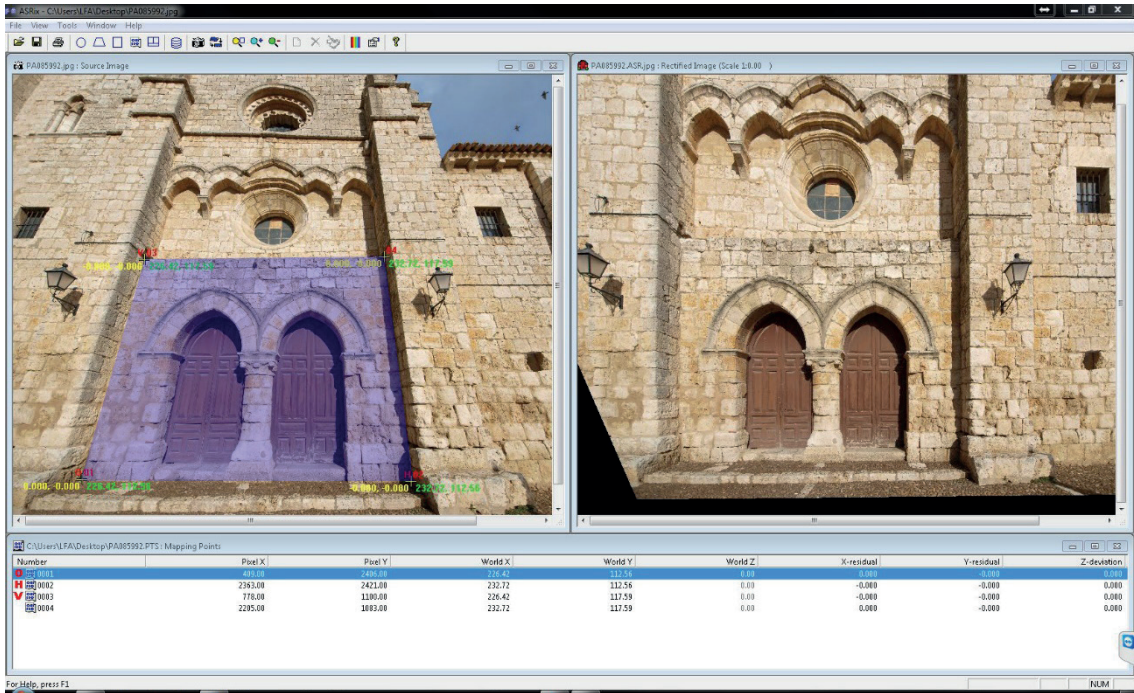


Figura 14. Espacio de trabajo del software de rectificación fotográfica ASRix

Debido a que estos mosaicos están formados por múltiples fotografías, con diferentes condiciones de iluminación, hay que realizar una homogeneización radiométrica para que haya un equilibrio de color entre todas las imágenes.

Una vez conseguida la rectificación de las fotografías, la generación de una nueva documentación es más sencilla. Esta documentación puede ser directamente las imágenes rectificadas como representación de fotoalzados de alta calidad, o bien el dibujo calcado sobre la fotografía con todo el detalle que permita la imagen.



Figura 15. Alzados de fotografías rectificadas. Alzados norte y oeste de la iglesia de la Asunción en Olmillos de Sasamón. Fuente: elaboración propia

Estas técnicas de rectificación en este momento casi no son utilizadas ya que los modelos tridimensionales obtenidos con los actuales programas de fotogrametría son tan completos desde el punto de vista geométrico y radiométrico que nos permiten obtener ortofotos perfectas de los alzados de nuestros objetos de estudio o edificios.

3.4.2. RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA (PARES ESTEREOSCÓPICOS)

Esta técnica consiste en la reconstrucción en tres dimensiones de un objeto a partir de dos o más fotografías. Esto se consigue orientando los fotogramas por un proceso de convergencia de haces, es decir, colocando los fotogramas en su posición adecuada con sus marcas fiduciales⁴ (orientación interna) y colocando los fotogramas en la misma posición que ocupaban entre ellos en el momento de las tomas (orientación absoluta).

La orientación interna de una fotografía se basa en la corrección de los errores propios de la cámara fotográfica, tales como distorsiones en la lente, para conseguir ordenar correctamente los haces proyectivos de la fotografía.

La orientación externa, es el proceso por el que se establece la posición de las cámaras fotográficas en el momento de la toma de las fotografías, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia terrestre.

Los pares fotográficos deberán tener un recubrimiento total del objeto a levantar, pero no las fotografías en sí, sino la parte común de las mismas, que es la parte en la que se podrá dibujar las posiciones tridimensionales de los objetos de la misma. Además, estos pares deberán estar solapados entre sí para conseguir conectar los modelos de los pares entre ellos.



Figura 16. Pares estereoscópicos. A la izquierda pares en formato analógico del patio del Museo de Escultura de Valladolid, y a la derecha pares en formato digital de la fachada norte de la catedral de Ávila. Fuente: Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica

Por supuesto estas complejas operaciones, se realizan por medio de restituidores, ya sean analógicos (los cuales utilizan un estereoscopio y placas analógicas), o digitales (utilizando este tipo de imágenes y procesadores), para, en ambos casos orientar los pares fotográficos, conseguir la visión estereoscópica del modelo propio de la visión humana y, a partir de aquí poder explotar el modelo virtual (Núñez et al., 2012).

⁴ Las marcas fiduciales son unas indicaciones en los bordes de la película fotográfica. Normalmente suelen ser cuatro flechas, puntos o cruces. Están colocadas de forma opuesta. Si se unen estos puntos entre sí con unas líneas, el punto donde se cruzan determina el punto principal o centro de la fotografía.



Figura 17. Restituidores. A la izquierda un Adam MPS2 (digital) y a la derecha un Leica SD2000 (analógico). Fuente: Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica

3.4.3. COLECCIONES DE FOTOGRAFÍAS CONVERGENTES (MÚLTIPLES FOTOGRAFÍAS)

Los métodos analíticos, e incluso los primeros métodos digitales, solamente permitían el uso de factores muy controlados en el uso de fotografías. Había que utilizar parejas de fotografías, pares estereoscópicos, en unas condiciones muy concretas de distancias entre observadores y objetivos. Además, estas fotografías debían de estar calibradas debido al uso de negativos, que al ser elementos físicos tenían cierto grado de deformación.

Todos estos problemas se fueron solucionando mediante el uso de los procesos informáticos. El hecho de no tener que revelar las fotografías sobre un soporte físico elimina en cierto grado las deformaciones, de manera que solamente es necesaria la calibración de las deformaciones propias del objetivo de la cámara.

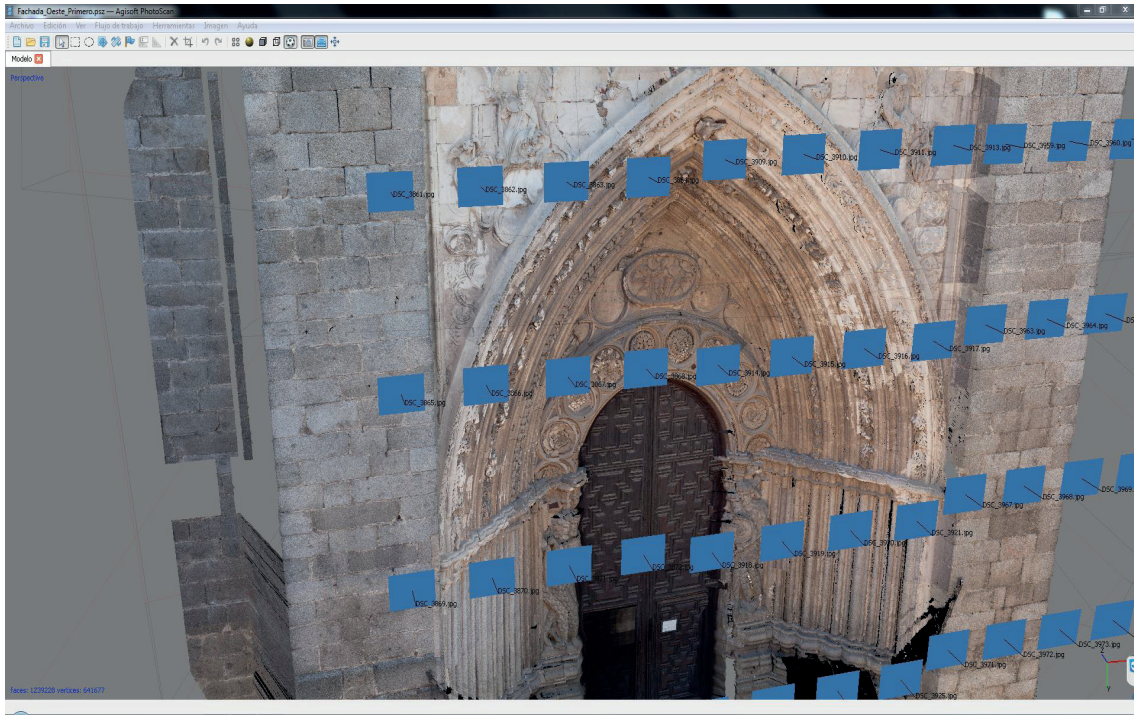


Figura 18. Colección de fotografías realizadas en diferentes niveles para la restitución por fotogrametría de la fachada occidental de la Catedral de Ávila. Fuente: elaboración propia

Este tipo de calibraciones en las cámaras digitales, se soluciona realizando una fotografía sobre un patrón de calibrado fijando la focal. Tratando la imagen obtenida con software, este nos da directamente los parámetros de calibración de nuestra cámara.

Una vez eliminadas estas deformaciones, la utilización de las fotografías métricas se vuelve un tanto más sencillo, pero incluso así, el proceso de restitución digital es largo y tedioso.

La inclusión de los procesos informatizados en la restitución por medio de filtros o reconocimiento de contornos, ha facilitado en gran medida el trabajo; de forma que el tiempo de computación sustituyó al proceso analítico y, una vez logrado este objetivo, era cuestión de tiempo que ya no fuera necesario el uso de unas condiciones tan estrictas en la toma de datos.

A pesar de esto, para que este tipo de programas de reconstrucción 3d sean capaces de alinear entre si todas las fotografías y generar unos datos sin errores es necesario cumplir una serie de condiciones en las fotografías:

- Las posiciones de las fotografías tienen que ser diferentes. Si alguna coincide en la misma posición introducirá errores en el modelo y puntos de ruido.
- Es recomendable que todas las colecciones de fotografías tienen que realizarse con la misma orientación, paisaje (horizontal) o retrato (vertical).
- Utilizar la misma focal para toda una colección de fotografías.
- Todas las fotografías tienen que estar bien expuestas, sin áreas muy oscuras ni muy quemadas ya que en esas zonas el software no será capaz de reconocer puntos.
- Las fotografías tienen que estar bien enfocadas. Una fotografía borrosa introduce errores en los cálculos.

El proceso de reconstrucción de estos programas es similar, lo que difiere entre ellos son los algoritmos de cálculo, lo que hace que unos sean más rápidos que otros en la generación de los modelos tridimensionales.

El primer paso una vez cargadas las imágenes en el programa es calcular los puntos de orientación entre las fotografías. Es muy similar al proceso que se realizaba en los restituidores analógicos, en el que se busca la orientación externa o posición de las cámaras. Además, en este paso se calculan los datos de calibración del objetivo de la cámara. El resultado es una nube de puntos dispersa o nube de orientación.

El segundo paso es el cálculo de la reconstrucción geométrica tridimensional del objeto. Este es un proceso muy largo, ya que el software utiliza algoritmos para calcular cada uno de los puntos que define nuestro objeto. Lo que hace es analizar e ir emparejando, por pares, todas las fotografías y va calculando mediante mapas de profundidad todos los puntos. El resultado es una nube densa de puntos.

El siguiente paso sería la transformación de la nube de puntos densa en una malla de triángulos con un coloreado por vértice a partir de los píxeles de las fotografías utilizadas en la reconstrucción. A continuación, se realizaría el mapeado o texturizado de la malla a partir de las fotografías.

El resultado que se obtiene con el procesado de estas colecciones de fotografías convergentes es una malla tridimensional mapeada a partir de las fotografías. Estas mallas nos permiten obtener vistas completamente ortogonales del edificio objeto del levantamiento; facilitando al técnico una base de dibujo métrica y de calidad.



Figura 19. *Imágenes de las diferentes fases del proceso de fotogrametría. De izquierda a derecha: nube de puntos paso o de orientación, malla de triángulos monocroma y malla de triángulos con textura*

Estos procesos pueden ser completados por medio de apoyos topográficos, geolocalización de los componentes del levantamiento, o la adición de procesos paralelos de levantamiento que completan el modelo, ya sea tridimensional o la documentación bidimensional que sea necesario generar.

Algunos de los programas comerciales que existen en la actualidad para generar modelos tridimensionales a partir de fotografías son: Autodesk ReCap Pro, Agisoft Metashape, Photomodeler, RealityCapture, Pix4D, Trimble Inpho. También existen programas con opciones gratuitas como Alice Meshroom o 3DF Zephyr.

3.4.4. ESCÁNER LÁSER TRIDIMENSIONAL

Un escáner láser tridimensional se basa en la tecnología lidar, del acrónimo del inglés LiDAR⁵ (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging* / *Detección y rango de luz* o *Detección y rango de imágenes láser*), es un dispositivo que permite determinar la distancia de un objeto o superficie hasta el emisor mediante un haz de impulsos láser⁶, y combinado con la cámara fotográfica que incorporan (en los primeros escáner era un elemento externo) también consiguen capturar la información de rango visible (color).

Estos dispositivos han ido evolucionando tanto desde el punto de vista formal como funcional, ya que al principio eran aparatos de grandes dimensiones con un peso importante pero no excesivo, que además exigían para su funcionamiento la necesidad de muchos elementos auxiliares (baterías externas, cables, ordenadores, cámaras fotográficas, etc.). A día de hoy son más pequeños, ligeros, rápidos y son capaces de capturar un mayor número de puntos por segundo.

⁵ Término usado frecuentemente para referirse a escaneados láser aerotransportados pero que también se aplica a algunos sistemas terrestres.

⁶ Láser (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), es un haz intenso de luz que produce imágenes con impulsos electrónicos.



Figura 20. Evolución del escáner láser en tamaño, movilidad y operatividad. Fuente: <https://leica-geosystems.com> [Consultado: 20/06/2021]

Al mismo tiempo, están incorporando sistemas de múltiples cámaras en todo el perímetro de la carcasa del escáner que permiten capturar el color con imágenes HDR en menor tiempo; y además durante el desplazamiento entre estacionamientos estas cámaras realizan un traqueo continuo durante el proceso de la toma de datos que le permite hacer un pre-registro automático de los escaneos.

Son dispositivos que en su interior contienen amplia tecnología de medición, posicionamiento, sistemas inerciales, etc.

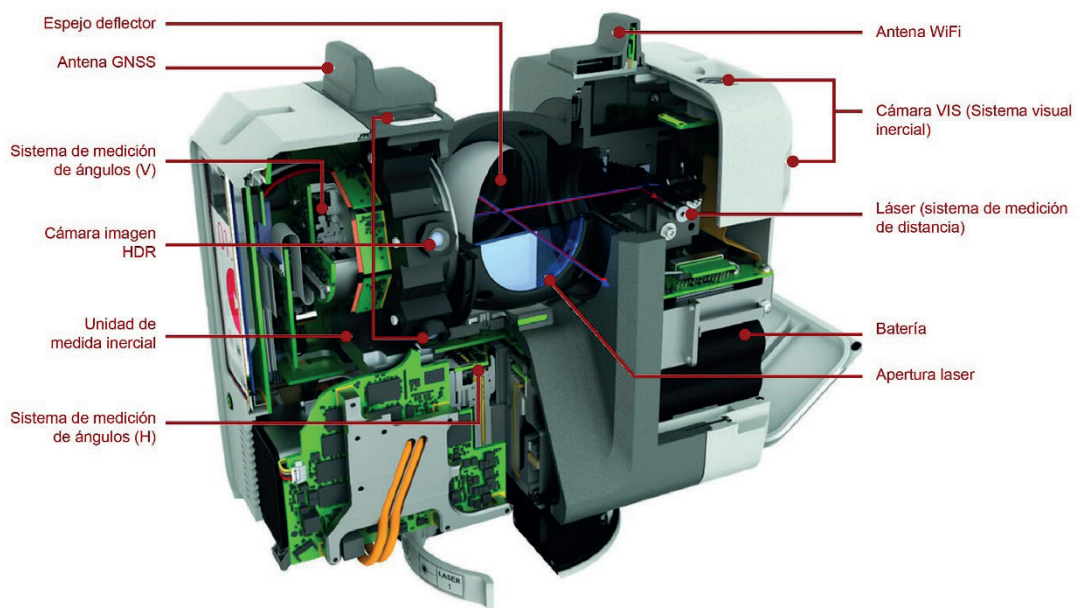


Figura 21. Esquema del interior de un escáner láser. Fuente: <https://leica-geosystems.com>

La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del mismo a través de la señal reflejada. Con la medición que realiza sobre el objeto o superficie es capaz de capturar la geometría y color con una precisión milimétrica. Para ello, realiza un barrido láser del edificio u objeto que estamos estudiando obteniendo una nube de puntos (*point cloud*) métrica de la geometría. Esta nube de puntos⁷ está en bruto, es decir, la captura de datos no es selectiva, sino que es una recopilación de datos masiva en la que no discrimi-

⁷ Conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de coordenadas tridimensional. También puede incluir información adicional, como los valores de color y de reflectividad.

na ninguno de los puntos. Captura la información de todo lo que se encuentre en el entorno del dispositivo. Esta clasificación o selección de puntos es algo que tendrá que hacer el técnico posteriormente al evaluar los datos y realizar el registro o alineación entre los diferentes escaneos.

En definitiva, el escáner láser presenta un gran potencial permitiendo registrar todos los objetos o superficies que rodean al dispositivo en un radio limitado en cuestión de minutos y sin necesidad de contacto con los objetos medidos.

Podemos determinar varios tipos de escáner láser según su procedimiento de utilización:

- ALS: *Airborne Laser Scanning* o escaneo láser aerotransportado.
- ULS: *Unmanned laser Scanning* o escaneo láser no tripulado.
- TLS: *Terrestrial Laser Scanning* o escaneo laser terrestre.
- MLS: *Mobile Laser Scanning* o escaneo láser móvil.
- WLS: *Wearable Laser Scanning* o escaneo láser portátil.



Figura 22. Tipos de escáner según el procedimiento de utilización. Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos del escáner son una colección de puntos orientados con referencia a un sistema centrado en el origen de coordenadas del escáner, información a la que eventualmente se añade también el color del objeto, o incluso algunos otros datos relacionados con sus aspectos físicos.



Figura 23. Modelo de nubes de puntos formado por varios escaneos. Fuente: elaboración propia

La documentación obtenida por el escáner proporciona la generación de modelos tridimensionales a escala real del edificio objeto del levantamiento que, tras su posterior procesado, nos llevará a generar una documentación suficiente para la evaluación del edificio.

Clasificación por su posición

Los escáneres láser por su forma de posicionamiento a la hora de realizar los escaneos se pueden dividir en dos categorías, estáticos y dinámicos.

Estáticos

Es cuando el escáner se mantiene en una posición fija durante la toma de datos. Es el método más utilizado a la hora de realizar escaneos terrestres, sin embargo, no todos los escaneos láser terrestres son estáticos. La ventaja de este método es su alta precisión.



Figura 24. Escáner Leica RTC360. Imagen tomada de la web corporativa Leica Geosystems. [Consultado: 09/04/2021]

Dinámicos

Es cuando el escáner se monta sobre una plataforma móvil. Como puede ser un vehículo, tren, barco, avión, plataformas aéreas no tripuladas o mochilas personales. A estos sistemas también se les conoce con el nombre de Mobile Mapping o mapeo móvil. Debido a que el dispositivo está en constante movimiento estos sistemas requieren de otros dispositivos de posicionamiento adicionales como son los Sistemas de Navegación Inercial (INS)⁸ o Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)⁹, lo que hace que el sistema completo sea más caro y complejo.

8 Instrumento auxiliar para la navegación que utiliza un ordenador y sensores de movimiento (acelerómetros y giróscopos) para controlar continuamente la posición, la orientación y la velocidad de un objeto sin la necesidad de referencias externas.

9 Es un sistema de posicionamiento por satélite norteamericano utilizado para posicionar aeronaves durante un levantamiento aéreo, también usado como técnica para efectuar levantamientos sobre el terreno. Rusia y Europa están trabajando en sistemas similares llamados GLONASS y GALILEO, respectivamente.



Figura 25. Ejemplo de sistema de mapeo móvil Road-Scanner C10. Imagen tomada de la web corporativa de FARO. [Consultado: 23/05/2019]

Aplicaciones del escaneado láser

En un principio estos terminales estaban más enfocados a la documentación de arquitectura, patrimonio (A et al., 2009) e ingeniería civil, pero con el paso de los años se ha demostrado su gran efectividad ampliándose su uso en nuevos campos como la arqueología, la medicina, ingeniería agrícola y forestal, minería (Cabrelles & Lerma, 2017), ingeniería inversa, ciencia forense, cinematografía, entretenimiento o sector de los videojuegos.

10 Sistema creado en la colaboración entre FARO y Siteco. <https://www.faro.com/es-MX/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-faro-road-scanner-c-mobile-mapping-system>

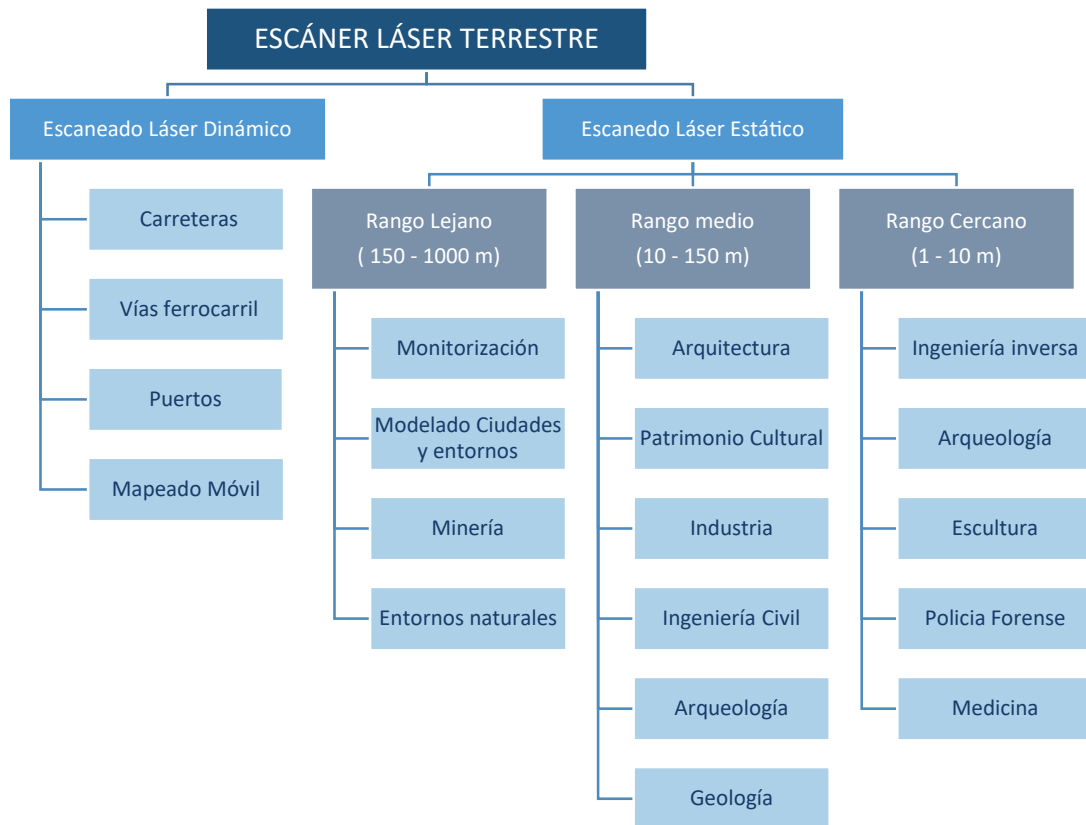


Figura 26. Aplicaciones del escáner láser

Ventajas del escáner 3D

Las ventajas más importantes de la utilización de un escáner láser en proyectos de levantamiento y documentación son:

- **Medidas.** Con el escaneo se evitan replanteos y dudas, ya que de una sola vez se mide todo y obtenemos un modelo 3d muy preciso y fiel a la realidad. Gracias a esto se convierte en una herramienta muy potente para detectar irregularidades en la geometría, deformaciones, etc. (Vacca et al., 2016).
- **Seguridad.** Debido a su forma de funcionar y a que permite tomar datos a cierta distancia nos permite tomar mediciones completas y rápidas de espacios peligrosos o ubicaciones de difícil acceso sin poner en riesgo la vida del operador del escáner (Marcos et al., 2016).
- **No es intrusivo** (Garcia Fernandez et al., 2013). Para la toma de datos no es necesario realizar paradas de operarios ni de las obras, ni se interfiere en los tiempos de la obra. Además, como es un dispositivo que trabaja a distancia no es necesario meterse dentro de un espacio siempre que sea posible hacerlo a cierta distancia. Un ejemplo de esto podría ser una excavación arqueológica, en la cual podremos realizar mediciones desde el perímetro sin tener que entrar dentro de las catas arqueológicas.

- **Proyecto en la oficina.** Al obtener un modelo completo del objeto/edificio con toda la geometría fiel a la realidad, podemos consultar el modelo y extraer cualquier información o medida en cualquier momento.
- **Generación de modelado BIM o planimetrías más rápidas.** Al realizar escaneos se lleva toda la información de la realidad a un modelo 3d a partir del cual se puede modelar el estado actual del objeto (Campi et al., 2017; Pepe et al., 2021).

Clasificación según el método de medición

Podemos clasificar los escáneres en función del método de medición empleada. Aunque todos ellos se basan en la utilización de ondas, ya sea luminosas, visibles o no, existen diferencias en la manera cómo se procesan esas ondas para la medición de la distancia.

Tiempo de Vuelo

Los escáneres de tiempo de vuelo o TOF, *time of flight*, lo que hacen es contabilizar el tiempo que el rayo láser tarda en ir y volver al objetivo, parece que este tiempo es ínfimo a la velocidad que viaja la onda, pero si lo multiplicamos por los millones de puntos que es capaz de medir, nos da como resultado unos tiempos de medición que se encuentran entre los más elevados dentro de los escáneres, siendo de entre unos minutos y varias horas. Se utilizan láseres visibles (verdes) o invisibles (infrarrojo cercano).

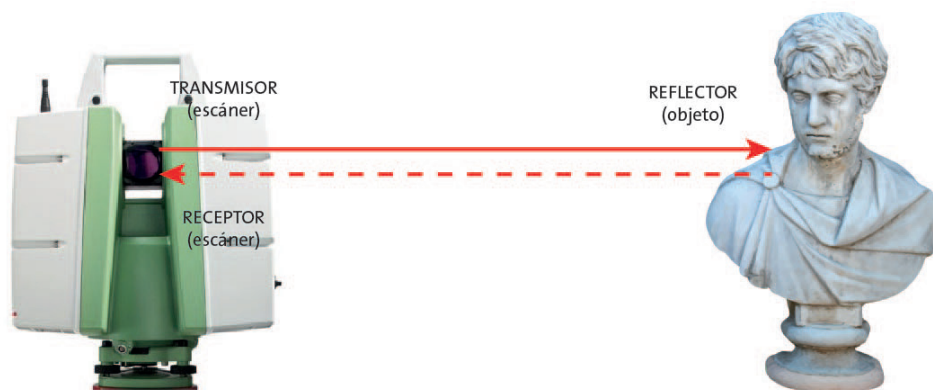


Figura 27. Esquema gráfico del funcionamiento por tiempo de vuelo. Fuente: elaboración propia.

Este tipo de escáner láser permite alcanzar grandes distancias y son los más extendidos dentro de la documentación del patrimonio arquitectónico debido a su versatilidad tanto por su larga distancia de adquisición en exteriores, como por su calidad y depuración en la toma de datos.

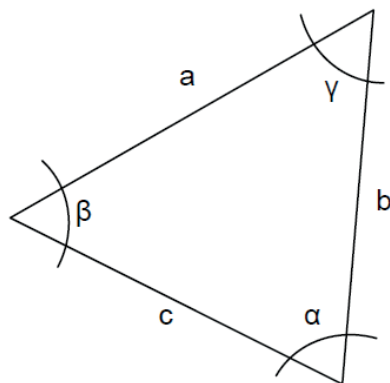
Algunos ejemplos de escáneres basados en el tiempo de vuelo, son el Ilris 3D de Optech, el Leica C10 o el RIEGL VZ-1000.



Figura 28. Escáneres láser de tiempo de vuelo. De izq. a dcha: Optech Illris 3D, Leica Station C10 y Riegl VZ-1000

Triangulación

Los fundamentos matemáticos del triángulo (trigonometría), atribuidos al filósofo griego Thales (siglo VI a.C.), son la base de las técnicas de medición por triangulación.



$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2.b.c.\cos(\alpha)$$

$$c = a.\cos(\beta) + b.\cos(\alpha)$$

Figura 29. Principios de la triangulación

Los escáneres de cambio de fase, o triangulación, basan su funcionamiento en el ángulo de incidencia del rayo con la cámara que detecta su posición. Estos ángulos se miden en fracciones de grado muy pequeñas, por lo que son limitados en la distancia de uso, sin embargo, su tiempo de recogida de datos es mucho más rápida que en los escáneres de tiempo de vuelo (J. Alonso et al., 2012).

El funcionamiento se basa en la iluminación del objeto con un barrido láser que es captado desde una cámara CCD calibrada. Como es conocida la distancia entre la cámara que capta el láser y por otra parte se conoce el ángulo de incidencia de ese rayo captado por la cámara CCD, permite calcular con mucha precisión los puntos que forman el conjunto del cuerpo a escanear. Disponen de una cámara óptica como parte de su funcionamiento, por esta razón junto con la corta distancia de actuación, son capaces de capturar la textura de cualquier elemento con mejor resolución.

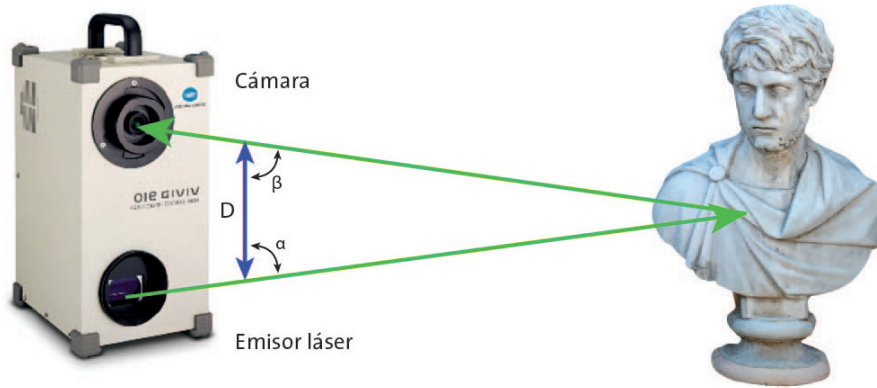


Figura 30. Esquema gráfico del funcionamiento por triangulación. Fuente: elaboración propia

Algunas de las desventajas de este tipo de dispositivos es que su distancia de trabajo es muy limitada, aproximadamente 2 metros. O la dificultad que tiene para capturar objetos cuya textura es brillante o muy oscura, ya que la cámara no es capaz de captar correctamente la iluminación láser.

Los escáneres 3D de triangulación son utilizados para el escaneado de elementos de dimensiones reducidas, denominados también como escáner láser de objeto cercano. Tienen una precisión por debajo del milímetro. Su utilización debe ser realizada a poca distancia del objeto o estructura.

Un ejemplo de estos escáneres es el Minolta Vivid 910.

Cambio o Diferencia de Fase

Este tercer tipo de escáner se basa en la emisión de una serie de ondas láser de diferentes longitudes de onda sobre el objeto, que al ser reflejadas y recibidas de nuevo en el escáner se puede medir la diferencia de fase entre la luz emitida y la recibida. Utiliza dicha medida para estimar el tiempo de vuelo y, por lo tanto, la distancia al objeto. El haz láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de moderada potencia. El rango y la precisión de este tipo de escáner es intermedio, situándose como una solución entre el largo alcance de los dispositivos TOF (tiempo de vuelo) y la alta precisión de los escáneres por triangulación. La velocidad de adquisición es muy alta, consiguiendo los modelos actuales velocidades de escaneo que oscilan entre los 100.000 y 1 millón de puntos por segundo, en función de la precisión requerida.

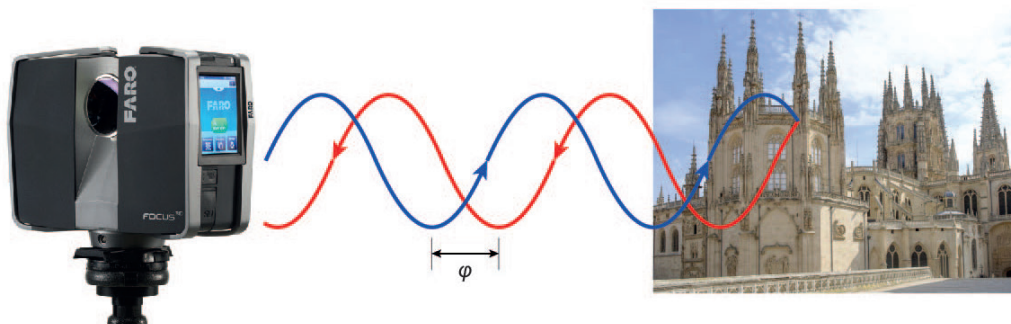


Figura 31. Esquema gráfico del funcionamiento por diferencia de fase. Fuente: elaboración propia

Aportan mayor velocidad y mayor resolución que los basados en tiempo de vuelo, pero presentan limitaciones en la distancia de trabajo que oscila entre los 120 y 300 metros en el mejor de los casos, y dependiendo de las condiciones de reflectividad de la superficie donde incide pierden precisión. Pueden generar “puntos de ruido”¹¹ que exige un posterior postproceso de filtro y limpieza de la nube de puntos del modelo tridimensional. Estos equipos de medición láser son muy utilizados para *as built*¹² industrial, patrimonio histórico, arquitectura e ingeniería inversa.

Algunos ejemplos de escáneres basados en Diferencia de Fase son los escáneres Faro de la serie Photon, el Trimble FX o el Faro Focus3D.



Figura 32. Escáneres láser de diferencia de fase. De izquierda a derecha: Faro Photon 120, Trimble FX y el Faro Focus 3D 120 S. Fuente: imágenes de Google

Luz estructurada

Los escáneres 3D de luz estructurada proyectan un patrón de luz sobre el objeto y analizan la deformación del patrón producida por la geometría de la escena. El modelo o patrón que se proyecta sobre el objeto puede ser unidimensional, en forma de una línea de luz que se mueve a lo largo de la zona a escanear y varía en función de la anchura de la línea. O puede ser un modelo bidimensional, en el que una rejilla de diferente paso de medida, es el que nos proporciona la comparación con la superficie del objeto.

Para realizar la comparación, se utiliza una cámara ligeramente desviada del proyector del modelo de luz, esta cámara “observa” el modelo y realiza una comparación por triangulación que da como resultado la distancia de cada punto.

Los escáneres de luz estructurada no tienen gran alcance ni campo de visión, pero sin embargo son los más rápidos de todos, ya que en vez de medir un punto de cada vez miden todos y cada uno de los puntos en una sola pasada, llegando a medir incluso movimientos en tiempo real.

11 Nivel de desviación de una nube de puntos respecto de una superficie real, provocado por el ángulo de inclinación, el tamaño de la huella del punto, la reflectividad, las condiciones atmosféricas, etc.

12 Son los planos de lo realmente ejecutado si el proyecto no se desarrolla en un entorno de trabajo BIM o los modelos de lo realmente ejecutado si se trata de un entorno BIM.



Figura 33. Escáneres de luz estructurada y ejemplo de patrón de luz. De izquierda a derecha: smartSCAN 3d HE de Breuckmann, Sidio Pro de nub3d y patrón de luz. Fuente: imágenes de Google

Clasificación por rango de medición

También podemos clasificar los escáneres por el rango de medición. Si bien el escáner utiliza un punto, que en realidad es la línea entre el escáner y el objeto para realizar la medición, es el movimiento de ese punto el que determina el rango.

Planos

Los escáneres planos se limitan a una ventana de unos grados determinados, permaneciendo la cabeza del escáner fija y moviendo el haz proyector dentro de esa ventana, ya sea con movimientos horizontales o verticales. Esta ventana determina una pirámide de proyección, con el vértice en el centro del aparato, dentro de la cual estarán los puntos de medición.

Ejemplos de escáneres de rango plano son, el Optech Ilris 3d o el Minolta Vivid 910.

Esféricos

Los escáneres esféricos, sin embargo, tienen un haz fijo, y rotan sobre dos ejes, de forma que el rayo de medición va completando una esfera en torno al aparato. La rotación de eje vertical la realiza el propio escáner sobre su base, mientras que la de eje horizontal se realiza por medio de un espejo que es el que orienta el rayo a su alrededor.

En la actualidad la mayoría de escáneres son de rango esférico, ejemplo de ellos tenemos el Faro Focus, el Leica RTC360 y BLK360 o el Trimble X7.



Figura 34. Escáneres de rango esférico. De izq. a dcha. Faro Focus S150, Leica RTC360 y Trimble X7. Fuente: imágenes de Google. [Consultado: 18/07/2021]

Estos escáneres esféricos, simplifican el trabajo, sobre todo en espacios interiores, donde ya no tendremos que realizar múltiples tomas solapadas entre sí, sino que con una única toma obtendremos todo el conjunto.

3.4.5. DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA DESDE VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

La aparición de los drones ha sido una de las herramientas que más ha destacado en los últimos años, ya que en el mundo de la fotogrametría ha permitido obtener información, o generar datos, como ortomosaicos aéreos, nubes de puntos, modelos de elevación o modelos digitales del terreno de modo rápido y sencillo que de forma terrestre era muy complicado obtener. Por ejemplo, en los campos de la arquitectura e ingeniería se ha convertido en una herramienta fundamental para la inspección de cubiertas, zonas elevadas de edificios, puentes, molinos eólicos, huertos solares, canteras.

Otro punto a tener en cuenta, es que en los UAV más profesionales nos permiten incorporar diferentes dispositivos de captura de datos, lo que amplía mucho su utilización en diferentes campos. El más conocido es la cámara que nos permitirá capturar fotografías o vídeo, pero también podemos equiparlo con un pequeño LIDAR para capturar nubes de puntos; cámaras multispectrales para utilizar en agricultura en estudios de humedad, maduración o plagas; sonómetros para hacer mediciones de ruido; sensores magnetométricos para hacer levantamientos geofísicos; luxómetros para hacer mediciones de contaminación lumínica; cámaras térmicas para estudios de rehabilitación o trabajos de extinción de incendios, búsqueda de animales o personas desaparecidas.

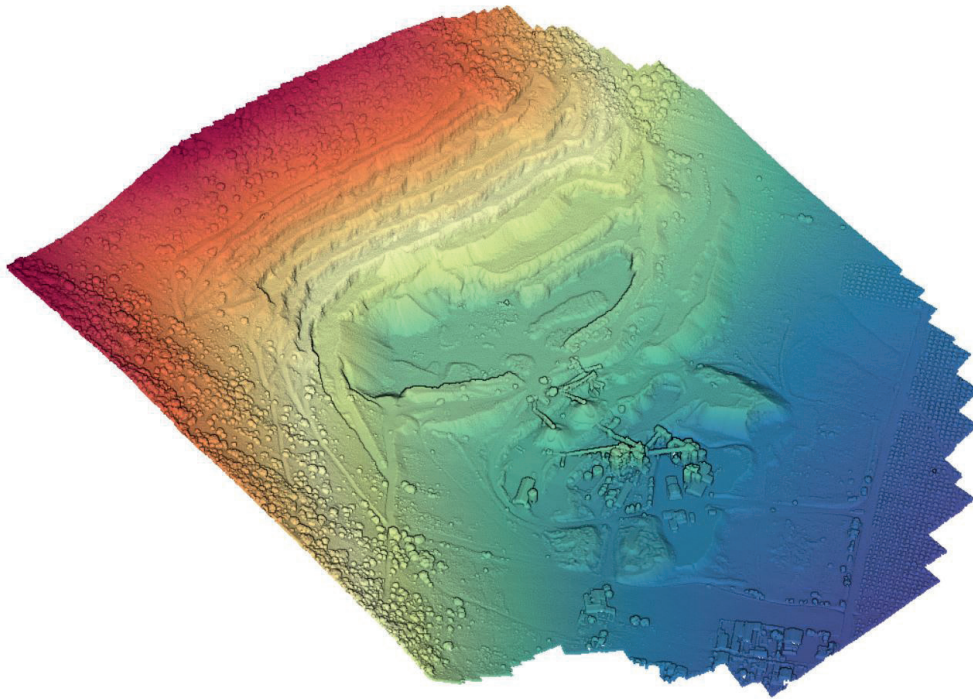


Figura 35. Modelo digital del terreno obtenido mediante fotogrametría aérea con dron. Fuente: ww.cartodesia.com [Consultado: 11/11/2020]

Comúnmente se les llama drones, pero el término oficial es vehículo aéreo no tripulado (VANT) o también conocidos como *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* o *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS)*. Pero este concepto no es nuevo, ya que en el siglo XVIII se utilizaron globos aerostáticos para realizar fotografías utilizadas en la cartografía de ciudades o la realización de espectaculares panoramas desde el aire.

Años más tarde, a partir de 1858 el francés Laussedat¹³, consiguió obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones de terreno a partir de la fotografía, siendo este el primer inicio de la fotogrametría, que en su día se conoció con el nombre de fotogrametría ordinaria, y que fundó los principios de la fotogrametría terrestre. Pero no fue hasta la Primera Guerra Mundial, cuando se sentaron las bases de la fotogrametría aérea. Fotografías tomadas desde los aviones, que permitían una exhaustiva cartografía, del terreno.

Con el paso del tiempo esta fotogrametría aérea se fue generalizando, pero su aplicación en el ámbito del levantamiento arquitectónico era limitada, ya que suelen realizarse desde vuelos a gran altitud y que no permiten una correcta visión de los edificios, además de que trabajan en un rango de escalas, que está fuera de los parámetros necesarios para un levantamiento arquitectónico.

¹³ En 1859 el coronel francés A. Laussedat utilizó la fotografía para la confección de planos topográficos, que ya en 1846 había empezado a emplear perspectivas dibujadas por medio de una cámara clara o cámara lúcida para el mismo propósito. En 1852 Laussedat comienza a trabajar para reemplazar la cámara clara por la cámara oscura hasta construir en 1859 un prototipo de lo que después sería un fototeodolito. El procedimiento empleado por Laussedat era lo que se conoce como fotogrametría de intersección. Lerma García, José Luis. *Fotogrametría Moderna: Analítica Y Digital*. p.33

Esto fue solucionado, mediante la inclusión de aparatos de vuelo más pequeños para la realización de las fotografías. El uso de pequeños zepelines, o cometas en los que la cámara, colgada generalmente de complicados sistemas giroscópicos, como los “picavent”, y sistemas de orientación remota, fueron los primeros intentos de realizar unas fotografías cercanas, con lo que en teoría el problema quedaba resuelto.

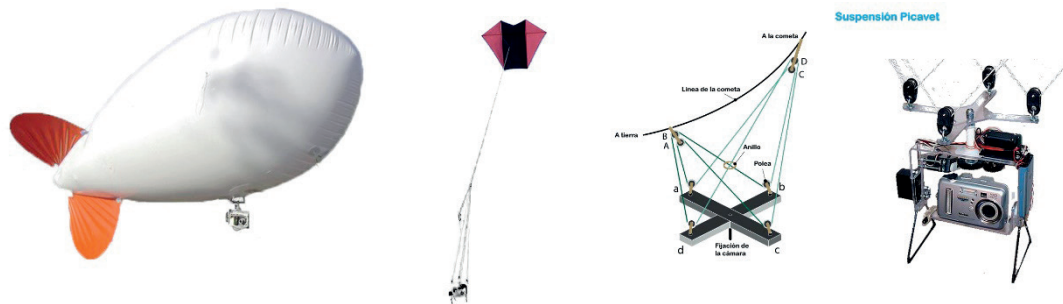


Figura 36. Zeppelin, cometa y sistema picavent. Fuente: imágenes Google

Sin embargo, aunque estos sistemas funcionaban correctamente, estaban limitados muchas veces por las condiciones climatológicas, y la correcta localización de la toma de las fotografías resultaba prácticamente imposible.

El siguiente paso fueron los sistemas de aerodelismo, cámaras fotográficas colocadas en aviones de radiocontrol, solucionaban parte del problema, aunque los verdaderos reyes de la geolocalización aérea eran los helicópteros. Pequeños modelos capaces de levantar una carga útil de hasta 5 kilogramos, y que podían mantener una posición aérea fija desde la que realizar las fotografías.



Avión EasyStar 2 Multiplex RC	Helicóptero Thunder Tiger Raptor RC
	
<p>Fuente: www.multiplex-rc.de [Consulta: 22/06/2021]</p>	<p>Fuente: www.thundertiger.com [Consulta: 21/06/2021]</p>

Figura 37. Aeronaves de radiocontrol

En este punto el sistema parecía resuelto, pero todavía nos haría falta un paso más de evolución ya que en este caso nos encontramos con tres importantes dificultades: primero la gran destreza necesaria para manejar el helicóptero; segundo, no somos capaces de minimizar hasta niveles aceptables las vibraciones provocadas por los rotores; y tercero, se hace necesario dos personas

para operar: una controlando el helicóptero y otra controlando la cámara.

La evolución de los motores eléctricos y las baterías ligeras de alta capacidad, dieron como resultado el vehículo ideal donde quedan resueltas las prohibiciones del ultraligero, los costes y movilidad del zeppelin, y las vibraciones, dificultad de manejo y la necesidad de un segundo operario, estamos hablando de los multicopteros, aparatos equipados con una serie de motores, distribuidos uniformemente en el perímetro de la carga central, donde van alojados todos los sistemas electrónicos, que nos permiten el manejo, localización y control del modelo desde tierra, incluso el vuelo autónomo del mismo desde rutas pre programadas.



Figura 38. Diferentes configuraciones de multicopteros. Fuente: www.mikrokopter.de [Consultado: 04/08/2018]

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV) es un verdadero compendio tecnológico equipado con giroscopios, estabilizadores, sistemas inerciales, GPS, controladores de altitud, etc. capaz de volar hasta cientos de metros de altitud, pero según la normativa vigente está limitado a un máximo de 120 metros, emitiendo solo 60 dB a 3 metros; y que nos va a permitir una vez elaborado un plan de vuelo, a partir bien de una herramienta software residente o bien mediante un programa básico de elaboración de proyecto de vuelo, volcar las coordenadas obtenidas para cada disparo de la cámara volando y disparando de una forma totalmente automáticamente sin la necesidad de la intervención de un operario.



Figura 39. Esquema de los componentes internos de un dron multirotor. Fuente: <https://guiadrones.com> [Consultado: 26/04/2020]

En cualquier caso, podemos elegir la modalidad de vuelo seleccionado dónde queremos en cada momento hacer las fotografías, para lo cual contamos con la ayuda de la estación base que realizará la labor de nuestro controlador de vuelo personal, controlando los parámetros del vuelo como la altitud, velocidad del vuelo, coordenadas GPS, precisión en el posicionamiento, autonomía y advirtiéndonos también del empeoramiento de condiciones de viento. Advertencias que, junto con los anteriores datos, nos las hace la estación base en audio en castellano mientras nosotros visualizamos en unas gafas de realidad virtual o en la pantalla conectada al mando de control todo lo que está viendo en tiempo real el dron, preocupándonos sólo de hacia dónde queremos realizar la fotografía.

Las principales ventajas de los RPAS en comparación con las soluciones tradicionales son:

- Pueden acercarse a áreas inaccesibles a pie o en automóvil.
- Son equipos menos costosos que un equipo tradicional de topografía.
- Realizan la toma de datos de forma más rápida. Con las tecnologías RTK (*Real Time Kinematic* o navegación cinética satelital en tiempo real) no es necesario colocar puntos de control terrestre GCP o *Ground control points*.

La clasificación de estos aparatos podemos realizarla según el tipo de alas, su sistema de control o su uso. Por su tipo de alas podemos clasificarlos en dos tipos, las aeronaves de ala fija que se corresponde con aquellos que tienen alas fijas como las de un avión, y los multirotor. Estos suelen tener brazos pares como son los cuadricópteros (cuatro rotores con hélices), los hexa-

cópteros (seis rotores con hélices) o los octocópteros (ocho rotores con hélices). Gracias a estas hélices pueden desplazarse por el aire. Un dato curioso está en el funcionamiento de estas hélices, ya que por ejemplo en un cuadricóptero dos de las hélices giran en sentido de las agujas del reloj mientras que las otras dos lo hacen en sentido contrario. De esta manera crean el empuje necesario para elevar el aparato y hacen que se desplacen de forma estable. Los aparatos multirrotor son los más recomendados para realizar fotografías o vídeo por su estabilidad y fluidez de movimiento. Las aeronaves de ala fija están más orientadas a la realización de cartografías ya que son capaces de cubrir mayores extensiones de terreno y suelen tener una autonomía de vuelo mayor.

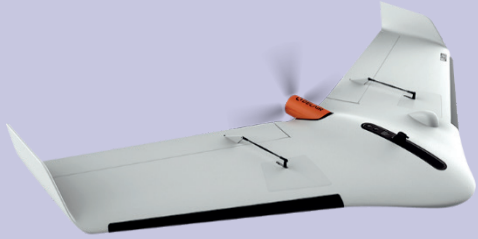

Ala fija: Delair UX-11	Multirrotor: DJI Matrice 300 RTK
	
Fuente: https://delair.aero [Consultado: 22/05/2020]	Fuente: www.dji.com [Consultado: 22/05/2020]

Figura 40. Imagen de dron de ala fija y dron multirrotor

La clasificación según el sistema de control se divide en dos grupos. El primero correspondería a los que tienen un sistema de control autónomo, es decir, no necesitan un piloto que los controle desde tierra, sino que se guían por medio del GPS y los sensores integrados en el dron. El aparato sigue un plan de vuelo definido con anterioridad a través de un software específico en el que se establece la ruta a seguir introduciendo una serie de puntos de control. Y el segundo grupo se corresponde con las aeronaves con un sistema de control remoto, es decir, que un piloto desde tierra controla la aeronave con un mando y va ejecutando las acciones de manera manual.

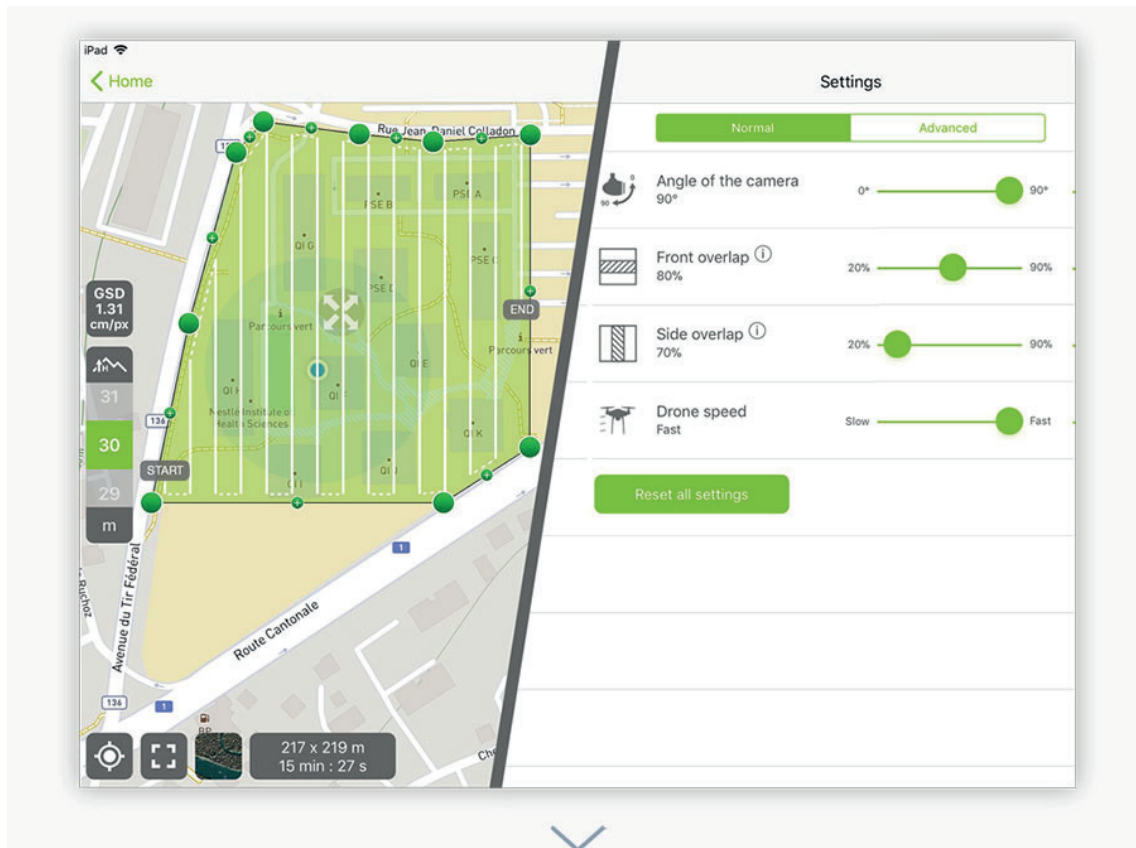


Figura 41. Pantalla de configuración del plan de vuelo desde la aplicación de Pix4D. Fuente: www.pix4d.com [Consultado: 18/02/2020]

Según su uso podemos clasificarlos en dos, por un lado las aeronaves destinadas a fines militares y por otro lado las destinadas a fines civiles.



Dron militar: Predator C Avenger	Dron civil: DJI Inspire 2
	
<p>Fuente: www.ga-asi.com [Consultado: 15/05/2021]</p>	<p>Fuente: www.dji.com [Consultado: 15/05/2021]</p>

Figura 42. Imagen de dron de uso militar y dron de uso civil

A nivel legal, en la Unión Europea hay dos grandes grupos de RPAS, por un lado, están los RPAS de peso superior a 150 kg que se rigen por la normativa de la *European Aviation Safety Agency* (EASA), y por otro lado están los de peso inferior a 150 kg los cuales están regulados por las autoridades de aviación civil de cada estado. En este rango de pesos tenemos aeronaves de hasta 2 kg, de 2 a 5 kg, de 5 a 25 kg, de 25 a 150 kg y más de 150 kg. En España, el 17 de octubre de

2014 se estableció una ley publicada en el BOE como Ley 18/2014 que establece la aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia de estos aparatos. Este reglamento examina los distintos escenarios en los que se podrán realizar los diferentes trabajos aéreos en función del peso de la aeronave e implanta las obligaciones que deben cumplir los pilotos y las empresas que las utilicen¹⁴.

Independientemente de su peso hay unos requisitos comunes tanto para los pilotos como para las empresas que las utilicen. Todas las aeronaves civiles pilotadas por control remoto deberán llevar en su estructura una placa de identificación en la que deberá constar de forma legible a simple vista, la identificación del aparato y su número de serie, así como el nombre de la empresa operadora y los datos necesarios para ponerse en contacto con la misma. Además, todas las empresas operadoras de aeronaves deben disponer de un manual de operaciones y de un estudio aeronáutico de seguridad para cada operación, la velocidad máxima del viento en el que puede volar, altura, etc. Deben adoptar las medidas adecuadas para garantizar la seguridad del vuelo y la protección de las personas y bienes subyacentes. Todos los pilotos de drones deberán acreditar que son titulares de cualquier licencia de piloto, incluyendo la de piloto de ultraligero, o demostrar de forma fidedigna que disponen de los conocimientos teóricos necesarios para obtenerla. Los vuelos realizados deberán documentarse, estando obligado el ejecutor a conservarlos a disposición de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea.¹⁵

En el caso de vuelos en el exterior, las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima sea inferior a 2 kg, siempre que cuenten con medios para poder conocer la posición de la aeronave, podrán volar en lugares no habitados y en espacio aéreo no controlado más allá del alcance visual del piloto, pero dentro del alcance de la emisión por radio de la estación de control y a una altura de elevación máxima de 400 pies o 120 metros. Las aeronaves que no excedan de 25 kg tienen las mismas restricciones que las inferiores a 2 kg, sin embargo, deben estar siempre dentro del alcance visual del piloto, a una distancia de este no mayor de 500 m. Además, estas aeronaves no necesitarán estar inscritas en el Registro de Matrícula de Aeronaves, y tampoco necesitarán el certificado de aeronavegabilidad de AESA, sin embargo, los propietarios sí necesitarán la licencia de piloto. Por último, las aeronaves civiles cuya masa máxima sí supere los 25 kg y no sea superior a 150 kg y aquéllas cuya masa sea igual o superior a 150 kg destinadas a la realización de actividades de lucha contra incendios o búsqueda y salvamento, sólo podrán operar en zonas de vuelo al aire libre con las condiciones y limitaciones establecidas en su certificado de aeronavegabilidad emitido por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, en espacio aéreo no controlado. El no respetar estos requisitos puede llevar al establecimiento de sanciones, éstas serían proporcionales a los riesgos que se hubieran afrontado.

14 Agencia Estatal de Seguridad Aérea. Nuevo marco regulatorio temporal para las operaciones con drones.

15 Gobierno de España. Boletín oficial del estado. Núm. 252. Sección 6.ª Aeronaves civiles pilotadas por control remoto. Sec. I. Pág. 83976

LIMITACIÓN SUBCATEGORÍA	REQUISITOS AERONAVES	REQUISITOS PILOTOS
A1 Se permite el sobrevuelo de personas ajenas a la operación	Construcción privada o previa a la norma de < 250 g y < 19 m/s	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante
	Clase C0 (< 250 g)	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante
	Clase C1 (< 900 g y < 80J con e-ID y Geo-awareness)	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante Completar un curso online Superar examen teórico online
A2 Se permite el vuelo cerca de personas ajenas a la operación Manteniendo una distancia de seguridad (30 - 5 metros)	Clase C2 (< 4 kg con low-speed, e-ID y Geo-awareness)	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante Poseer un certificado de competencia de piloto remoto , obtenido mediante formación y exámen online, autopráctica y exámen presencial
A3 Operaciones en áreas donde no se espera poner en peligro a personas ajenas a la operación Manteniéndose a < 150 metros de áreas residenciales, comerciales, industriales o recreacionales	Construcción privada o previa a la norma de < 25kg	Lo mismo que la clase C1 en A1
	Clase C2 (< 4 kg con e-ID y Geo-awareness)	
	Clase C3 (< 25 kg con e-ID y Geo-awareness)	
	Clase C4 (< 25 kg)	

Tabla 2. Nuevas categorías, requisitos de las aeronaves y de los pilotos según la nueva norma europea de vuelo con drones y el Reglamento de Ejecución 2019/947. Fuente: <https://www.oneair.es/nuevo-reglamento-europeo-drones> [Consultado: 20/04/2021]

Además, en caso de que causen daños a terceros existe incluso la posibilidad de sancionar por vía penal o civil.¹⁶

La regulación actual del uso de los drones está haciendo que cada poco tiempo aparezcan nuevas normativas y más estrictas establecidas por EASA que hacen que cada vez haya que cumplir más requisitos y solicitar permisos complejos que dificultan su utilización.

CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODO

Durante el periodo de formación e investigación he tenido la suerte de poder colaborar y formar parte del equipo del Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica, lo que me ha permitido probar y utilizar diferentes programas de fotogrametría y muchos tipos de escáner láser de las principales marcas comerciales: Optech Iris 3D, Minolta Vivid 910, brazo ROMER con escáner incorporado de Hexagon, Faro Photon 120, Faro Focus 3D, Faro Focus X, Leica C10, Leica RTC360, Leica BLK360, Leica BLK2GO o Trimble X7.

En este proceso de definición de la metodología de levantamiento tridimensional nos vamos a centrar principalmente en el uso del escáner láser Faro Focus 3D, en el software de registro de nubes de puntos Faro Scene y el software de fotogrametría Agisoft Metashape. Esta metodología es equivalente en el resto de sistemas, ya que todos tienen un funcionamiento muy similar.

Instrumentación

- Captura datos métricos (Disto Leica, Faro Focus 3D)
- Captura datos de color (dji Phantom 4, cámara Nikon D700, objetivo 14-24 mm, objetivo 35 mm, objetivo 50 mm, Olympus PEN E-PL5, objetivo 15mm, objetivo 24-42mm, objetivo 42-140mm, Olympus air, MIsphere360)
- Procesamiento (HP Z800 Workstation, DELL Precision T5500, Xiaomi Mi Gaming Laptop)
- Herramientas de difusión (Ender 3 PRO, Oculus Quest 2)

Software

- Registro y procesado de escaneos (Faro Scene, UvaCAD, Cloudcompare)
- Fotogrametría digital (Agisoft Metashape)
- Dibujo y Modelado 3D (AutoCAD, SketchUp, Blender)
- Tratamiento de fotografías (Lightroom, Photoshop, PTGui)
- Visitas virtuales (Kolor PanoTour)
- Visualización Realidad Virtual (Twinmotion, Unreal Engine)
- Visualización Realidad Aumentada (Reality Composer)

Elementos auxiliares (flexómetro, trípode, pértiga telescópica, rótula nodal, kit iluminación, tarjetas de balance de blancos y calibración de color, esferas, targets, tableta digital Wacom, Cintiq, iPad, smartphone)

En los siguientes gráficos únicamente se muestran las características y especificaciones de los instrumentos y software empleados en los diferentes casos de uso.

INSTRUMENTACIÓN

CAPTURA DATOS MÉTRICOS



DISTANCIÓMETRO LEICA D5

- Rango de medición de 0,05 m hasta 200 m precisión típica $\pm 1,0$ mm
- Visor digital de zoom de 4 aumentos y pantalla a color de alta resolución
- Power Range Technology
- Sensor de inclinación
- Medición de distancias horizontales usando el sensor de inclinación
- Función trapezoidal
- Función pitágoras
- Visualización de datos en pantalla



ESCÁNER LÁSER FARO FOCUS 3D

Unidad telemétrica

- Intervalo de ambigüedad: 153,49m
- Rango Focus3D S 120: 0,6 m - 120 m en interiores o al aire libre con baja luz ambiental e incidencia normal en superficies reflectantes de un 90 %
- Rango Focus3D S 20: 0,6m - 20m > 10 % de la superficie mate reflectante con incidencia normal
- Velocidad de medición: 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000 (puntos/seg)
- Error sistemático de distancia: ± 2 mm en 25 m, reflectividad a 90 % y 10%

Unidad de color

- Resolución: hasta 70 megapíxeles en color
- Función de color dinámico: adaptación automática del brillo

Unidad reflectora

- Campo de visión (vertical/ horizontal): 300° / 360°
- Resolución (vertical/horizontal): 0,009° (40.960 3D pixel en 360°) / 0,009° (40.960 3D pixel en 360°)
- Velocidad max. de escaneo vertical: 5.820rpm o 97Hz

Láser (emisor óptico)

- Potencia láser (CW): 20mW (clase de láser 3R)
- Longitud de onda: 905nm
- Divergencia del haz: 0,19mrad (0,011°)
- Diámetro del haz (al salir): 3,0mm, circular

PROCESADO DATOS



HP Z800 WORKSTATION

Sistema operativo Windows 10 Professional 64 bits

Procesador 2 Intel® Xeon® Six-Core Processor X5650 (2.67 GHz, 12 MB cache, 1333 MHz memory)

Memoria RAM 24 GB 1333 MHz DDR3 ECC

Tarjeta gráfica NVIDIA Quadro 1800 FX



DELL OPTIPLEX 580

Sistema operativo Windows 10 Professional 64 bits

Procesador Intel® Core™ i7-870 Processor (2.93 GHz, 8M Cache, 2.93 GHz 1333 MHz memory)

Memoria RAM 16 GB 1333 MHz DDR3 ECC

Tarjeta gráfica NVIDIA Quadro 1800 FX



XIAOMI GAMING LAPTOP

Sistema operativo Windows 10 Professional 64 bits

Procesador Intel® Core™ i7-9750 Processor 2.6 GHz

Memoria RAM 16 GB DDR4

Tarjeta gráfica NVIDIA Geforce GTX 1660

FOTOGRAFÍA

NIKON SLR D700



- Sensor CMOS en formato FX (formato completo) de 12,1.
- ISO 200 – 6.400: permite alcanzar hasta 25.600 (equivalente) y descender hasta ISO 100 (equivalente).
- Disparo continuo a 5 fps.
- Sistema de procesamiento de imágenes EXPEED con conversión A/D de 14 bits y procesamiento de imágenes a 16 bits que consiguen un nivel de detalle y gradación tonal excepcionales.
- Sistema AF de 51 puntos Multi-CAM3500FX. Se puede seleccionar individualmente o configurar en ajustes de cobertura de 9, 21 y 51 puntos.
- Pantalla LCD VGA de 3 pulgadas y 920.000 puntos con amplio ángulo de visión de 170 grados

OLYMPUS E-PL5



- Sensor Live MOS de alta velocidad de 12,3 MP con amplio rango dinámico.
- ISO 200 - 12800 (ajustable, por defecto ISO 200 - 1600).
- Disparo continuo a 5 fps.
- Estándar Micro Cuatro Tercios extremadamente compacto y ligero.
- AF por contraste de muy alta velocidad.
- Fotografía sin manchas con el sistema más efectivo de reducción del polvo (el Filtro de Ondas Supersónicas).
- LCD en color de 3" y 460.000 puntos que permite encuadrar y revisar las fotos de manera muy cómoda.

NIKKOR AF-S 50MM F/1.8G (NIKON)



- Distancia focal 50 mm
- Diafragma máx. f/1,8
- Diafragma mín. f/16
- Ángulo de imagen 47°00' (31°30 en formato DX de Nikon)
- Distancia mínima de enfoque 0,45 m
- Sistema de enfoque Autofoco con SWM integrado y enfoque manual

NIKKOR AF-S 14-24MM F/2.8G (NIKON)



- Distancia focal 14-24 mm
- Diafragma máximo f/2,8
- Diafragma mínimo f/22
- Ángulo de imagen 114° - 84° (90° - 61° en formato DX de Nikon)
- Distancia mínima de enfoque 0,28 m
- Enfoque Enfoque automático con SWM integrado y enfoque manual

MI SPHERE CAMERA



- Procesador de imágenes: Ambarella A12
- Sensor de imagen: Sony IMX 206
- Tamaño CMOS: 1/2.3
- FOV: 2x190°
- Apertura: F2.0
- Longitud focal: 1.43

TRÍPODE 055XPROB PRO + RÓTULA NODAL NINJA



- Estos accesorios de fotografía fueron utilizados para realizar las fotografías panorámicas esféricas que se usaron para el coloreado de las nubes de puntos y la integración en la visita virtual.

Tabla 14. Equipos e instrumentos utilizados en la investigación. Fuente: elaboración propia

SOFTWARE

PROCESADO DATOS ESCÁNER



FARO SCENE V. 6.1

Está especialmente diseñado para todos los escáneres láser de FARO. SCENE procesa y administra datos de escaneo de forma sencilla y eficiente, empleando el reconocimiento automático de objetos, registro de escaneos y posicionamiento. SCENE puede colorear escaneos.

Este software es extremadamente fácil de usar y genera datos de alta calidad en cuestión de segundos.



UVACAD

UVACAD (Utilidad de Visualización Avanzada Con Automatización del Dibujo) es un programa desarrollado a raíz del proyecto MAPA (Modelos y Algoritmos para el Patrimonio Arquitectónico) por el grupo de investigación DAVAP (Digitalización, Análisis y Visualización Avanzada del Patrimonio) y el LFA (Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica) pertenecientes a la Universidad de Valladolid. Está diseñado para la gestión de nubes de puntos obtenidas desde dispositivos de escaner láser tridimensional.

FOTOGRAMETRÍA DIGITAL



AGISOFT METASHAPE

Software para la reconstrucción 3D a partir de múltiples vistas capaz de producir de forma automática modelos tridimensionales de gran calidad geométrica y visual.

Los resultados obtenidos mediante fotogrametría pueden ser: nubes de puntos, modelos de mallas y texturas para mapeado.

DIBUJO Y MODELADO 3D



AUTOCAD 2020

Autodesk AutoCAD es un programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones.

Ha sido utilizado para la elaboración de las planimetrías de la iglesia.



TRIMBLE SKETCHUP

Programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones, que integra herramientas de modelado, animación y renderización 3D.

Ha sido utilizado para la renderización de las animaciones de la malla obtenida por fotogrametría.



BLENDER

Programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones, que integra herramientas de modelado, animación y renderización 3D.

Ha sido utilizado para la renderización de las animaciones de la malla obtenida por fotogrametría.

TRATAMIENTO DE IMÁGENES	
	<p>ADOBE LIGHTROOM</p> <p>Programa diseñado para ayudar a fotógrafos profesionales en el tratamiento de imágenes digitales y trabajos de post-producción.</p> <p>Pero sobre todo está orientado para realizar el revelado digital de las fotografías capturadas en formato RAW.</p>
	<p>PTGUI</p> <p>Programa desarrollada para la generación de fotografías panorámicas, normales y esféricas, mediante la unión de múltiples imágenes.</p> <p>También permite crear imágenes de alto rango dinámico (HDR).</p>
	<p>ADOBE PHOTOSHOP</p> <p>Programa diseñado para ayudar a fotógrafos profesionales en el tratamiento de imágenes digitales y trabajos de post-producción.</p>
VISITA VIRTUAL	
	<p>KOLOR PANOTOUR</p> <p>Es un programa especialmente desarrollado para diseñar e implementar entornos panorámicos en Flash o html.</p> <p>Tourweaver crea visitas virtuales con componentes tales como la ventana emergente, activa plan de punto, Radar y enlace URL.</p>
REALIDAD VIRTUAL	
	<p>UNREAL ENGINE</p> <p>Es un motor de renderizado 3D en tiempo real, creado para el desarrollo de videojuegos.</p> <p>Además de su uso para crear juegos, Unreal permite una vista guiada que permite usarse también para diseños arquitectónicos y animaciones 3D.</p>
	<p>TWINMOTION</p> <p>Es un motor de renderizado 3D en tiempo real, creado para visualizar proyectos arquitectónicos.</p> <p>Pertenece a la empresa Epic Games y funciona bajo el motor de renderizado en tiempo real Unreal Engine.</p>

Tabla 15. Programas utilizados en la investigación. Fuente: elaboración propia

1. PLANIFICACIÓN PREVIA

Una de los aspectos más importantes antes de afrontar un proyecto de levantamiento arquitectónico, tanto de forma tradicional como de forma tecnológica, es realizar una planificación previa del trabajo. Para lo que se tendrá que plantear dos preguntas, ¿qué documentación solicitan en la entrega del trabajo de levantamiento? y ¿qué datos se necesitará tomar para conseguir llegar a esos resultados? Ya que, dependiendo del resultado a obtener, la forma de afrontar un trabajo puede tener varias alternativas a la hora de hacer la captura de datos.

Por ejemplo, para generar unos ortoalzados con calidad fotográfica es mucho más recomendable obtenerlos a partir de un modelo 3d generado mediante fotogrametría que desde una nube de puntos generada con escáner láser. Ya que la primera opción va a tener una definición mucho mayor. Sin embargo, si lo que se pide es obtener el perfil de una planta o el desplome de un muro, siempre va a ser mucho mejor y preciso realizar un modelo de nube de puntos con escáner láser.

Una vez que se ha decidido las herramientas a utilizar durante la toma de datos, el siguiente paso es estudiar el objeto que se quiere documentar para poder detectar los problemas que puedan surgir durante la toma de datos y para establecer un plan de trabajo lo más optimizado posible, intentando conseguir una jornada de trabajo lo más organizada y aprovechada posible.

Por ejemplo, para la documentación del exterior e interior de una iglesia, se estudiarán las ubicaciones más óptimas para establecer los puntos de escaneo hasta conseguir cubrir la totalidad del edificio y conseguir una conexión fiable de todos esos estacionamientos. Esto nos va a permitir detectar posibles problemas que puedan surgir a la hora de la captura de datos o la necesidad de utilizar dianas o targets para realizar el registro o alineación de los escaneos, y así prever una posible solución para solventar esas situaciones.

2. TOMA DE DATOS

La toma de datos a partir de las técnicas o modos que se han descrito en el apartado anterior se pueden plantear de tres formas:

1. Documentación con escáner láser. Se obtendrá un modelo con precisión geométrica, pero de poca calidad de color, ya que las cámaras que incorporan los escáneres tienen poca resolución y los sensores de las cámaras son muy pequeños, por lo que la definición es baja. Además, no existe un control completo en los parámetros de captura de color ya que en la mayoría de los casos los valores se establecen de forma automática.
2. Documentación con fotogrametría. Se obtiene un modelo con calidad de color y una buena geometría. Para que tenga una gran precisión es necesario realizar las fotografías con mucho detalle. Por ejemplo, no es lo mismo realizar las fotografías a una distancia de cinco metros del objeto que a menos de un metro.
3. Documentación híbrida: escáner láser + fotogrametría. En este caso se utilizarán los datos del escáner láser para la geometría y la fotogrametría para la textura o color. Para poder combinar ambos será necesario marcar unos puntos de registro comunes en los dos modelos.

En el momento de la toma de datos cuando se aparece por primera vez delante del objeto de estudio no se puede empezar directamente a recopilar datos, previamente a ese paso se tendrá que realizar una inspección visual para poder establecer una idea estimada de la forma del objeto, sus dimensiones, estimar la necesidad o no de dianas de control y su posición, saber si son necesarios elementos auxiliares que permitan acceder a determinados espacios e ir planificando cómo afrontar el trabajo.

En esa inspección visual es también muy importante ir tomando notas de aspectos o detalles que se consideremos importantes, incluso hacer dibujos o croquis de detalles o esquemas para indicar las posiciones de escaneo que vayamos realizando durante la toma de datos.

El croquis es una de las herramientas utilizada en el método tradicional de levantamiento y ahora con el uso de herramientas modernas también es importante utilizarla como herramienta complementaria, pero como instrumento para entender y conocer el edificio. Con el escáner láser se capturan datos de forma masiva sin descartar nada, mientras que con el croquis se dibuja el dato que se está viendo e interesa estudiar. Hacer un croquis nos obliga a razonar y pensar sobre todos los aspectos considerados antes de dibujarlos.

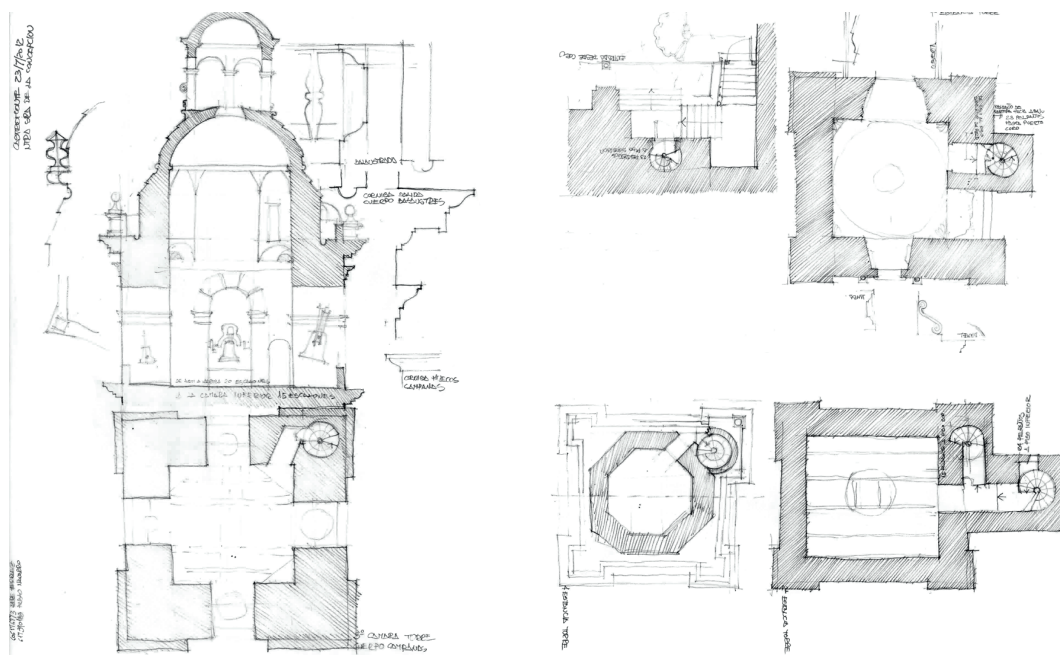


Figura 43. Croquis de trabajo

2.1. Escáner láser

El enunciado de la metodología se inicia con el trabajo de un aparato Faro Focus 3D dada su precisión y rapidez en la toma de datos. Se trata de un equipo de rango esférico que se basa en la medición por diferencia de fase.

Como se comentó anteriormente un escáner láser es un dispositivo que, de forma sencilla y rápida, permite hacer una recopilación de datos masiva mediante un haz láser. El escáner emite millones de impulsos láser por segundo sobre un espejo giratorio con rotación vertical y estos

son desviados realizando un barrido alrededor del entorno de la posición del escaneo. De forma simultánea el escáner realiza una rotación horizontal sobre su propio eje para recoger la información de todo el entorno. Todos esos rayos dispersados impactan sobre los objetos circundantes y son devueltos de nuevo al sensor del escáner. El resultado de cada estacionamiento es una nube de puntos densa en la que cada punto está definido con unas coordenadas de posición XYZ, coordenadas de color RGB y coordenadas de reflectancia.

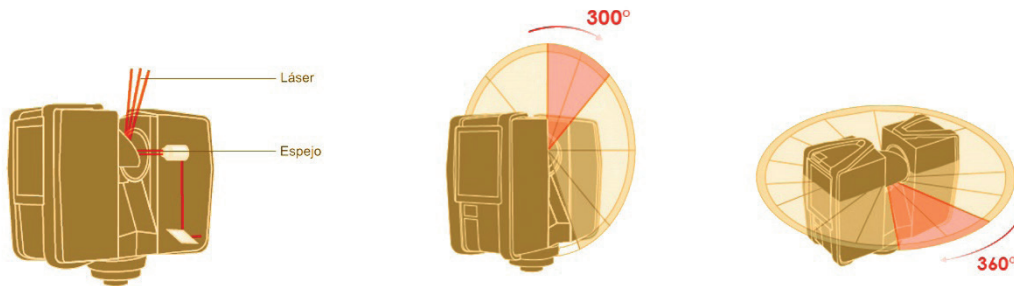


Figura 44. Funcionamiento del escáner láser. De izquierda a derecha esquemas de desviación del láser, rotación vertical del espejo y rotación horizontal del escáner. Fuente: <https://es-knowledge.faro.com> [Consulta: 16/05/2017]

Las principales características de este escáner son:

- Alta precisión en los datos recopilados
- Gran resolución
- Alta velocidad en la toma de datos
- Gran movilidad por su tamaño reducido, peso liviano y batería de carga rápida ubicada en el interior del aparato. Todo el equipo necesario se lleva dentro de un maletín de formato pequeño
- Sencillez de uso y control intuitivo gracias a la pantalla táctil que incorpora
- Compensador de doble eje integrado para nivelar automáticamente los datos de escaneo capturados
- Brújula y altímetro incorporados que dar información de orientación y altura a los escaneos
- Escaneos 3D con color fotorrealista gracias a la cámara que incorpora



Figura 45. Contenido del equipo básico del escáner láser Faro. Fuente: elaboración propia

El escáner láser Faro Focus 3D emite un haz láser invisible con una longitud de onda de 905 nm. La potencia máxima promedio del láser es 20 mW y la divergencia del haz típicamente es 0.19 mrad (0.011°). De acuerdo con el estándar IEC 60825-1:2007, Ed. 2.0, el escáner láser Faro Focus 3D está clasificado como un sistema láser Clase 3R. De acuerdo con este estándar, la visión directa del intra-haz puede ser perjudicial para los ojos cuando se trabaja dentro de un área alrededor del sistema láser Clase 3R donde se exceden los límites de exposición definidos.

Sin embargo, el exceso de los límites de exposición no necesariamente significa que exista un riesgo real de lesión. Un análisis que compara los niveles de exposición del ojo que se pueden producir con el FARO Laser Scanner Focus3D ha llegado a la conclusión de que la exposición del ojo en condiciones normales, y también en condiciones razonablemente previsibles en el peor de los casos, no debe inducir lesión ocular. Así, desde el punto de vista biofísico, el FARO Laser Scanner Focus3D puede ser considerado seguro para los ojos y no sería necesario utilizar protección ocular.¹⁷

Según la normativa de seguridad en el trabajo podría ser necesario utilizar protección ocular cuando se excedan los límites de exposición definidos. Para que el usuario pueda identificar el área de riesgo del láser (NOHA - *Nominal Ocular Hazard Area*), cuando realizamos la configuración del escaneo el propio software nos indica la distancia de seguridad a mantener desde el foco del scanner. Podemos diferenciar dos tipos de distancia nominal de riesgo ocular, el NOHD axial y el NOHD radial. Estas dos distancias van a depender de la resolución y la calidad que marquemos en la configuración del escaneo. El área NOHA resultante alrededor del escáner se puede definir como un cilindro a lo largo del eje de rotación Z del escáner, donde la distancia NOHD radial es equivalente al radio del cilindro y la distancia NOHD axial es equivalente a la línea central proveniente del centro del espejo del escáner.¹⁸



Figura 46. Cilindro virtual que define el área de riesgo ocular nominal (NOHA). Fuente: <https://es-knowledge.faro.com> [Consulta: 16/05/2017]

17 Manual de usuario escáner láser FARO Focus3D. <https://downloads.faro.com/index.php/s/a4gLmD4Lr3Jt4jB>

18 Manual de usuario escáner láser FARO Focus3D. <https://downloads.faro.com/index.php/s/a4gLmD4Lr3Jt4jB>

El flujo de trabajo de la toma de datos con escáner láser es sencillo, ya que no son muchos los pasos que hay que realizar, pero estos hay que plantearlos de forma correcta para que no surjan problemas durante el proceso de registro. Este flujo se puede resumir en el siguiente esquema.

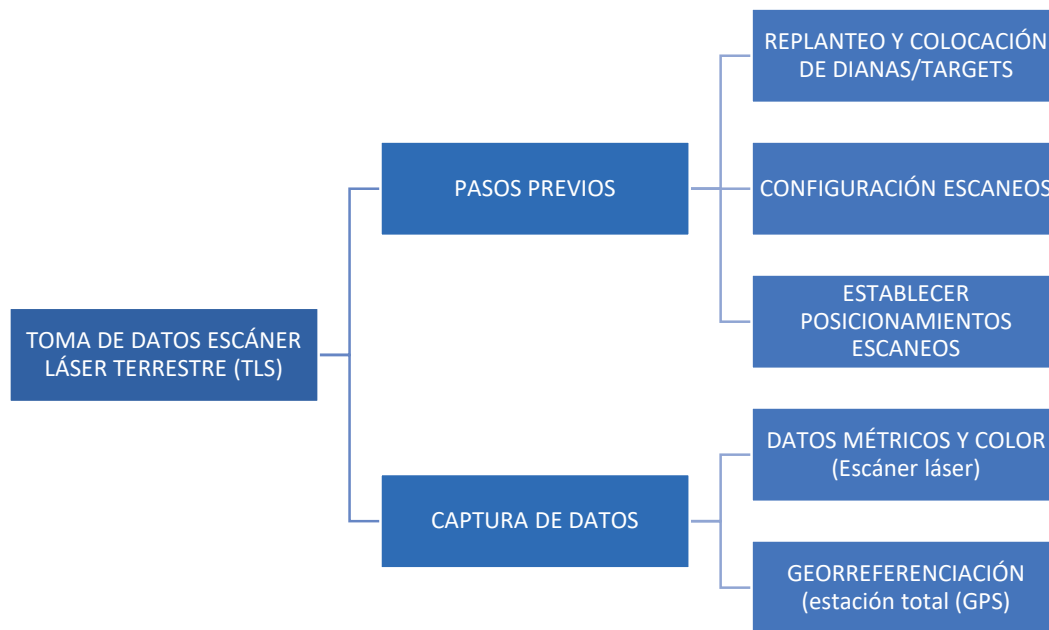


Figura 47. Esquema de flujo de trabajo de la toma de datos con escáner láser. Fuente: elaboración propia

2.1.1. REPLANTEO DE DIANAS, TARGETS O PUNTOS DE REFERENCIA

Lo más importante antes de empezar a escanear es, en caso de ser necesario, colocar dianas o targets que nos ayudarán en el proceso de registro o alineado de las nubes de puntos entre sí. Existen dos tipos de dianas, unas que son volumétricas y otras que son planas, estas últimas pueden ser circulares o cuadradas.

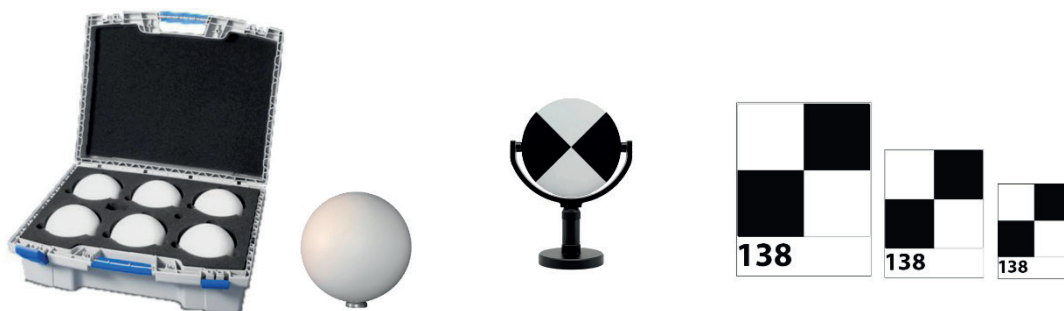


Figura 48. Tipos de dianas para usar con escáner láser. De izquierda a derecha: esferas con base magnética; dianas gítorias en los dos ejes; y dianas adhesivas en varios formatos. Fuente: elaboración propia

Las dianas volumétricas son esferas de plástico de un diámetro de 145 mm recubiertas en su exterior de una pintura especial de color blanco mate. En su base tiene una rosca de $\frac{1}{4}$ lo que nos permitirá fijarlas a trípodes de fotografía o bases especiales magnéticas. Se utilizan esferas

porque es la mejor geometría para medir un punto de referencia, ya que medida desde cualquier punto de vista el centro siempre va a estar en la misma posición. La resolución de escaneo afecta a la detección de las referencias que pueden ser poco confiables cuando superan cierta distancia del escáner. Por ejemplo, al escanear con una resolución de $\frac{1}{4}$ y usar esferas de un diámetro de 145 mm, la distancia al escáner no debe superar los 18 metros.

Las dianas planas pueden ser de plástico o papel y con unas dimensiones que dependerán de la distancia que las coloquemos en relación a las posiciones de escaneado. Los tamaños más utilizados son el A6 (105 x 148 mm), A5 (148 x 210 mm) y A4 (210 x 297 mm) pero también pueden ser más grandes.

Hay dos cosas muy importantes a tener en cuenta cuando vayamos a utilizar dianas o targets en la toma de datos:

1. Para que el registro de las nubes de puntos entre sí no dé problemas, es recomendable que en cada posición de escaneo se vea un mínimo de tres dianas. Cuanto mayor sea el número de dianas que salgan en cada escaneo la alineación será más precisa.
2. Es fundamental que los targets o dianas mantengan su posición exacta entre posiciones de escaneado, ya que si se mueven ya no podrán ser utilizadas en el registro de las nubes de puntos porque introducirán errores en el proceso de cálculo.

El replanteo y colocación de dianas, sobre todo en trabajo de grandes dimensiones, supone una inversión importante de tiempo del que a veces no se dispone por limitaciones propias del trabajo. Por eso cuando se realicen trabajos con una geometría bien definida y bastante heterogénea se podrá descartar el uso de dianas y utilizar la propia geometría del objeto como puntos de referencia para el alineamiento entre escaneos. Sin embargo, las dianas son necesarias y obligatorias cuando se realicen trabajos con objetos que tengan una geometría muy repetitiva en la que, de forma manual o automática, sea difícil detectar puntos característicos. O también cuando sea necesario georreferenciar la nube de puntos a un sistema de coordenadas global. Ejemplos de geometrías muy homogéneas en donde será necesario usar dianas: la toma de datos del interior de un túnel o la documentación de la masa forestal de un bosque. En el caso del escaneado de un bosque o masa forestal, a mayores del problema de que la geometría es muy homogénea y que hace obligatoriamente necesario el uso de las esferas como referencias artificiales (las dianas tipo ajedrez no se pueden utilizar ya que las únicas superficies que podemos utilizar en estos espacios para colocarlas son los troncos de los árboles que tienen superficie curva), también tenemos el problema de que en las zonas bajas suele existir vegetación frondosa, lo que dificulta distribuir por el suelo las esferas y que sean completamente visibles por el escáner láser. Para evitar este problema, será necesario elevar la posición de las esferas respecto al suelo. Una opción es utilizar estacas de madera de 120-150 cm de alto que nos permitan elevarlas del suelo.



Figura 49. Ejemplo de colocación de referencias artificiales elevadas del suelo debido a las características físicas del caso de estudio. Fuente: elaboración propia

2.1.2. CONFIGURACIÓN ESCANEO

El siguiente paso una vez posicionado y encendido el aparato, es configurar los parámetros de escaneo desde el software interno del escáner.

PASO 1. CONFIGURAR PROYECTO

El primer paso es configurar la información del proyecto en donde se guardarán todos los escaneos que realicemos. Para ello desde la pantalla de inicio se pulsará el botón de **Administrar**. Dentro del menú se va a la opción de **Proyectos**. En ese apartado podremos crear un nuevo proyecto o editar un proyecto existente. Para agregar un proyecto pulsamos sobre el botón de **Agregar** ubicado en la parte superior del listado de proyectos y que está representado por un símbolo de +.



Figura 50. Pantallas de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D

Accedemos a un nuevo menú donde podremos rellenar una serie de campos de información como son: el **Nombre del Proyecto**; en **Proyecto Principal** podemos indicar si el proyecto actual es el proyecto principal o un subproyecto; en **Cliente** podemos marcar el nombre de la empresa para la que realizamos el proyecto de escaneado; en **Nombre base del archivo** indicamos el nombre con el que se guardarán cada uno de los escaneos seguidos del número de escaneo; en **Nº de escaneo inicial** indicamos desde que número se inicia la numeración de los escaneos y que

umentara de forma automática y de forma consecutiva con cada escaneo; en **Latitud** podemos añadir la posición de forma aproximada del proyecto de escaneo. Esta información ayuda a mejorar la calibración del sensor de inclinación y genera datos de inclinación más precisos y, por consiguiente, mejores resultados de registro del escaneo.



Figura 51. Pantallas de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D

PASO 2. CONFIGURAR PERFIL DE ESCANEO

Una vez que ya tenemos creado el proyecto donde vamos a trabajar el siguiente paso será configurar el perfil de escaneo. Para ello accedemos al menú de **Administrar** y entramos en la opción **Perfiles**. Por defecto el escáner ya trae seis perfiles de escaneo preconfigurados. Podemos utilizar directamente uno de estos perfiles o modificarlo según nuestras necesidades.

	INTERIOR HASTA 10 m	INTERIOR A PARTIR DE 10 m	EXTERIOR HASTA 20 m	EXTERIOR A PARTIR DE 20 m	PRESENTACIÓN PRELIMINAR	HD DE OB- JETO
<i>Descripción</i>	Haga escaneos en interiores donde las distancias del escáner a los objetos de interés principales son inferiores a 10 m	Haga escaneos en interiores donde las distancias del escáner a los objetos de interés principales son superiores a 10 m	Haga escaneos en exteriores donde las distancias del escáner a los objetos de interés principales son inferiores a 20 m	Haga escaneos en exteriores donde las distancias del escáner a los objetos de interés principales son superiores a 20 m	Capture un escaneo preliminar rápido y aproximado del entorno en baja resolución	Escanee objetos o áreas en resolución muy alta. Se recomienda que limite el área de escaneo al objeto o área de interés; de otro modo, el escaneo podría llevar mucho tiempo en hacerse
<i>Resolución</i>	1/8	1/5	1/5	1/4	1/16	1/2
<i>Calidad</i>	3x	4x	4x	4x	4x	6x
<i>Área vertical</i>	-60º -90º	-60º -90º	-60º -90º	-60º -90º	-60º -90º	-60º -90º
<i>Área horizontal</i>	0º - 360º	0º - 360º	0º - 360º	0º - 360º	0º - 360º	0º - 360º

Clinómetro	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Brújula	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Altímetro	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Color	ON	ON	ON	ON	OFF	ON
Modo de medición de exposición	Medición ponderada al horizonte	Medición ponderada al horizonte	Medición ponderada al horizonte	Medición ponderada al horizonte	Medición ponderada al centro	Medición ponderada al horizonte
Clear Contour	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Clear Sky	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Distancia de puntos(mm/10m)	12.272	7.670	7.670	6.136	24.544	3.068
NOHD (axial /radial)(m)	4.50 / 1.40	10.60 / 3.30	10.60 / 3.30	12.50 / 4.20	4.50 / 0.90	29.40 / 16.20
Los siguientes valores son referencias para escaneos de áreas completas (360° posición horizontal/300° posición vertical):						
Resolución (MPts)	11	28.2	28.2	44	2.8	176.0
Duración del escaneo (hh:mm:ss)	00:02:57	00:06:38	00:06:38	00:09:12	00:00:57	01:56:00
Tamaño del archivo de escaneo (mb)	68.90	122.08	122.08	171.18	8.53	2216.66
Tamaño del escaneo (Px)	5156 x 2134	8248 x 3414	8248 x 3414	10310 x 4268	2578 x 1067	20622 x 8534

Tabla 3. Tabla de perfiles de escaneo predefinidos que vienen por defecto dentro del menú de FARO Focus 3D. Fuente: <https://es-knowledge.faro.com> [Consultado: 16/05/2017]

Estos perfiles vienen determinados por los siguientes parámetros los cuales podremos modificar para ajustar el escaneo a nuestras necesidades de trabajo.

Perfil seleccionado: Muestra el nombre del perfil de escaneo seleccionado. Si los parámetros de escaneo son diferentes del perfil seleccionado, se agregará la palabra modificado al nombre.



Figura 52. Pantalla de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D

Resolución y calidad: Muestra la resolución en megapuntos o millones de puntos y la calidad del escaneo resultante. Cuando se habla de resolución de un escaneo hace referencia a la densidad de la nube de puntos que va a generar el escáner. Esto tienen que ver con cuánto están separados los puntos entre sí en términos de ángulo. En la resolución podemos elegir entre 1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/16, 1/20 y 1/32. Si se mueve el deslizador hacia arriba aumentaremos la resolución o densidad de la nube de puntos, mientras que si movemos el deslizador hacia abajo la resolución o densidad se reducirá.

La calidad hace referencia a cuántas revoluciones toma por cada línea de ángulo horizontal. El deslizador de calidad afecta la calidad del escaneo y el tiempo del escaneo. Si mueve el deslizador hacia arriba se reducirá el ruido de los datos de escaneo y aumentará la calidad del escaneo, lo que provocará un mayor tiempo de escaneo. Si mueve el deslizador hacia abajo, reducirá el tiempo de escaneo y aumentará la eficacia del proyecto de escaneo. El deslizador de calidad establece los niveles de calidad, ya sea por medio de diversas frecuencias de medición, o mediante la aplicación de compresión de ruido adicional. Cuando se hagan escaneos de materiales muy reflectivos es aconsejable aumentar la calidad para poder reducir el ruido producido por la superficie del material.

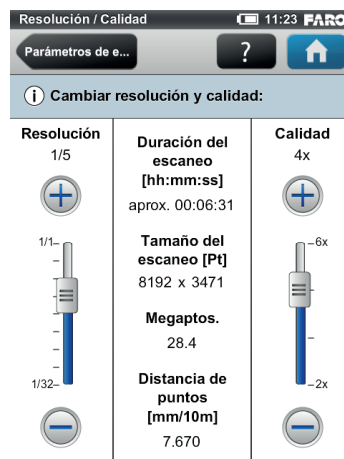


Figura 53. Pantalla de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D

Dependiendo de los valores que seleccionemos en los deslizadores de resolución y calidad, en la zona central de la ventana se irán actualizando los parámetros del escaneo final:

- Duración aproximada del escaneo representado en formato (hh:mm:ss)
- Tamaño del escaneo (Pt). Equivale también a píxeles (px), ya que en vista planar el escaneo se representa como una imagen plana o equirectangular al igual que la fotografía capturada por la cámara interna.
- Megapuntos, es el tamaño en millones de puntos del escaneo.
- Distancia de puntos (mm/10m). Indica la distancia de separación entre puntos capturados, representada en mm a una distancia de 10 m desde el centro del espejo del escáner.

Rango de escaneo horizontal y vertical: Muestra el rango de medición del escaneo con el ángulo horizontal y el ángulo vertical reflejado en grados. Dentro de este menú podemos determinar ese rango de valores con unos deslizadores de forma visual a través de una ventana gráfica de color amarillo que indica el área vertical y horizontal de escaneo.



Figura 54. Pantallas de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D

Esa ventana gráfica mostrará una vista previa del último escaneo realizado, y en el caso de que no haya ninguno mostrará una rejilla donde la separación entre líneas horizontales y verticales equivale a 30°.

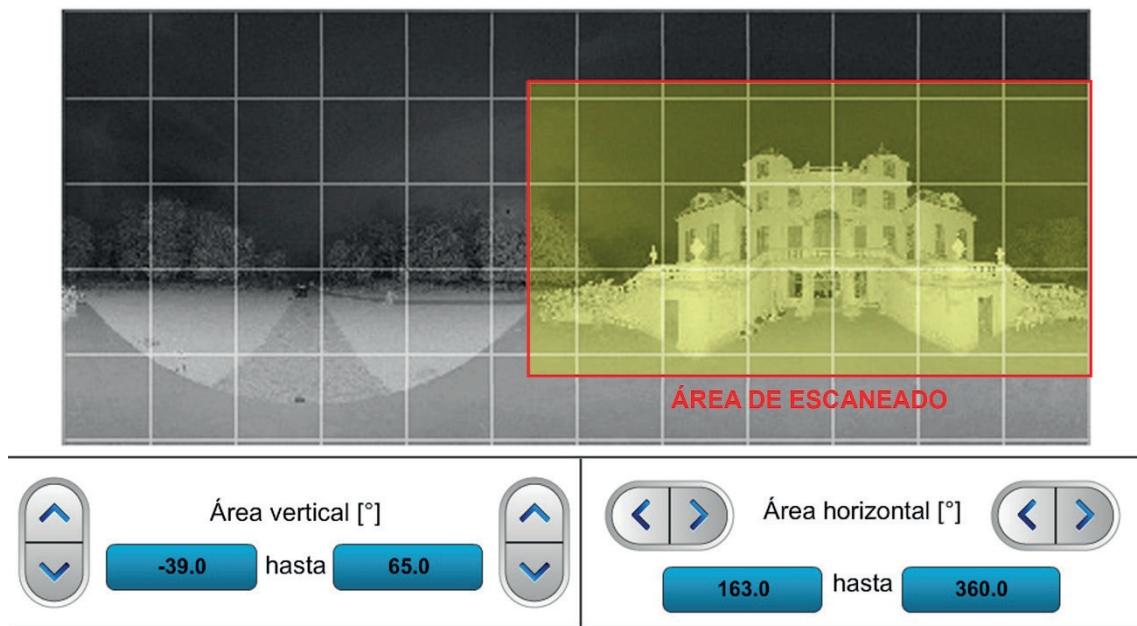


Figura 55. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D

Seleccionar sensores: Abre la pantalla para activar o desactivar el uso automático de los datos de los sensores incorporados para el registro de escaneos en SCENE. Estos sensores son el clinómetro, la brújula y el altímetro.

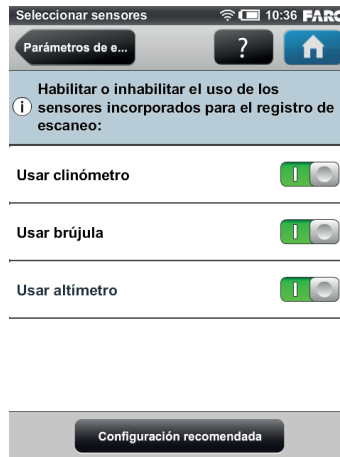


Figura 56. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D

- Usar clinómetro: Los datos del clinómetro o compensador de eje doble se utilizar para nivelar de forma automática los datos de escaneo capturados. Esta opción activa o desactiva el uso automático de la medición de la inclinación del compensador de eje doble incorporado para el registro de escaneos en SCENE. Independientemente de su configuración, los datos de este sensor siempre se miden y se adjuntan a cada escaneo. Si está activado el uso de los datos del clinómetro, los datos se utilizarán automáticamente para registrar los escaneos en SCENE; y si está desactivado, los datos se ignorarán. Para obtener los datos más confiables del compensador de eje doble la inclinación del escáner tiene que ser inferior a 5° . Este sensor nos va a asegurar que cuando trabajemos con los escaneos en el programa de registro, estos siempre estén bien orientados en el eje vertical de las Z.



Figura 57. Pantallas de configuración escáner láser Faro Focus 3D

- Usar brújula: Activa o desactiva el uso automático de los datos de la brújula incorporada para el registro de escaneos en SCENE. La brújula electrónica incorporada mide la orientación del escáner en la superficie terrestre.
- Usar altímetro: Activa o desactiva el uso automático de los datos del altímetro para el

registro de escaneos en SCENE. Se puede ingresar una altura de referencia antes de comenzar el proyecto de escaneo. Esta altura de referencia luego será la base de todas las mediciones que se realicen con el altímetro. El sensor de altura barométrica (altímetro) determina la altitud de la posición actual del escáner. La determinación de la altitud está basada en la medición de la presión atmosférica.

Escaneo con color: Activa o desactiva el registro de escaneos con color. Si está activado, el escáner tomará fotos a color del entorno escaneado con la cámara color integrada. Estas fotos se tomarán enseguida después del escaneo láser y se utilizarán en SCENE para colorear automáticamente el historial de los datos de escaneo. La resolución máxima de la fotografía equirectangular capturada puede llegar hasta los 70 Mpx, pero dependerá de la resolución con que realicemos el escaneo. El escáner láser para conseguir esta fotografía completa que permita colorear el escaneo va capturando una a una las fotografías sobre el espejo rotativo hasta completar la esfera completa. De esas fotografías sólo utiliza la zona central ya que es la zona con mejor calidad y menor distorsión.

Parámetros de color: Indica el modo de medición utilizado a fin de determinar la exposición para tomar fotos a color.

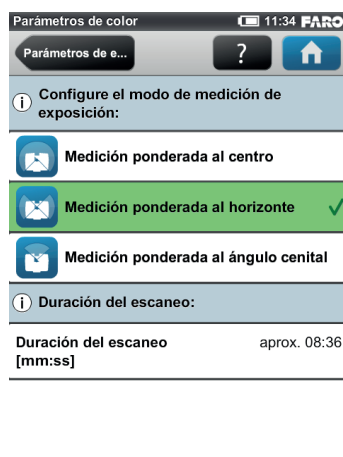


Figura 58. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D

- Medición ponderada al centro: para determinar las configuraciones de exposición, la cámara utilizará la información de la luz de toda la escena y la promedia sin darle una ponderación especial a ningún área en particular. Este modo se utiliza en escenarios con condiciones de iluminación parejas.
- Medición ponderada al horizonte: la cámara utilizará la información de la luz del horizonte para determinar su configuración de exposición. Este modo se utiliza en escenarios con luz brillante proveniente de arriba.
- Medición ponderada al ángulo cenital: la cámara utilizará la información de la luz que proviene de arriba del escáner para determinar su configuración de exposición. Este modo se utiliza si una luz muy brillante proviene de las ventanas y si desea lograr el balance más correcto de luz y exposición para los objetos del cielorraso del edificio.

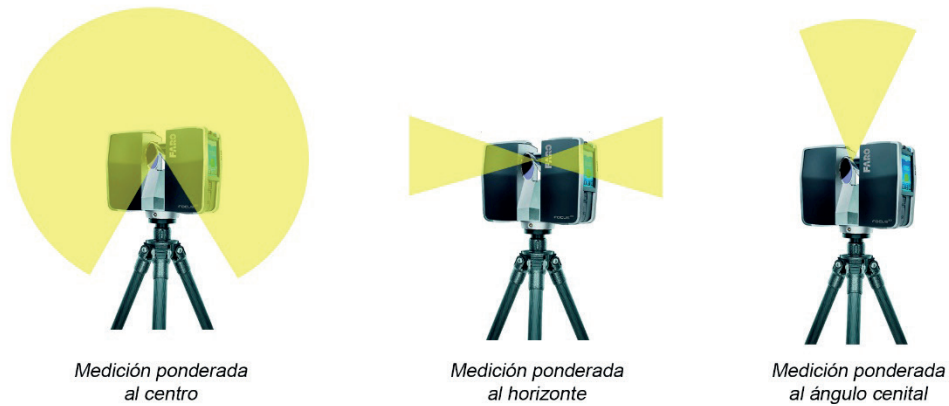


Figura 59. Tipos de mediciones de exposición para determinar los parámetros de color de los escaneos. Fuente: <https://es-knowledge.faro.com> [Consultado: 16/05/2017]

Configuración avanzada: Activa o desactiva los filtros de Contorno nítido y Cielo nítido.

- Contorno nítido: Habilita el filtro dinámico para el contorno. Mientras se realiza el escaneo, el filtro de este hardware elimina mediciones incorrectas de los bordes de los objetos. Elimina los puntos de escaneo que se originan al tocar dos objetos con un impacto de láser, lo cual ocurre principalmente en el borde de los objetos.
- Cielo nítido: Habilita el filtro dinámico para el cielo. Mientras se realiza el escaneo, el filtro de este hardware elimina puntos de escaneo que se originan al no tocar ningún objeto; esto sucede principalmente cuando se escanea el cielo.
- Botón Configuración recomendada: Habilita ambos filtros.



Figura 60. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D

Distancia segura para la vista: La distancia segura para la vista axial y radial (NOHD). Ambos valores dependen de la configuración de resolución y calidad seleccionada.

Tamaño del escaneo [Pto.]: Muestra el tamaño del escaneo en puntos horizontalmente x verticalmente. El tamaño vertical sólo se puede cambiar estableciendo una nueva resolución o cambiando el ángulo del área de escaneo.

Duración del escaneo, tamaño del archivo de escaneo: Tiempo de escaneo esperado y tamaño del archivo en megabytes según la resolución, el valor de calidad y el rango de escaneo elegidos. Los valores que se muestran son aproximados.

Una vez que hayamos terminado la configuración de los escaneos iniciaremos el proceso de captura de datos.

2.1.3. POSICIONAMIENTO DE ESCANEOS

Una vez que hemos terminado de replantear las dianas procederemos a realizar la toma de datos. Para ello iremos colocando el escáner láser en diferentes posiciones de escaneo que ya tendremos establecidas en la planificación previa, pero que iremos reajustando según vayamos avanzando con el trabajo. La separación entre posiciones de escaneado vendrá determinada por la complejidad de lo que vayamos a escanear y la resolución que necesitemos en la nube de puntos resultante. Una de las características del escáner FARO Focus 3D es que es capaz de tomar mediciones hasta una distancia de 120 m desde el centro del espejo, por lo que podremos capturar todo lo que se encuentre dentro de una esfera de 240 m de diámetro. A partir de los 120 m captura puntos, pero con ruido. Cuando realizamos un escaneado tenemos que asegurarnos de que se cumplan una de estas dos condiciones. Por un lado, que haya elementos comunes o áreas de solapamiento entre los diferentes escaneos y, por otro lado, tenemos que tratar de que en cada escaneo nos salga un mínimo de tres dianas. En el caso de que no utilicemos dianas en el trabajo esta última condición se puede descartar.

La distancia de escaneo va a determinar la resolución de la nube de puntos obtenida. Cuando configuramos el escaneo el software no indica la separación que tendrán los puntos a una distancia de referencia desde el foco del escáner. Esta distancia de referencia son los 10 m. Por debajo de esa distancia la separación entre puntos se va reduciendo, mientras que por encima de la distancia de los 10 m la separación entre puntos va aumentando. En definitiva, los objetos más próximos al escáner láser van a tener una densidad de puntos muy alta mientras que los objetos que están más alejados van a tener una densidad más baja. Por este motivo hay que ir desplazando los estacionamientos, para obtener una nube con una densidad lo más homogénea posible.

Cuando posicionemos el escáner sobre el trípode este tiene que estar bien asentado y lo más estable posible, ya que cualquier movimiento o vibración que se produzca durante el escaneado por muy pequeña que sea, se verá reflejado en el escaneo introduciendo ruido en la nube de puntos.

El escáner FARO Focus 3D utiliza un haz láser de tipo infrarrojo, por este motivo tenemos que tener en cuenta es que las condiciones ambientales pueden afectar a la precisión de nuestro escaneo. Algunos condicionantes ambientales son:

- La formación de suciedad en la superficie del espejo del escáner, la niebla, lluvia o nieve provocan mediciones incorrectas.
- Hay que evitar escanear objetos contra luz solar directa, ya que puede dar como resultado datos de escaneo en esa área.

- Los objetos o las superficies pueden tener un mayor ruido de rango si están iluminados directamente por la luz solar brillante.

Las superficies muy absorbentes o muy reflectoras aumentan el ruido del rango y, en consecuencia, la imprecisión de la medición. Para evitar esto se pueden tratar con un spray anti resplandor que se puede retirar fácilmente después de haber realizado los escaneos.

2.1.4. CAPTURA DE DATOS. REALIZAR ESCANEOS

Una vez configurados los parámetros del escaneo estos se mantendrán constantes en todos los escaneos que vayamos realizando hasta que hagamos alguna modificación. El proceso de toma de datos consistirá en ir desplazando el escáner a cada posición de escaneo que hayamos marcado en la planificación previa e ir escaneando hasta capturar la mayor superficie posible de nuestro objeto de estudio. Desde la pantalla de inicio solo tendremos que ir pulsando el botón **Start Scan** cada vez que nos ubiquemos en una posición de escaneo.

La realización de los escaneos supone una gran cantidad de tiempo, lo que hace que sea importante una buena planificación tanto de los posicionamientos como de la densidad de las capturas. Cuantos más escaneos realicemos y su resolución y calidad sea mayor, el tiempo de toma de datos también aumentará. Aunque el tiempo no sea un problema, el número total de puntos sí, ya que los sistemas de procesamiento son finitos y a mayor número de puntos los procesos de cálculo en la alineación serán más largos y complejos. Debemos llegar a un correcto equilibrio entre el número de tomas y la densidad de estas.

Debido a las características de longitud de onda y clase del láser que lleva incorporado, los puntos están representados por sus intensidades en escala de grises.

El escáner en su interior lleva incorporada una cámara fotográfica, lo que permitirá durante el procesado colorear la nube de puntos capturada haciendo corresponder a cada punto un valor RGB¹⁹. Esta cámara realiza múltiples fotografías hasta completar la órbita completa, obteniendo así toda la información radiométrica del objeto. La fotografía resultante es de aproximadamente 70 megapíxeles.

Al tratarse de un equipo de rango esférico, aprovecha esa característica para realizar la captura de datos geométricos en los primeros 180° en el ángulo de giro horizontal, y en los otros 180° de giro realiza la captura de color o datos radiométricos que se utilizarán para colorear la nube de puntos.

¹⁹ El valor RGB (del inglés Red, Green, Blue) hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios con que se forma: el rojo, el verde y el azul. Este modelo de color permite representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores primarios.

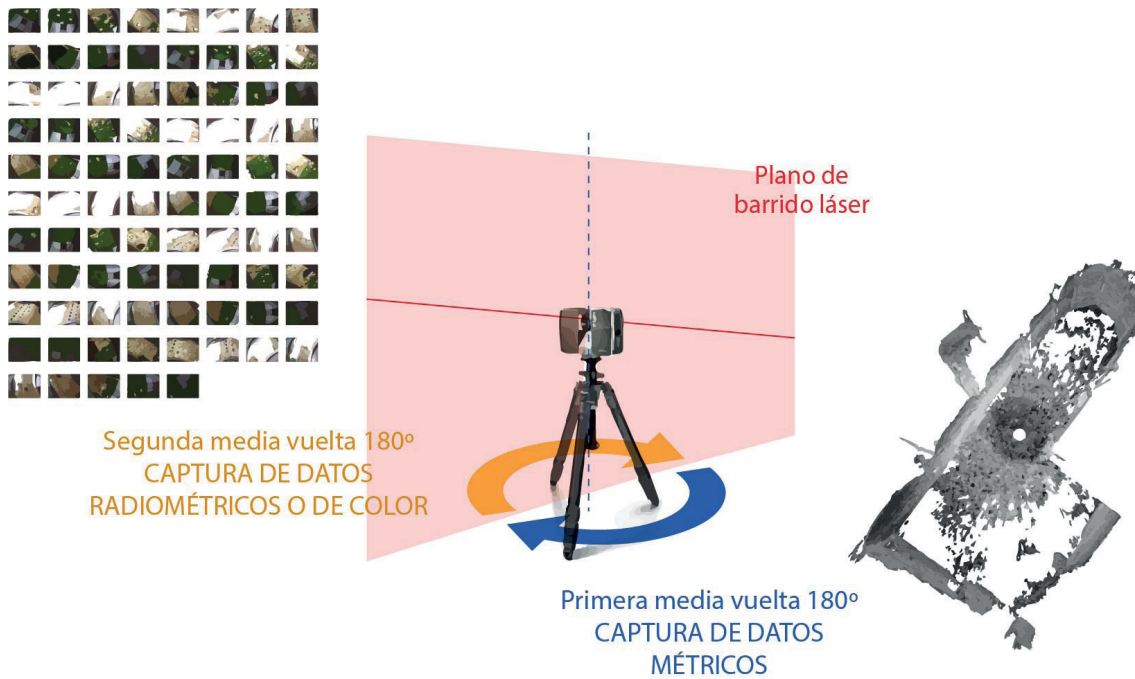


Figura 61. Esquema del proceso de escaneado. Fuente: elaboración propia

Una vez terminado el trabajo apagaremos el equipo y lo guardaremos en su caja de transporte.

2.1.5. GEORREFERENCIACIÓN. SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA

Todos los escaneos tienen su propio sistema de coordenadas, cuyo origen coincide con el centro del espejo rotativo del escáner. Cuando registramos o alineamos todos los escaneos de un proyecto de levantamiento 3d este va a estar orientado según el sistema de coordenadas locales que viene determinado por las coordenadas del escaneo que tomemos como referencia y, a partir de este, el resto de escaneos irán adquiriendo su orientación respecto a ese sistema.

Cuando nos pidan georreferenciar la nube de puntos a un sistema de coordenadas de referencia globales tendremos que utilizar dianas para poder hacerlo. Para ello, colocaremos dianas antes de realizar la captura de datos con el fin de que estas dianas salgan reflejadas en los datos de los escaneos. Las dianas estarán repartidas por todo el objeto de estudio para conseguir un mejor resultado y cuanto mayor sea el número de dianas mejor será el valor de la georreferenciación. Para medir estas dianas se utilizará alguna herramienta de medición topográfica como por ejemplo una estación total. La tabla con los datos de la medición se utilizará posteriormente en el proceso de registro de los escaneos.

2.2. Fotogrametría terrestre

La fotogrametría se basa en la utilización de fotografías para la obtención de geometrías tridimensionales mediante el uso de cálculos matemáticos complejos. Ese modelo tridimensional del objeto a color se obtiene mediante restitución digital desde una colección de fotografías (Lerma et al., 2013). En el caso de la fotogrametría terrestre las fotografías utilizadas son aquellas que han sido tomadas próximas al terreno. Existe una variante en la que se puede utilizar vídeos como base de estas restituciones en vez de fotografías (Torresani & Remondino, 2019). La venta-

ja de este método es que la toma de datos es muy ágil y que cada segundo de vídeo equivale a 24 fps o fotogramas por segundo, lo que supone que en un vídeo de 10 segundos tendremos 240 fotografías para realizar la restitución. La desventaja de este método es que el vídeo tiene que ser grabado sin realizar movimientos bruscos de cámara ya que esto puede provocar que exista un alto porcentaje de fotogramas borrosos.

Hace algunos años la fotogrametría era una técnica poco conocida por el público, solo era utilizada por técnicos especializados, y suponía un gran desembolso económico para poder acceder a los equipos y software necesarios para poder realizarla. En la actualidad gracias a la evolución tecnológica de los equipos informáticos, su abaratamiento y a la simplificación y sencillez en el manejo del software, se ha conseguido extender su conocimiento y uso entre los usuarios profanos. Gracias a esto se puede confirmar la aparición de la fotogrametría *low cost* o de bajo coste que permitirá, con un equipamiento barato y conocimientos básicos, generar modelos de forma rápida y sencilla. Ejemplo de esto es que a día que existen aplicaciones para smartphone que permiten hacer modelos fotogramétricos a partir de las fotografías realizadas con el teléfono (Costantino et al., 2020). Incluso existen smartphone que van equipados con sistemas lidar de corto alcance. A pesar de esto, para conseguir modelos tridimensionales de gran precisión geométrica y radiométrica es necesaria una especialización en la materia y conocer bien la técnica para poder saber cómo hay que modificar los parámetros durante todo el proceso de restitución en vez de generarlos de forma automática.

Una de las primeras cosas a tener en cuenta es durante el proceso de toma de datos. Para que no tengamos problemas o surjan errores durante el proceso de registro y restitución digital es necesario cumplir una serie de condiciones a la hora de realizar las fotografías:

- Las posiciones de las fotografías tienen que ser diferentes, es decir tienen que ser fotografías convergentes sobre el objeto. Si alguna coincide en la misma posición introducirá errores en el modelo y puntos de ruido.
- Es recomendable que todas las colecciones de fotografías se realicen con la misma orientación, es decir, en formato paisaje (horizontal) o formato retrato (vertical).
- Utilizar la misma focal para toda una colección de fotografías.
- Todas las fotografías tienen que estar bien expuestas, sin áreas muy oscuras ni muy quemadas ya que en esas zonas el software no será capaz de reconocer puntos.
- Las fotografías tienen que estar bien enfocadas. Una fotografía borrosa introduce errores en los cálculos.

Cuando se realizan las fotografías es recomendable, si la cámara lo permite, realizarlas en formato RAW. Este es un formato de archivo de imagen digital “bruto” o “en crudo” que contiene todos los datos de la imagen tal y como se ha captado con el sensor de la cámara. Contiene toda la información de iluminación, sombras y profundidad de color²⁰ en el momento de realizar la captura de la fotografía.

20 La profundidad de color o bits por píxel (bpp) es un concepto de la computación gráfica que se refiere a la cantidad de bits de información necesarios para representar el color de un píxel en una imagen digital. <https://web.archive.org/web/20100208232200/http://www.openraw.org/>

Por experiencia en alguno de los casos de estudio realizados, es aconsejable, por temas de seguridad ante la pérdida de datos, elegir la opción de configuración de tipos de archivo en la cámara RAW+JPG. Esto hay que hacerlo de esta manera porque en el caso de que la tarjeta de memoria tenga algún problema o quede corrupta cuando intentemos hacer una recuperación de datos mediante software específico, los archivos RAW no los podremos recuperar mientras que los JPG sí. De no hacerlo así corremos el riesgo de tener que repetir la toma de datos de las fotografías.

El realizar las fotografías en formato RAW va a implicar realizar un paso a mayores antes de realizar el procesado de los datos. Ese paso consistirá en el revelado digital de las fotografías para mejorar sus condiciones de iluminaciones, sombras o color. Pero no se puede mejorar ningún otro parámetro que tenga que ver con claridad, textura, ruido, etc. ya que son parámetros que añaden o quitan definición en la estructura de la foto y eso implica una alteración en el posterior procesado mediante fotogrametría que puede añadir errores.

Las cámaras fotográficas de hoy en día ofrecen calidades muy altas en las imágenes que capturan gracias a la evolución de los sensores en tamaño, sensibilidad, etc. El sensor de una cámara digital es la parte que es sensible a la luz y que captura la imagen cuando está expuesto. Los sensores se suelen medir en milímetros. Estos sensores suelen ser pequeños, pero últimamente el mercado está aumentándolos de tamaño para alcanzar el formato completo o *full frame*, que es el equivalente al estándar de la película de 35 mm (formato en el que trabajaban las antiguas cámaras fotográficas analógicas). El tamaño del sensor está relacionado con la calidad de la imagen. Esta calidad de imagen no la determina la resolución medida en megapíxeles, sino el tamaño del sensor y el tamaño de los píxeles. Los sensores más grandes tienen píxeles más grandes, lo que supone que capturan más luz, más profundidad de campo, más rango dinámico²¹ y mejor calidad de imagen. Esto favorece mucho para la captura de fotografías con baja iluminación, por ejemplo, en interiores o escenas nocturnas. Por ejemplo, si realizamos una misma fotografía a un objeto con un smartphone y una cámara de formato completo (*full frame*) ambas con la misma resolución de 20 Mpx, ambas imágenes van a ser buenas pero la imagen capturada por la cámara va a tener mucha más calidad y nitidez que la imagen capturada por el smartphone, ya que el sensor de la cámara (35 x 24mm) es mucho mayor que el sensor del smartphone (6,17x4,55 mm).

21 El rango dinámico es la **relación entre la cantidad de luz de la parte más iluminada de la escena y la cantidad de luz mínima detectable de la parte más oscura (con detalle)** de dicha escena.

	FORMATO COMPLETO (FULL FRAME)	APS-C	MICRO 4/3	1"	1 / 2.55"
TAMAÑO DE IMAGEN					
TAMAÑO DE SENSOR	35.00 x 24.00 mm	23.60 x 15.60 mm	17.00 x 13.00 mm	12.80 x 9.60 mm	6.17 x 4.55 mm
FACTOR DE RECORTE	1	1.52	2	2.7	5.62
TIPO DE CÁMARA					

Tabla 4. Tabla comparativa del tamaño de sensor de la cámara digital. Fuente: elaboración propia

El tamaño de sensor de formato completo, más conocido como “Full Frame”, es el que se suele utilizar como referencia para calcular el factor de recorte. Con una dimensión de 35.00 x 24.00 mm es el sensor más grande que se puede encontrar en los principales modelos de cámaras que se comercializan.

Formato completo Full Frame	APS-C	Micro 4/3	1"	1/2.55"
				
Nikon D810	Nikon D5600	Olympus E-PL10	Panasonic Lumix DMC-FZ1000	Smartphone iPhone 11

Tabla 5. Tabla de diferentes tipos de cámara según el sensor. Fuente: elaboración propia

El tamaño de sensor APS-C (*Advanced Photo System type-C*), también conocido como “sensor recortado” suele tener unas dimensiones de sensor de 23.60 x 13.60 mm.

El tamaño micro 4/3 hace referencia a cámaras de formato pequeño sin espejo y con objetivos intercambiables y suele tener unas dimensiones de sensor de 17.00 x 13.00 mm.

El sensor de 1 pulgada es el que se utiliza en la mayoría de las cámaras compactas. Con una dimensión de sensor 12.80 x 9.60 mm, son lo suficientemente grandes para poder capturar una

cantidad de luz decente. El dron dji Phantom 4 utiliza un sensor de 1" al igual que muchas cámaras compactas avanzadas o también conocidas como cámaras bridge.

El tamaño del sensor de los teléfonos móviles o smartphone son variables. EL sensor de 1/2.55" es el más grande de este tipo.

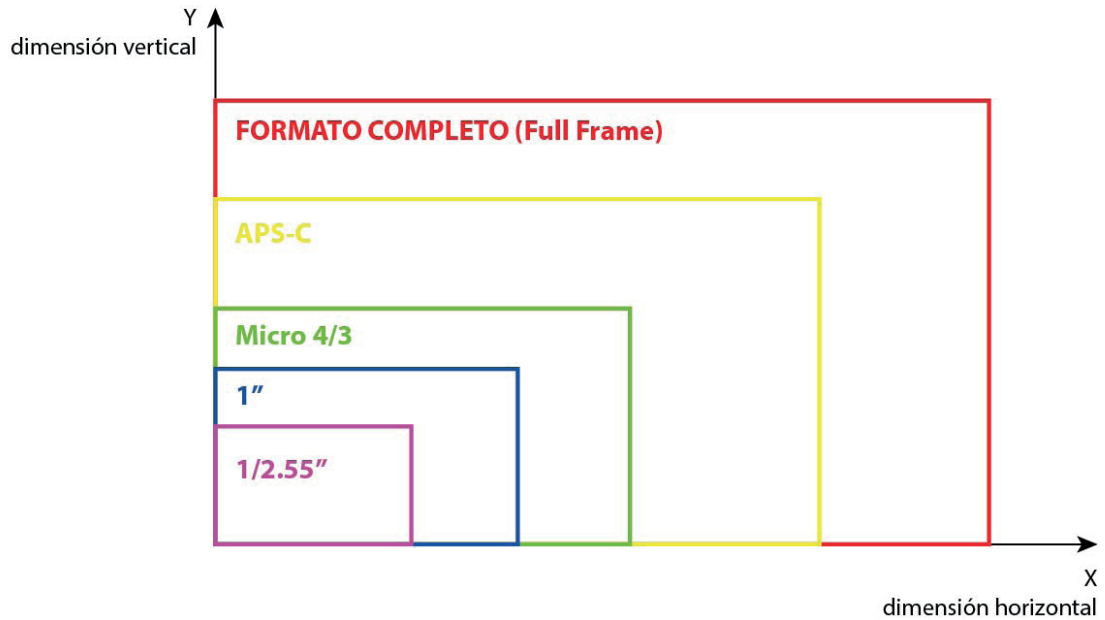


Figura 62. Comparación gráfica del tamaño de los distintos tipos de sensores en cámaras fotográficas. Fuente: elaboración propia

El tamaño de sensor también influye en la profundidad de campo, ya que cuanto más grande sea el sensor de la cámara mayor será la profundidad de campo. Mientras que cuanto más pequeño sea el tamaño del sensor de la cámara menor será la profundidad de campo.

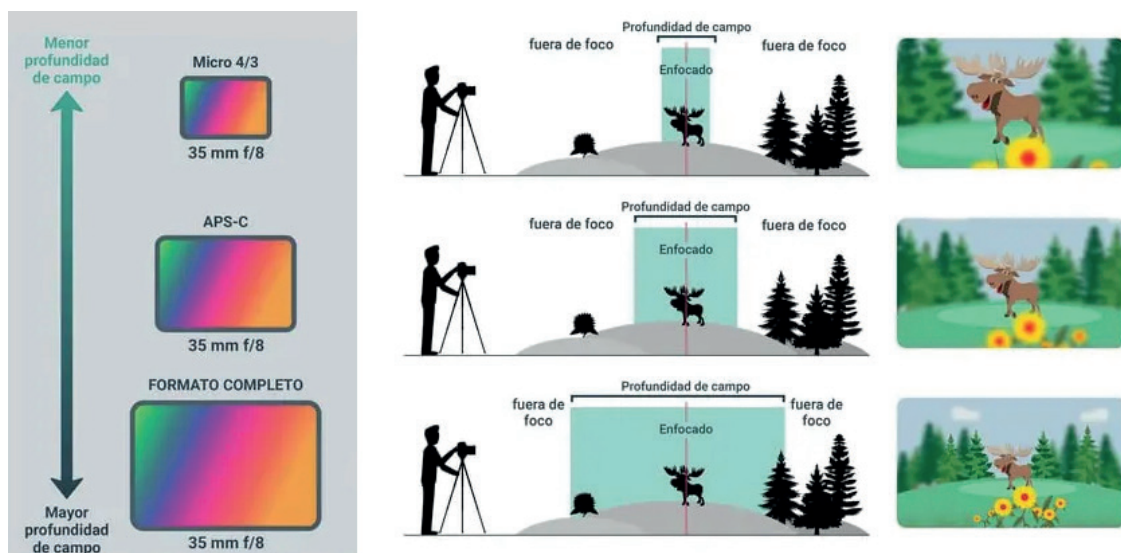


Figura 63. Relación de la profundidad de campo con el tamaño del sensor de la cámara. Fuente: <https://capturetheatlascam/es> [Consultado: 11/09/2020]

Las fotografías utilizadas para realizar fotogrametría pueden clasificarse en dos tipos: fotografía convergente y fotografía divergente.

2.2.1. FOTOGRAFÍA CONVERGENTE

Este tipo de fotografía consiste en ir realizando fotografías desde posiciones diferentes hasta recubrir todo el objeto de estudio. Podemos decir que es la fotografía más sencilla de ejecutar. Estas fotografías tienen que tener bastante recubrimiento entre unas y otras para que el proceso de reconstrucción funcione bien y localice muchos puntos comunes entre sí. El recubrimiento mínimo tiene que ser de un 50% en horizontal y un 70% en vertical. Dependiendo del tamaño del objeto y de la lente que utilicemos será necesario hacer más o menos fotografías a diferentes alturas.

Con este tipo de fotografía podemos plantear dos modos de trabajo dependiendo de si el objeto es grande o el objeto es pequeño.

Cuando el objeto es grande, por ejemplo un edificio, lo que se deberá de hacer es ir lo que tendremos que hacer es ir realizar colecciones de fotografías en paralelo a las fachadas a diferentes alturas para hasta completar toda la geometría. En las zonas de encuentros o las esquinas hay que introducir líneas de fotografías de refuerzo. Para las zonas altas se podrá utilizar elementos auxiliares como escaleras, andamios o plataformas elevadoras. También se pueden utilizar pértigas telescópicas o drones si la normativa lo permite.

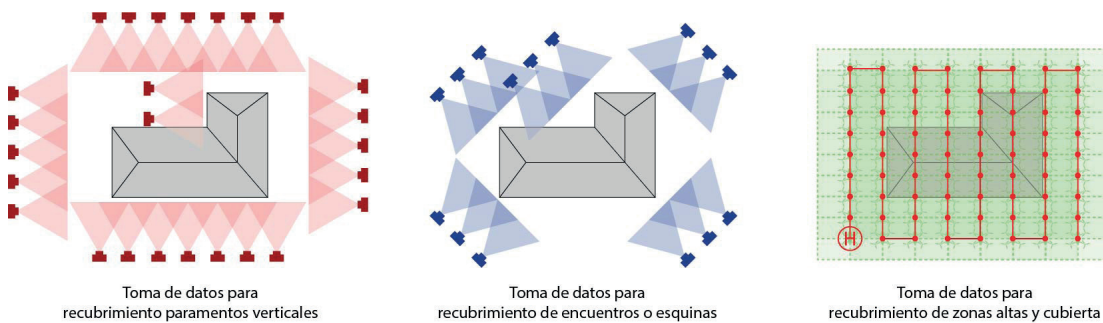


Figura 64. Toma de datos de imágenes para recubrimiento completo de un objeto grande. Fuente: elaboración propia

Cuando el objeto es pequeño, por ejemplo una escultura, el proceso de captura de datos se realizará mediante anillos de fotografías pivotando alrededor del objeto y distribuidos en diferentes alturas hasta completar la esfera.

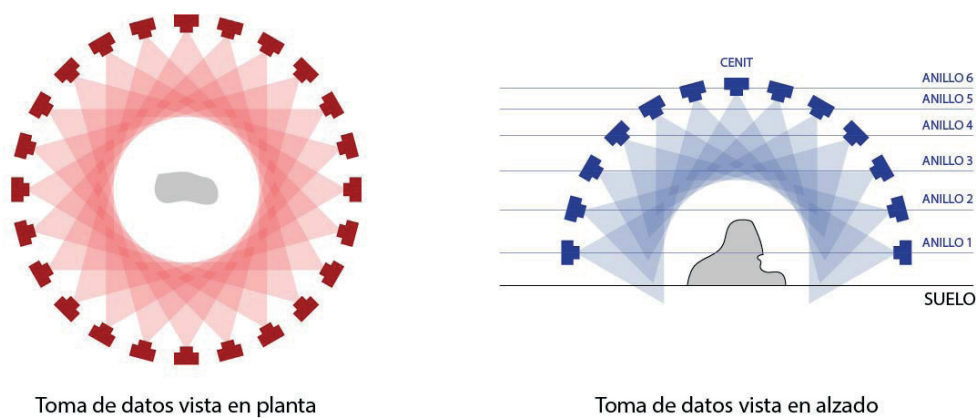


Figura 65. Toma de datos de imágenes para recubrimiento completo de un objeto pequeño. Fuente: elaboración propia

En este tipo de documentación de objeto pequeño podemos realizar la captura de imágenes de dos formas. La primera consistirá en dejar el objeto fijo e ir pivotando con la cámara alrededor del objeto. La otra forma es dejar la cámara fija y lo que gira sobre su propio eje es el objeto a documentar. Para poder realizar esto se utilizan sistemas de mesa rotatoria controladas de forma electrónica lo que permite rotar el objeto en porciones de ángulo concretos, e incluso automatizar el disparo con el giro de la plataforma.

La fotogrametría funciona muy bien con objetos que son estáticos, si el objeto es una persona esta se puede mover, y desde la primera fotografía que realizamos hasta la última lo más probable es que haya cambiado de posición varias veces. Por este motivo cuando se generan modelos tridimensionales mediante fotogrametría de personas u objetos móviles, existen unos sistemas que consisten en una especie de habitáculo con un gran número de cámaras y sistemas de iluminación distribuidos en todo el entorno del espacio. El objeto a documentar se coloca en el centro de todo este sistema y la captura de todas las fotografías se realiza en un solo instante en cuestión de milisegundos.

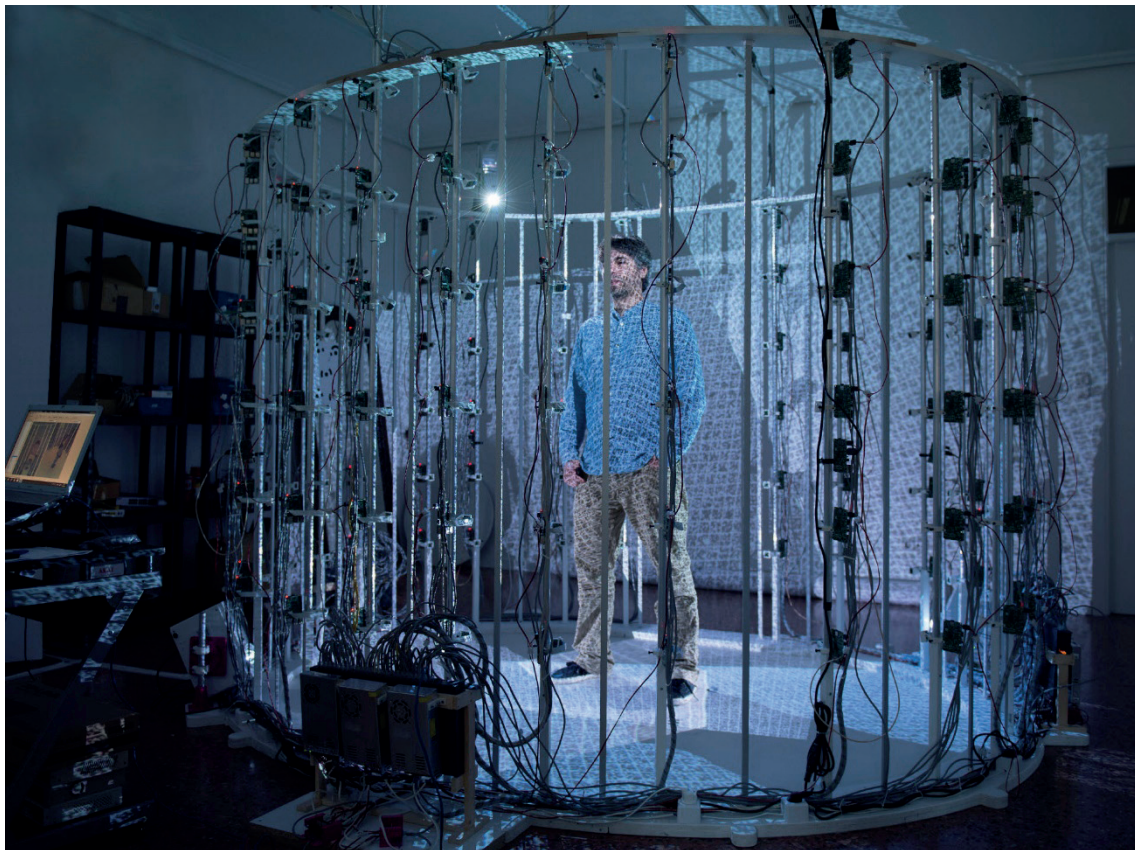


Figura 66. Sistema de captura simultanea de imágenes. Fuente: <http://www.garmaz.es> [Consultado: 12/03/2020]

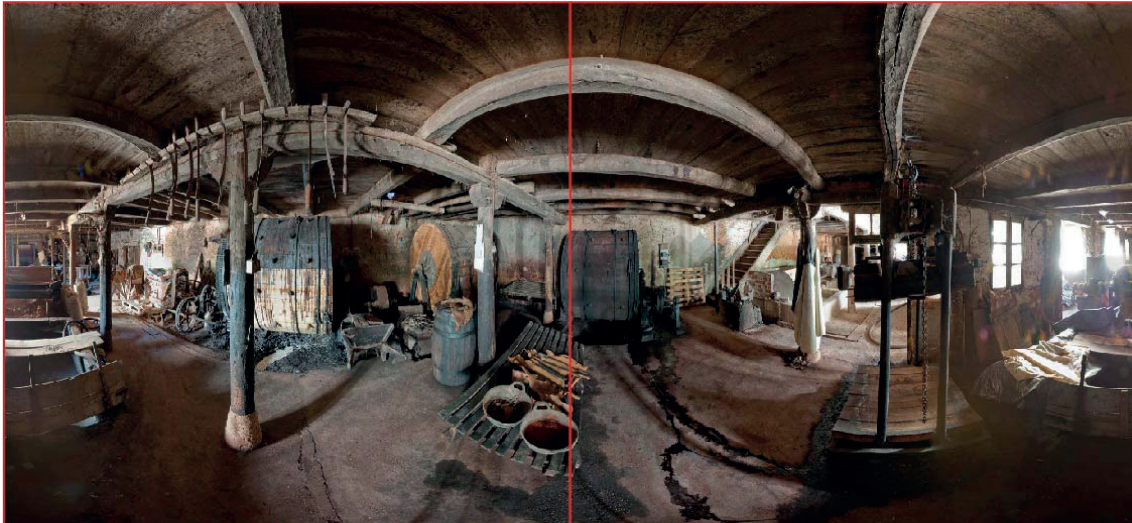
2.2.2. FOTOGRAFÍA DIVERGENTE O PANORÁMICA EQUIRECTANGULAR

Este tipo de fotografía consiste en realizar fotografías desde una misma posición recubriendo todo lo que nos rodea en los 360º en X e Y. Este tipo de fotografía también se conoce como fotografía panorámica esférica o equirectangular. Es un tipo de fotografía muy peculiar y fácil de reconocer ya que la imagen resultante tiene que tener una proporción de 2:1. Es decir, que si la fotografía tiene 10.000px en horizontal, para que cumpla la condición de panorámica equirec-

tangular tiene que tener 5.000 píxeles en vertical. Si esta realización no se cumple a la hora de visualizarla se verá mal haciendo que el horizonte no salga recto sino curvado.

Este tipo de fotografías nos servirán para diferentes fases o procesos de nuestra metodología de documentación:

1. Coloreado de las nubes de puntos en la fase de procesado de los escaneos
2. Creación de modelos 3d mediante fotogrametría
3. En la fase de difusión de los resultados para la creación de visitas virtuales



Proporción fotografía esférica o equirectangular 2:1

Figura 67. Relación de proporciones de la fotografía esférica o equirectangular. Fuente: elaboración propia

Para poder capturar una fotografía esférica necesitaremos los siguientes instrumentos:

- Cámara fotográfica
- Objetivo gran angular u ojo de pez
- Trípode
- Rótula nodal. Esta puede ser manual o robotizada

Para poder realizar una fotografía esférica perfecta en las que las imágenes estén bien cosidas entre sí, debemos de realizar todas las fotografías que la componen pivotando sobre la misma posición. Por ese motivo se utiliza una rótula nodal. Este tipo de rótula nos permite capturar todas las fotografías rotando sobre el mismo punto. Ese punto de no paralaje se llama punto nodal y se corresponde con la intersección de los ejes nodales horizontales y vertical. El eje nodal vertical coincide con el eje del trípode, mientras que los ejes horizontales coinciden con el eje de giro de la rótula (X) y el eje que atraviesa por el centro de las lentes de la cámara fotográfica (Y).

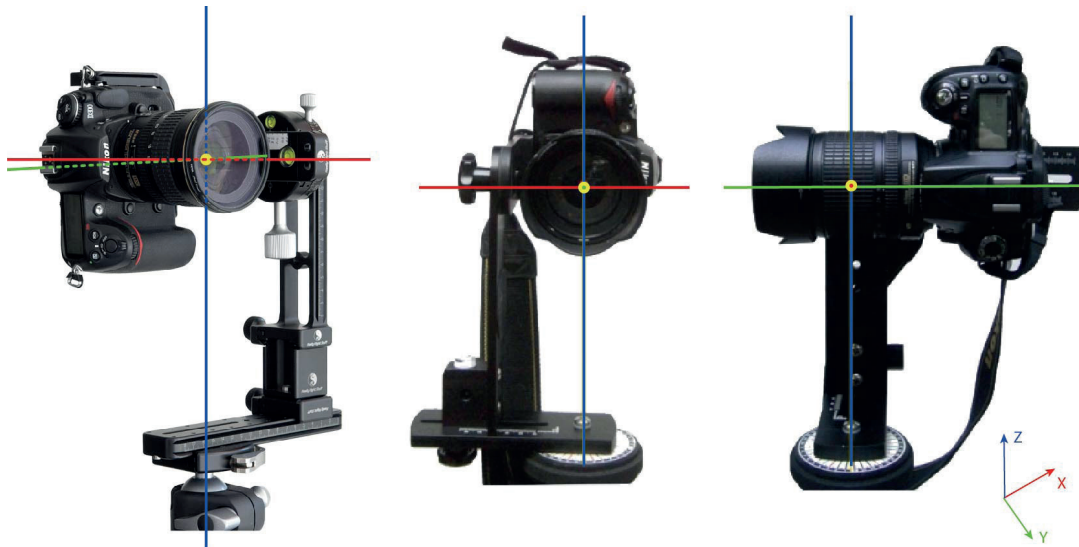


Figura 68. Punto nodal respecto la intersección de los ejes nodales. Fuente: elaboración propia

El funcionamiento de captura de una imagen consiste en que los rayos de luz entran en la cámara atravesando la lente. La lente curvada desvía la dirección de los rayos haciendo que se crucen en un punto dentro de la cámara (punto de foco o punto nodal) y los rayos de luz continúan hasta la superficie sensible que es el sensor de la cámara creando una imagen invertida del objeto real. Esta superficie sensible se encuentra en el plano focal.

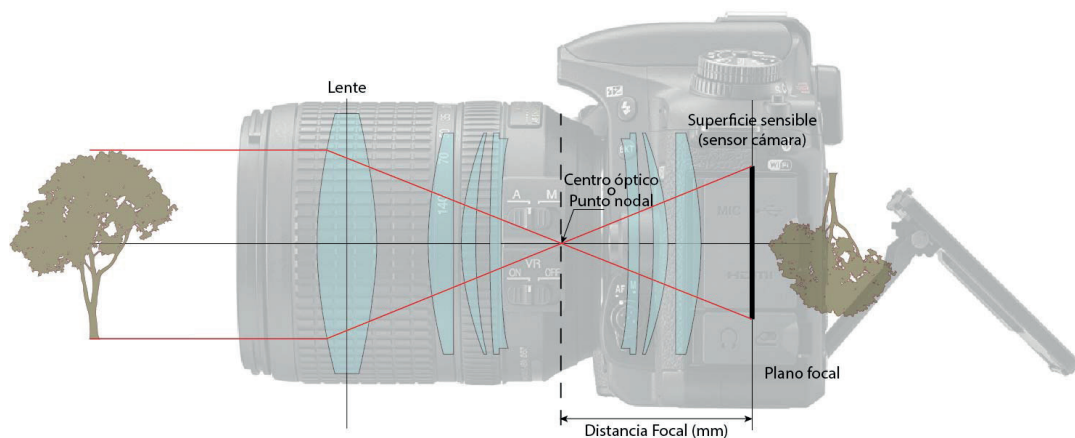


Figura 69. Esquema de la ubicación del punto nodal en el interior de la cámara. Fuente: elaboración propia

El eje nodal dentro de la cámara no es fijo ya que va a variar dependiendo de la focal de la lente que utilizemos, esta puede ser fija o variable. La distancia focal de un objetivo es la distancia en milímetros que existe desde el centro óptico de la lente hasta el sensor o plano focal. Ese centro óptico es donde se cruzan los rayos de luz y es lo que hemos definido anteriormente como punto nodal. Ese punto se suele localizar muy cercano al diafragma²² de la cámara.

22 El diafragma es una parte del objetivo que limita el rayo de luz que penetra en la cámara. Funciona como el iris del ojo humano, abriéndose o cerrándose para permitir que entre más o menos luz según sea necesario.

La distancia focal cuanto más grande sea, nos acerca más al objeto (zoom) pero abarca menos escena (menor ángulo de visión). Mientras que una distancia focal pequeña, nos aleja más el objeto (gran angular) y abarca mucha escena (mayor ángulo de visión).

En el siguiente gráfico, se puede ver la relación que existe entre el ángulo de visión y la distancia focal de un objetivo:

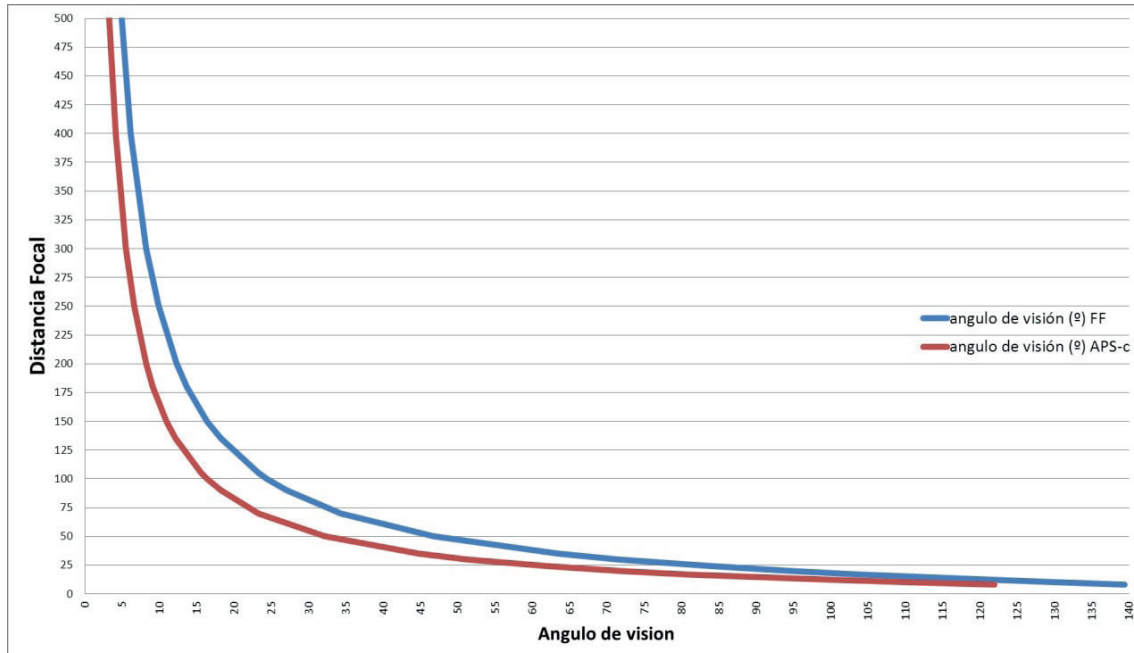


Figura 70. Gráfica de relación entre la distancia focal y el ángulo de visión. Fuente: www.blogdelfotografo.com [Consultado: 11/09/2020]

Según el ángulo de visión los objetivos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Súper gran angular o también llamados “ojos de pez”. La distancia focal está por debajo de los 8 mm y llegan a cubrir 180°.
- Gran angular. La distancia focal oscila entre los 8 y 25 mm y cubre un ángulo de visión entre los 110° y 60°.
- Estándar. Su distancia focal está entre los 25 y 65 mm y cubre un ángulo de visión entre los 60° y 25°.
- Tele corto. Su distancia focal está entre los 65 y 100 mm y cubre un ángulo de visión entre 25° a 15°.
- Teleobjetivo. Su distancia focal está entre los 100 y 160 mm y cubre un ángulo de visión entre 15° a 10°.
- Súper teleobjetivo. Su distancia focal está entre los 100 y 600 mm y cubre un ángulo de visión entre 10° a 1°.

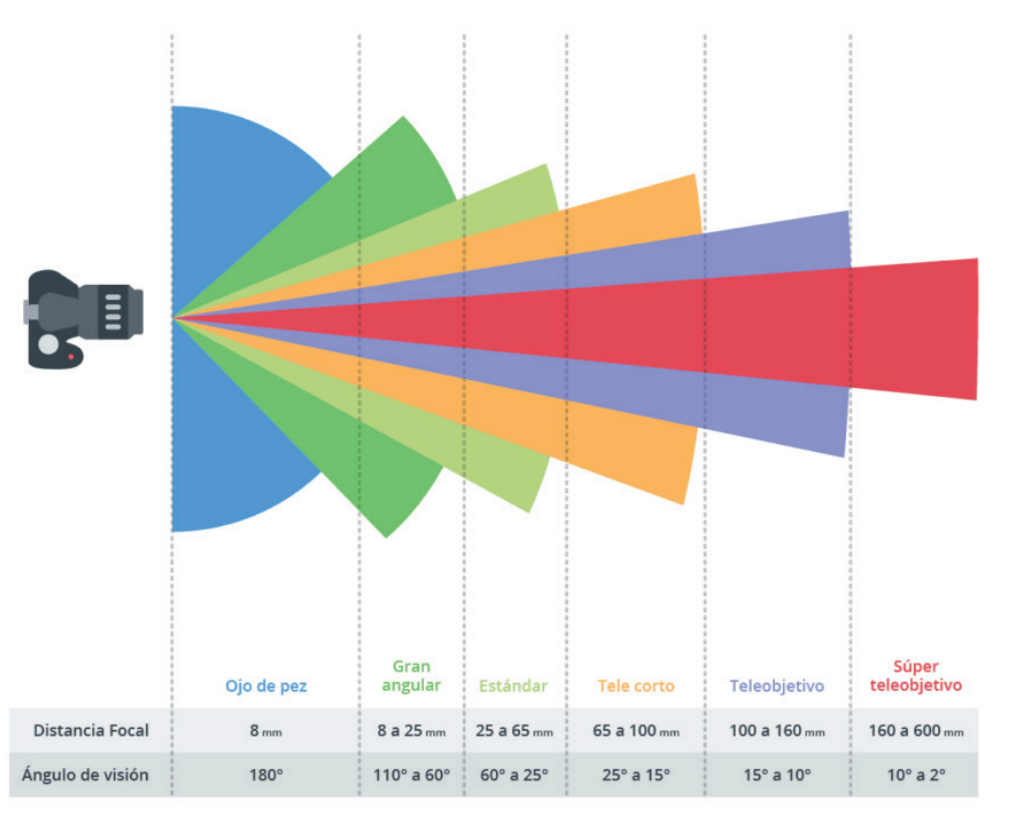


Figura 71. Clasificación de objetivos de cámara. Relación entre las distancias focales y el ángulo de visión. Fuente: www.blogdefotografo.com [Consultado: 11/09/2020]

Para realizar fotografías esféricas es mucho mejor utilizar una focal baja para que abarquemos mucha escena y así hacer menos fotografías.

Una vez elegido el tipo de objetivo procederemos a calcular el punto nodal, para ello realizaremos los siguientes pasos:

1. Colocamos la cámara en el trípode con la rótula nodal.
2. Colocamos dos objetos en el centro del encuadre. Uno lo más cerca posible al objetivo sin que ocupe toda la escena y otro lo más alejado posible pero que sea visible. Ambos tienen que estar alineados entre sí y en el visor.
3. A continuación, giramos la cámara a izquierda y derecha utilizando el pivote de la rótula, dejando los objetos a un lado y luego a otro. Con esto observamos que se separan entre sí al hacerlo. Lo que tenemos que conseguir es que mantengan su posición en el encuadre cuando hacemos este giro.
4. Para corregir la desviación desplazaremos la cámara hacia delante y volvemos a comprobar.
5. Repetiremos el paso anterior hasta que consigamos que los dos objetos se mantengan en la misma posición.

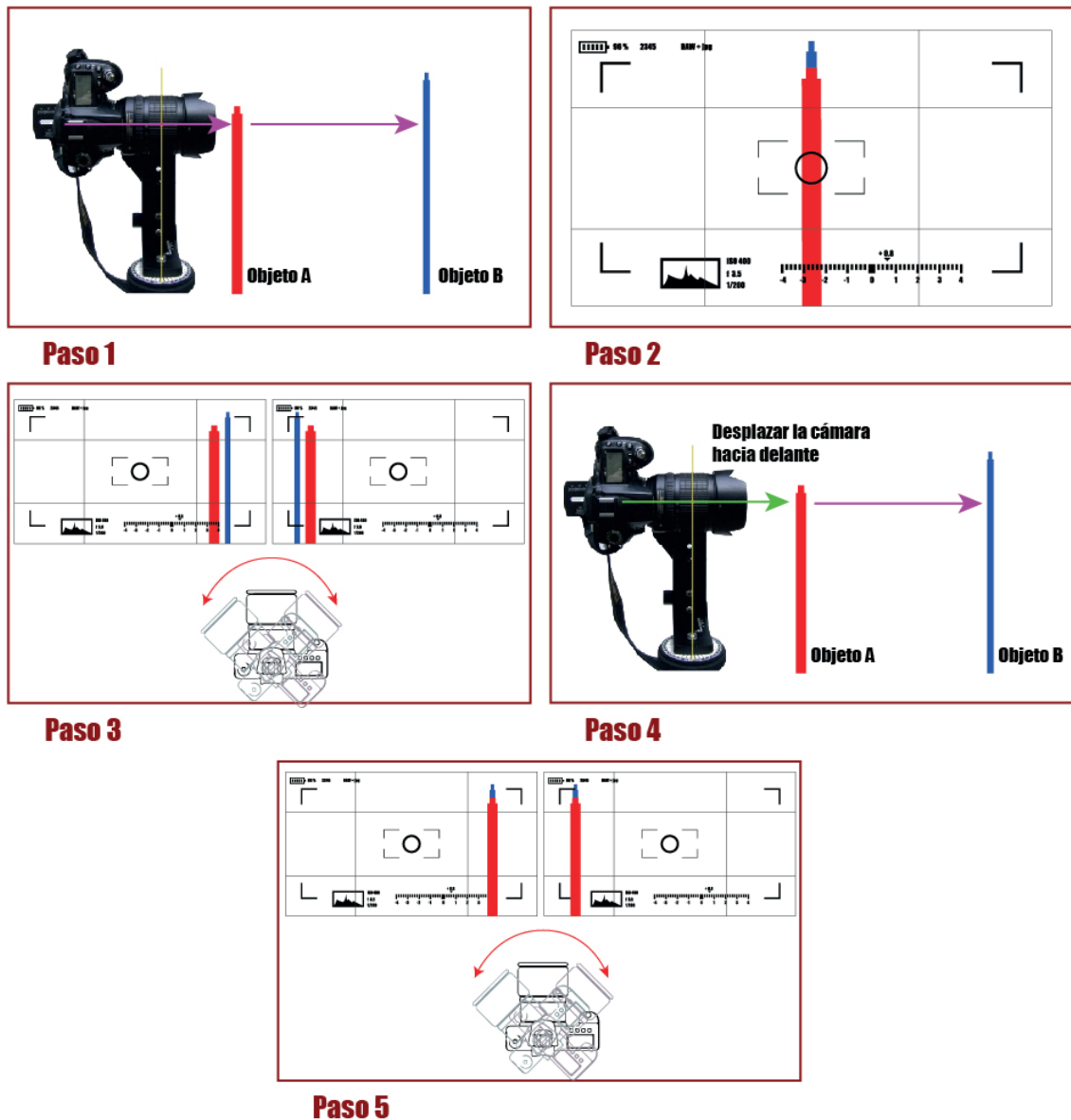


Figura 72. Esquemas del proceso para calcular el punto nodal o de no paralaje. Fuente: elaboración propia

Una vez calculado el punto nodal ya podemos hacer la panorámica pivotando correctamente y consiguiendo unir las fotografías con cualquier programa de montaje de panorámicas sin que existan problemas de cosido (objetos duplicados, superpuestos, fantasmas o directamente errores que hagan imposible la unión).

Necesitamos que las fotografías tengan bastante solape o zonas de superposición para poder detectar puntos homólogos entre ellas y poder realizar el cosido entre las fotografías. Dependiendo de la focal de nuestro objetivo el ángulo de visión será mayor o menor, y con ese dato tendremos que hacer una previsión de las fotografías que necesitaremos realizar para cubrir los 360º completos horizontal y verticalmente.

En nuestro caso he utilizado una cámara Full Frame Nikon D700 y un objetivo AF Nikkor 14 mm f/2.8 D ED, y según las características técnicas el ángulo de visión es de 114º. Con ese ángulo de visión con 4 fotografías podemos cubrir los 360º, pero como tenemos que tener un buen solape

lo mejor es realizar el doble. De esta manera tendremos que realizar un anillo a 30º respecto el plano vertical de 8 imágenes separadas cada 45º en el plano horizontal; otro anillo a -30º respecto el plano vertical de 8 imágenes separadas cada 45º en el plano horizontal, la imagen cenit (parte superior) y la imagen nadir (parte inferior).

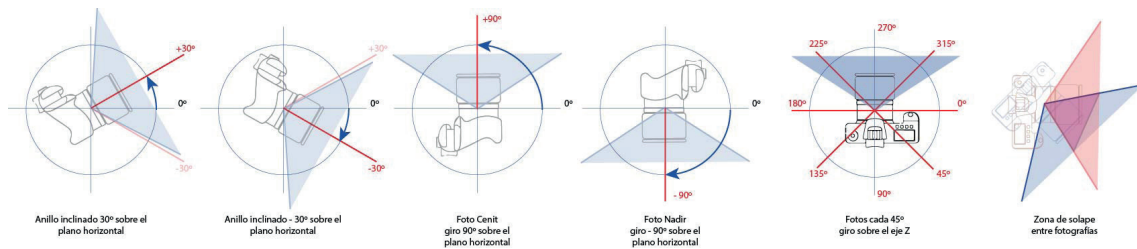


Figura 73. Esquema de giros respecto los diferentes planos para realizar las fotografías de la panorámica esférica. Fuente: elaboración propia



Figura 74. Fotografías necesarias para realizar una panorámica esférica de 360. Fuente: elaboración propia

Para capturar todo el rango dinámico se realizan las fotografías en formato RAW + jpg. En la configuración de la cámara se toma una ISO 100 para tener poco ruido, ajustamos apertura y velocidad. En caso de ser un interior pondremos tiempo de exposición, porque utilizamos trípode y no vamos a tener problemas de movimiento o trepidación. Otro parámetro importante es el enfoque, hay que ponerlo en modo manual y al infinito. Hay que hacer esta configuración para evitar que la máquina enfoque y desenfoca cada vez que hagamos una fotografía, así tenemos un enfoque igual en todas las imágenes. Sobre todo, cuando realizamos las fotos cenit y nadir, ya que si se deja el modo automático la cámara siempre intentara enfocar lo que tiene más cercano (tornillo trípode en el caso del nadir y el techo en el caso del cenit).

Haremos todas las fotografías esféricas que sean necesarias para documentar lo máximo posible nuestro objeto.

Como ha ocurrido con otros casos la fotografía panorámica esférica también ha experimentado una evolución tecnológica, y es que en los últimos años y gracias al empuje de la realidad virtual, han surgido nuevas cámaras de tipo un solo disparo. Estas cámaras llevan múltiples objetivos y permiten con un solo disparo obtener una imagen panorámica esférica completa en segundos. Además, gracias a las apps con las que se manejan se realiza el procesado y cosido de las imágenes de forma automática. La desventaja de estas cámaras es que la calidad de las fotografías es muy inferior a la obtenida mediante el método tradicional. Para conseguir un resultado similar al tradicional es necesario utilizar las cámaras más profesionales que llegan a tener múltiples sensores y objetivos alcanzando resoluciones de hasta 11K.

	Mi Sphere Camera	Ricoh Theta Z1	Insta360 One X	Insta360 Pro	Insta360 Titan
Nº sensores/lentes	2	2	2	6	8
Resolución fotografía (píxeles)	6912 x 3456	7296 x 3648	6080 x 3040	7680 x 7680	10560 x 10560
Dimensiones (mm)	78 x 67 x 24	48 x 132,5 x 29,7	115 x 48 x 28	Ø 143	Ø 228
Peso (gr)	108,3	182	115	1550	5500
					

Tabla 6. Tabla con diferentes tipos de cámaras esféricas de un solo disparo. Fuente: elaboración propia

2.3. Fotogrametría aérea mediante el uso de RPAS

La toma de datos es muy similar a la terrestre, pero en este caso la cámara fotográfica va incorporada a un UAV. La ventaja de esta técnica es que podemos documentar una gran extensión de terreno, superficie elevada o cualquier otro objeto de difícil acceso de forma rápida y sencilla (Saleri et al., 2013). Actualmente para realizar cualquier vuelo con un UAV es necesario cumplir una serie de requisitos legales, además de solicitar permiso a AESA para poder realizar el vuelo (Nuevo Marco Regulatorio Temporal Para Las Operaciones Con Drones, 2014). Es un proceso complejo y a veces por las características del vuelo imposible de realizar ante la denegación de los permisos. Para realizar una planificación de vuelo es necesario utilizar un software de estación de tierra o *Ground Station*.

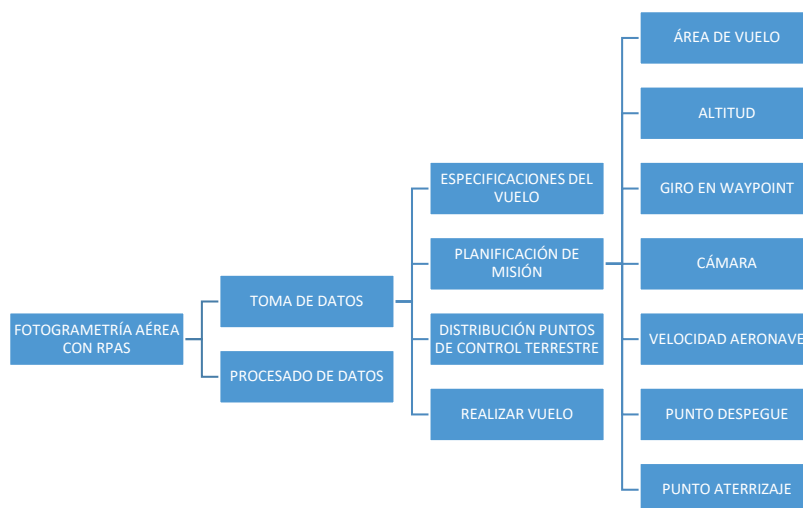


Figura 75. Esquema de pasos a realizar en el proceso de fotogrametría aérea con RPAS. Fuente: elaboración propia

2.3.1. FLUJO DE TRABAJO DE PLANIFICACIÓN DE VUELO

1. Especificar configuraciones de vuelo
2. Importar un mapa preciso y con datos de elevación (opcional)
3. Planificar la misión
4. Distribución de puntos de control terrestre
5. Realizar misión de vuelo
6. Procesado de los datos

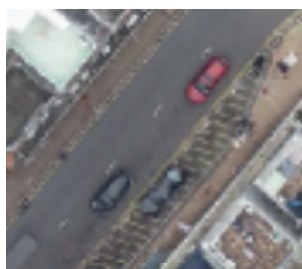
Paso uno: especificar configuraciones de vuelo

Definimos los parámetros de configuración del vuelo:

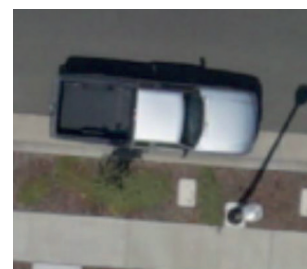
- GSD (huella o distancia de muestreo del suelo). GSD es la resolución espacial de un sensor. Es la distancia medida en centímetros entre los centros de dos píxeles vecinos en la imagen en la superficie del suelo. Los límites de GSD y de área generalmente se definen por la salida deseada (por ejemplo, escala y resolución de mapa digital). El GSD afecta el nivel de detalle de los datos adquiridos. Un GSD pequeño implica un tiempo de vuelo más largo, muchas fotografías a realizar, decenas de horas de procesamiento y archivos de salida más pesados.



50 cm/píxel



15 cm/píxel



3 cm/píxel

Figura 76. GSD que afecta al nivel de detalle de los datos adquiridos. Fuente: <https://www.ugcs.com> [Consultado: 19/05/2020]

- Límites del área de trabajo o estudio. Los límites del área de trabajo se pueden dibujar de forma manual o cargando un archivo KML. En ambos casos se realiza sobre una ortofoto enlazada desde servidores online como Google Maps u OpenStreetMap. Estos límites se pueden definir en modo rejilla cuando la extensión a documentar es grande o modo lineal u orbital si se trata de un objeto de medidas controladas.
- Solapamiento o superposición frontal y lateral de las imágenes. Esta se define en relación a las condiciones del área de estudio y a los requisitos del software de procesamiento de datos. Las configuraciones mínimas de superposición son 60% hacia delante y 30% de superposición lateral. La superposición se puede aumentar para áreas con superficies verticales o superficies visuales muy uniformes. En este paso también se define la altitud del vuelo (el máximo permitido por ley son 120 m) y la velocidad del vuelo.

Paso dos: importar un mapa preciso y con datos de elevación (opcional)

Hay situaciones en el que el vuelo no se realiza sobre una superficie plana, sino que existen fuertes diferencias de nivel. En estos casos es recomendable cargar en el software de planificación mapas más precisos con datos de elevación. Estos se pueden localizar en servidores online. Esto nos va a permitir vuelos más precisos en los que la planificación de vuelo se va a adaptar a la geometría del terreno. Un ejemplo sería la planificación de un vuelo en una ladera de una montaña. Si hacemos una planificación de vuelo a una altura de 50 m, el dron va a despegar subiendo a esa altura y ejecutará todo el trabajo respecto a la altura de despegue en el punto de inicio. Es decir, que, si en el punto más alejado desde el despegue el terreno ha descendido 100 m, la fotografía tomada desde el dron no estará a 50 m del suelo sino a 150 m. Cargando un mapa con datos de elevación, estos serán aplicados a la planificación y el dron adaptará el vuelo a la geometría del terreno, manteniendo siempre la misma altura desde el suelo.

Paso tres: planificar la misión

La planificación de la misión consta de dos etapas:

1. Planificación inicial. El primer paso es especificar el área de estudio. Para ello marcamos los puntos o coordenadas que determinan el perímetro de nuestro objeto de estudio. Esta área se representa con bordes amarillos.

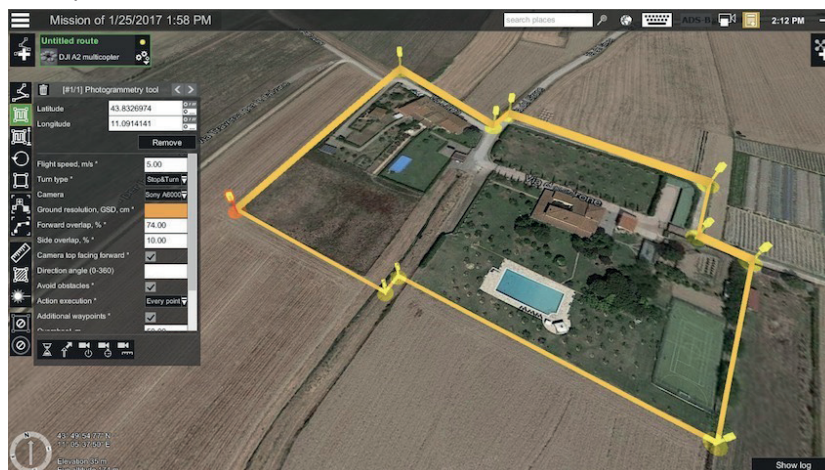


Figura 77. Configuración del área de levantamiento durante la planificación del vuelo

Otra opción es importar los límites del área desde un archivo KML. El segundo paso es configurar la huella o GSD y la superposición de la cámara. Para ello se definen parámetros de altura de vuelo, velocidad del dron, posición de la cámara e inclinación de la cámara.

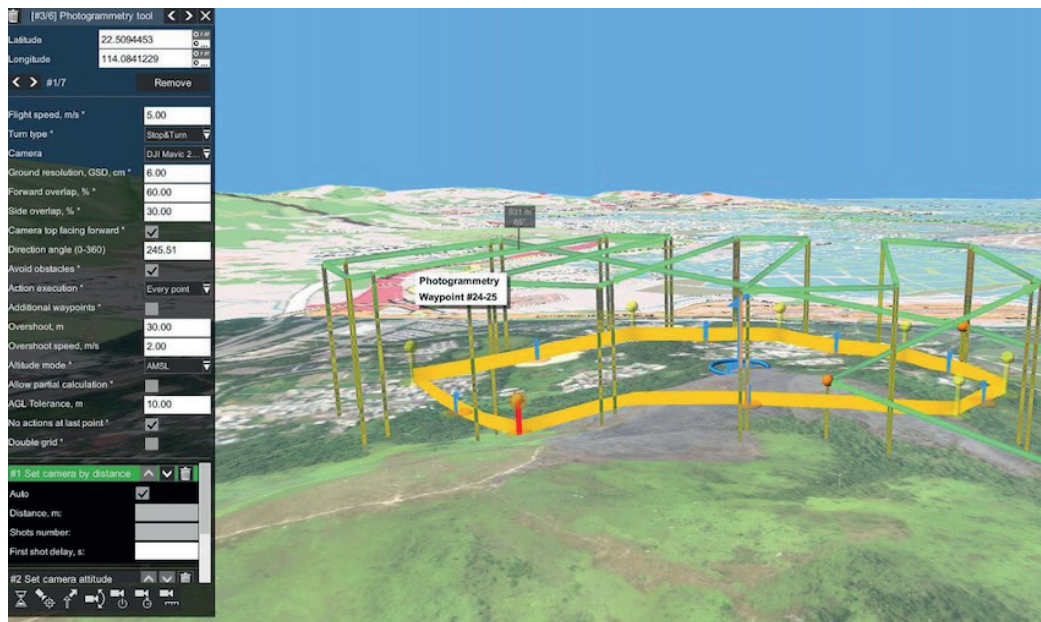


Figura 78. Configuración de superposición y distancia de muestreo del GSD de la cámara

Con estos datos el programa ya es capaz de calcular de forma automática la ruta de fotogrametría, sin embargo, puede que no sea la más óptima o que tenga errores o sea peligrosa para el dron. Por este motivo es necesario comprobar la ruta y realizar un proceso de validación.

2. Validación y ajuste de rutas. El software de planificación genera una trayectoria o ruta que tendremos que cargar en la memoria del dron para que la ejecute. Esta se muestra como una polilínea 3D de color verde donde podemos ir verificando punto a punto los parámetros del plan de vuelo calculado. En la ventana de perfil de elevación se muestran los valores de longitud estimada de la ruta, el tiempo de vuelo, los puntos de la ruta y la altitud máxima y mínima.

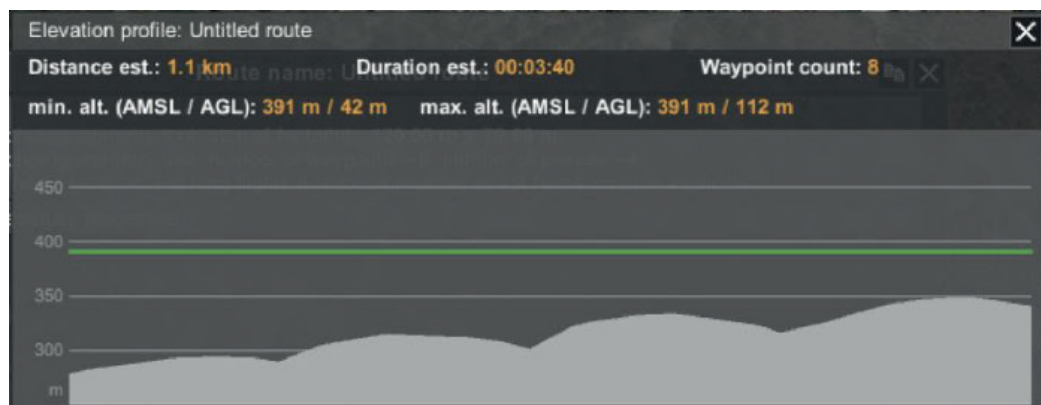


Figura 79. Valores de la ruta mostrados en la ventana Perfil de elevación

Cuando planificamos la misión podemos ajustar varios parámetros relacionados con el vuelo, la aeronave y la cámara. Estos parámetros son:

- Ajuste de altitud. Se puede determinar que use una altitud de vuelo constante sobre el suelo, esto nos va a pasar cuando utilizamos la planificación del vuelo sobre una ortofoto. La ruta de vuelo es constante sin waypoints intermedios. La otra opción es cargar un modelo digital de terreno con datos más precisos, lo que va a permitir al software crear una ruta más ajustada al desnivel del terreno haciendo que la altura de vuelo varíe, pero siempre manteniéndola constante respecto al desnivel del suelo. Para esta última opción lo que hace el software es calcular waypoints intermedios para ajustar la ruta al relieve.

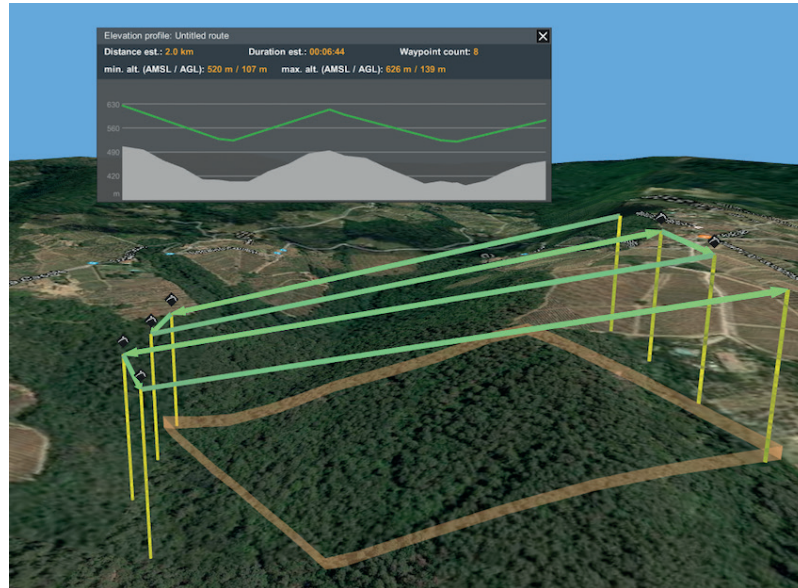


Figura 80. Ruta de vuelo con altura constante sin waypoints intermedios

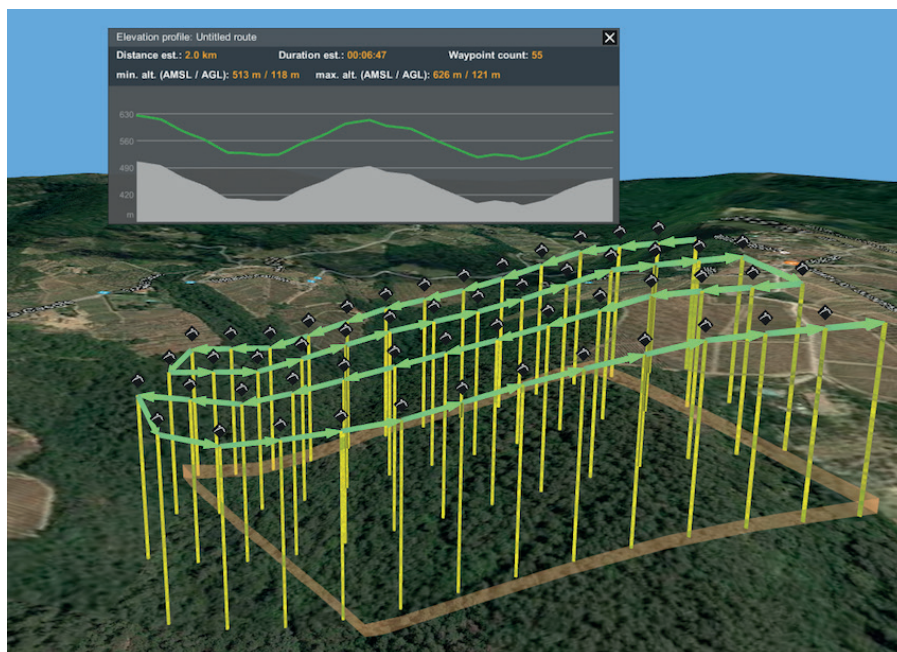


Figura 81. Ruta de vuelo con altura variable con waypoints intermedios ajustando la altitud al relieve del terreno

- Tipos de giro. En cada waypoint se puede determinar la forma de actuar del dron. Existe la opción parada y giro, en la que el dron pasa por el waypoint, se detiene, realiza la captura y gira continuando la ruta hasta el siguiente waypoint. Hay otra opción de punto adaptativo en la que el dron no pasa por encima de los waypoint, sino que adapta su ruta para que sea más suave. Hay una opción en la que la curva es más suave porque la aeronave reduce la velocidad al llegar a la altura del waypoint y otra opción en la que la aeronave no reduce la velocidad al girar y realiza una trayectoria alejada del waypoint de la ruta. Esta última opción puede provocar que se pierda el punto de referencia y no se dispare la cámara.

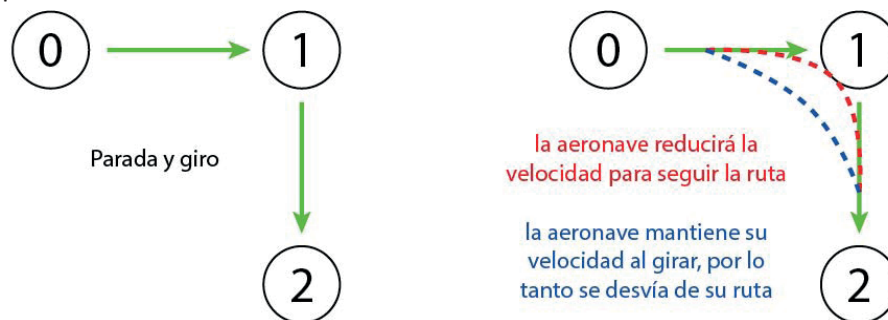


Figura 82. Esquema de trayectorias de tipo de giro en waypoint: parada y giro; y giro adaptativo. Fuente: elaboración propia

- Control de cámara. Se pueden establecer tres acciones diferentes de control de cámara:
 - o Establecer modo de cámara para hacer la toma exactamente en un punto específico.
 - o Configurar la cámara por tiempo para realizar tomas cada N segundos.
 - o Establecer la cámara por distancia para hacer tomas cada N metros

A continuación, se muestran algunas ventajas y desventajas de los tres métodos:

Método de activación disparo fotografía	Ventajas	Desventajas
En posición o Waypoint	Solo se toman fotografías de las ubicaciones planificadas	Se requieren introducir muchos puntos de referencia adicionales. Otro problema es la limitación que existe en algunos software para introducir waypoints
Por distancia	No es necesario introducir muchos puntos de referencia o waypoints, solo los generales. Gran recubrimiento y alta precisión	La precisión depende del tipo de acción o giro y del algoritmo de distancia del piloto automático del dron
Por tiempo	No es necesario introducir muchos puntos de referencia o waypoints	La precisión de este método es difícil de predecir ya que dependerá de la velocidad real del UAV, del viento, la temperatura, el peso de la carga útil, etc.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los métodos de activación del disparo de la cámara. Fuente: elaboración propia

En definitiva, el mejor método de activación de disparo de la cámara es el de distancia para hacer capturas cada N metros.

- **Inclinación de la cámara.** Este es otro parámetro importante y corresponde con el ángulo *Til*. Las necesidades de nuestro trabajo determinarán qué inclinación de cámara utilizar. Cuando necesitamos generar una ortofoto de un terreno o una cubierta o simplemente generar un modelo en 2.5D, la mejor opción es poner la inclinación de la cámara a 90° (perpendicular al suelo). Sin embargo, cuando vamos a realizar un vuelo fotogramétrico para obtener un modelo 3d de un edificio o zona urbana es recomendable poner la cámara oblicua o inclinada unos 45° para poder capturar información de las cubiertas y las fachadas además de aumentar la calidad de la nube de puntos. En estos casos es mejor hacer dos pasadas o trayectorias de vuelo, la primera con una inclinación de 90° y otra con una inclinación de 45°. Esta forma de actuar se llama cuadrícula o rejilla doble.
- **Velocidad.** Cuanto mayor es la velocidad de vuelo, menor es el tiempo de vuelo pero nos permite cubrir una mayor superficie. Pero una velocidad alta en combinación con unos tiempos altos de exposición en la cámara puede producir imágenes borrosas. En la mayoría de los casos una velocidad de 10m/s (36 km/h) es una velocidad adecuada para no tener problemas de fotografías borrosas.
- **Punto de despegue.** Es muy importante verificar el área de despegue antes de realizar el vuelo para comprobar que no existen obstáculos para el despegue. Normalmente cuando se planifica un vuelo todo el proceso se ejecuta de forma automática, incluido el despegue o aterrizaje a no ser que el piloto lo realice de forma manual y luego lance la misión.

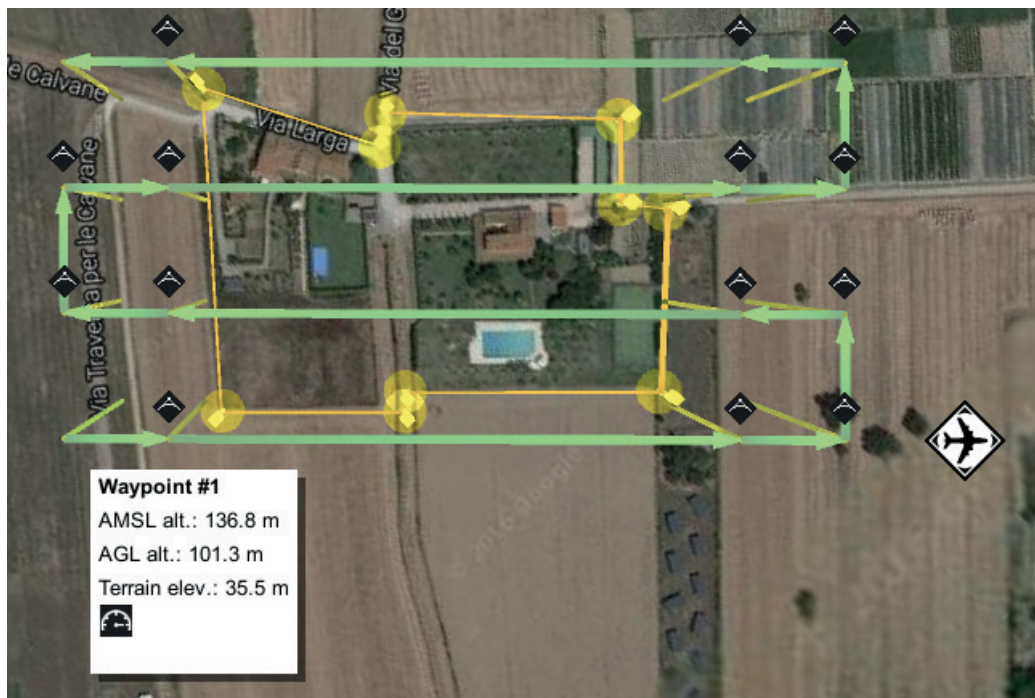


Figura 83. Ejemplo de punto de despegue

La mayoría de los drones en modo de despegue automático ascienden a una altitud baja de entre 3-10 y luego inician la misión volando directamente hacia el primer punto. En esa primera trayectoria existen dos formas de proceder. La primera es que el dron sigue subiendo en vertical hasta la altura de trabajo marcada en la planificación del vuelo y luego avanza en horizontal hasta el primer waypoint. La segunda forma de proceder es que el dron se dirige hacia el primer waypoint avanzando y ascendiendo de forma simultánea realizando una trayectoria oblicua. De estas dos opciones la primera es la más segura, ya que si en esa trayectoria existen árboles, edificios, líneas de alta tensión o cualquier otro obstáculo el dron podría colisionar.

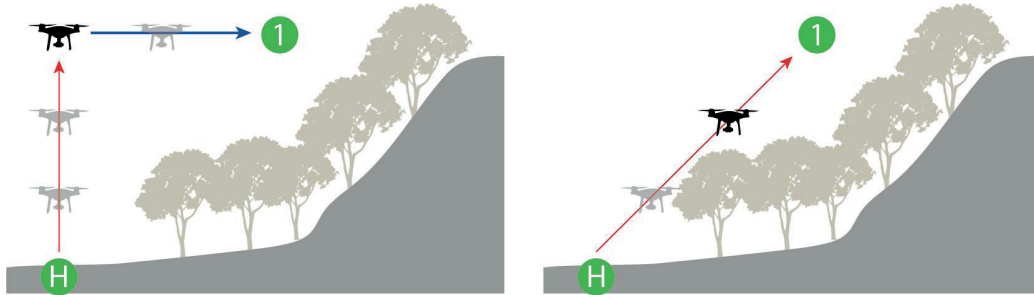


Figura 84. Esquema de formas de despegue de vehículo aéreo no tripulado. Fuente: elaboración propia

La mayoría de los UAV utilizan la altitud relativa para la planificación de la misión y es en la zona de despegue donde la toman y establecen para todo el trabajo. Por este motivo el punto de despegue debe de estar lo más cerca posible del primer punto de ruta y en el mismo nivel de terreno. Si despegamos en la zona más baja del área de trabajo, el dron tomará esa altura relativa para todo el vuelo y puede ocurrir que en el punto más alejado el terreno ascienda haciendo que la distancia entre el suelo y el dron se reduzca hasta el punto de poder colisionar. Sin embargo, si despegamos desde la parte más alta del área de trabajo, si en la dirección del punto más alejado el nivel del terreno ha ido disminuyendo, la distancia entre el dron y el suelo irá aumentando. En ambos casos el encuadre de las fotografías será variable, lo que no producirá la huella de píxel o GSD que habíamos planificado. La solución a este problema es realizar el despegue desde un punto intermedio en la altura de nuestra área de trabajo o cargar un modelo de terreno con datos de elevaciones para que a la hora de hacer la planificación el software vaya adaptando el vuelo a la geometría del terreno.

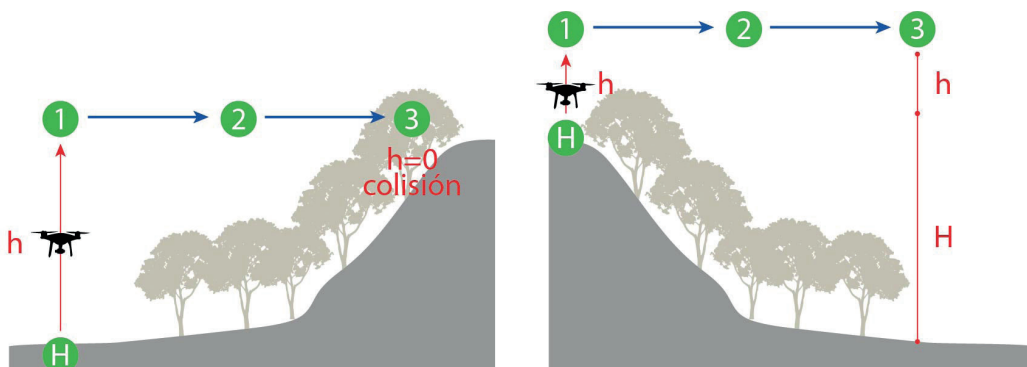


Figura 85. Esquema de relación entre la altura de despegue y de vuelo. Fuente: elaboración propia

Es recomendable colocar el primer punto de ruta lo más cerca posible del punto de despegue y especificar una altitud de despegue segura. Esta altura aproximadamente serán unos 30 m. Con esa altura estaremos por encima de cualquier obstáculo en la mayoría de situaciones. Habrá otras situaciones en la que esta altura de seguridad tendrá que ser mayor (ciudades, parques eólicos, etc.). Esta es la forma de garantizar un despegue seguro para cualquier misión y mantenerse a salvo de cualquier comportamiento extraño de los drones, actualizaciones de firmware impredecibles, etc.



Figura 86. Ejemplo de planificación de ruta de despegue seguro

- Punto de aterrizaje. Si no se agrega ningún punto de aterrizaje fuera del área de trabajo, el dron volará y se mantendrá en el último punto de ruta. Hay dos opciones de aterrizaje:
 - o Tomar el control manual del dron y pilotarlo hasta el punto de aterrizaje.
 - o Activar la opción Regreso a Casa en el software de planificación o desde el mando de control del aparato.

Cuando el área de trabajo es grande o surge algún problema con el mando de control puede producirse una pérdida de señal de comunicación entre el mando y el dron. En este caso, pueden producirse dos situaciones según el dron y su configuración:

1. El dron regresará automáticamente a la ubicación de inicio (punto de despegue) automáticamente si se pierde la conexión de radio con la estación de tierra.
2. El dron volará hasta el último waypoint y se mantendrá suspendido en esa posición. Si la carga de la batería es suficiente el dron realizará un aterrizaje de emergencia o intentará regresar a la ubicación de inicio (punto de despegue).

Por este motivo es recomendable agregar un punto de aterrizaje en la ruta para evitar depender de un comportamiento o configuraciones impredecible del dron. En el caso de que el dron no disponga de aterrizaje automático el último punto de la ruta se establecerá a una altura segura y sobre el punto de aterrizaje.

Paso cuatro: distribución de puntos de control terrestre

Este paso consiste en distribuir en la zona de trabajo una serie de dianas que aparecerán en las fotografías que realicemos durante el vuelo y que servirán para aplicar un sistema de coordenadas global al modelo tridimensional que generemos en el procesado de los datos. Estas dianas serán de un material que aguante en la intemperie y de gran tamaño para que sean legibles desde la altura de vuelo del trabajo. Son dianas que tendrán unas dimensiones mínimas de 60 x 60 cm. Una vez distribuidas se procederá a tomar sus posiciones mediante herramientas de topografía (estaciones totales y gps).

Aunque los programas de procesamiento de datos como Agisoft Metashape, Pix4D, RealityCapture, etc. son capaces de generar modelos precisos utilizando las imágenes geotiquetadas del dron es necesario utilizar puntos de control terrestre para conseguir una precisión más exacta y real.

Antes este paso era obligatorio, pero actualmente se están comercializando nuevos drones que incorporan sistemas RTK que permiten realizar vuelos fotogramétricos sin utilizar puntos de control terrestre.



Figura 87. Dron DJI Phantom 4 equipado con sistema RTK. Fuente: www.dji.com [Consulta: 11/10/2020]

Un sistema RTK (*Real Time Kinematic*) o navegación cinética satelital en tiempo real, es un sistema avanzado de posicionamiento y navegación satelital que utiliza una estación base terrestre como referencia de posición secundaria que ofrece precisión centimétrica. La conexión entre los satélites, la base y el dron es continua por lo que es capaz de registrar su posición real y exacta durante todo el vuelo. Este sistema puede estar integrado en la aeronave o ser adquirido como un accesorio para ser montado en el dron.

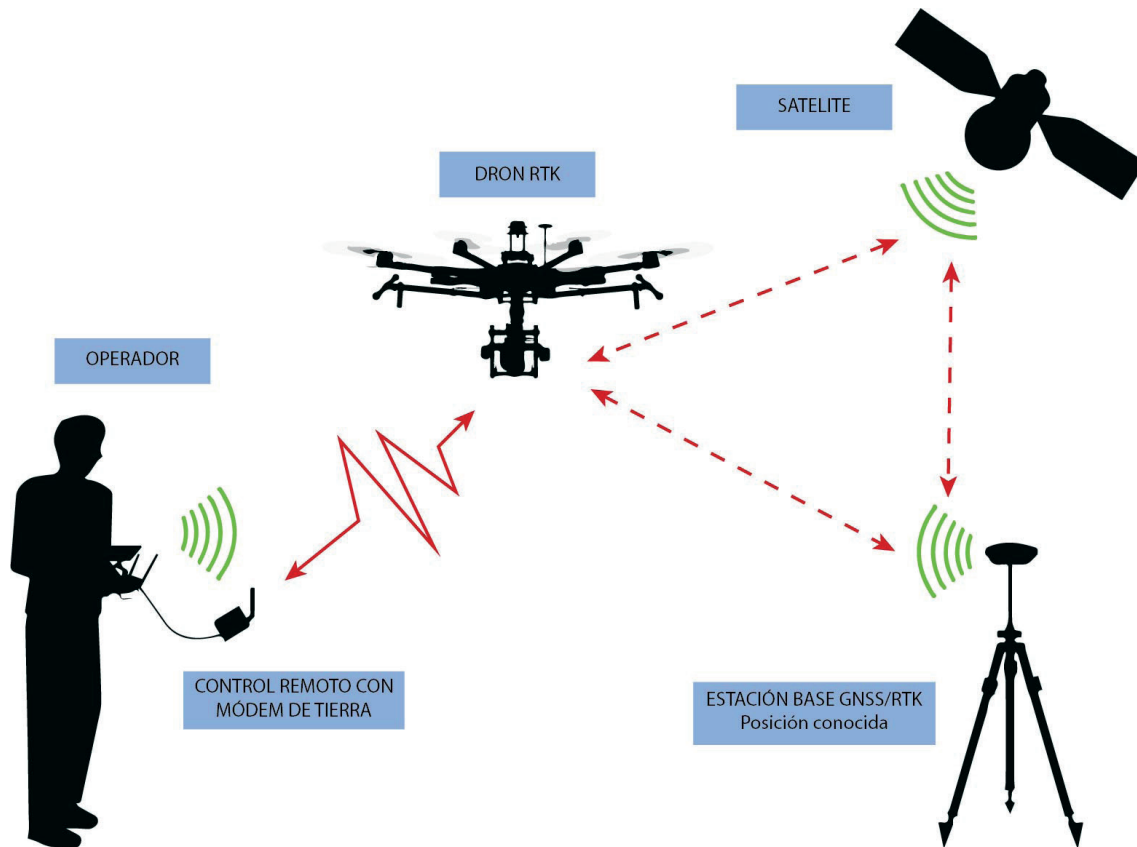


Figura 88. Esquema de funcionamiento de sistema RTK. Fuente: elaboración propia

Paso cinco: realizar misión de vuelo

En la actualidad todos los vuelos con UAV están regulados por una normativa nacional y europea que deberemos cumplir en todo momento. Además, tendremos que tener toda la documentación en regla, como es estar en posesión de una licencia de vuelo, ser operador de vuelo registrado en AESA, disponer de seguro de responsabilidad civil o tener registrado el dron.

Según indica el Ministerio del Interior²³ la ejecución de las operaciones por aeronaves pilotadas por control remoto (UAS) sobre aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado y fuera de una zona de información de vuelo (FIZ), únicamente se podrán realizar cuando su masa máxima al despegue no exceda de 10 kg, se efectúe dentro del alcance visual del piloto (VLOS), a una distancia horizontal máxima del piloto de 100 m, y a una altura máxima sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m), o sobre el obstáculo más alto situado dentro de un radio de 600 m desde la aeronave y, además de otras medidas de seguridad y autorizaciones pertinentes, requerirá una comunicación previa al Ministerio del Interior con un plazo mínimo de **diez días de antelación respecto a la operación**, con el fin de que las autoridades competentes en materia de seguridad pública en el ámbito territorial de la operación, puedan valorar la limitación o prohibición de su realización cuando exista la posibilidad de graves riesgos para la protección de personas o bienes. Los operadores que deseen efectuarlas deberán rellenar el formulario de comunicación de la operación y remitirlo a través de la Sede Electrónica del Ministerio del Interior.

23 <http://www.interior.gob.es/es/web/servicios-al-ciudadano/comunicacion-uas>

Con el permiso concedido y con la misión ya planificada solo hay que realizar varias comprobaciones previas antes de iniciar el vuelo, como son revisar que todos los parámetros del vuelo están bien, revisar el dron para asegurarnos que está todo correcto, revisar el entorno de la zona de despegue y aterrizaje, y si todo está correcto proceder a lanzar la misión e iniciar el vuelo.

Paso seis: procesamiento de los datos

En este paso se realiza el procesamiento de las imágenes capturadas con el dron en aplicaciones específicas como Agisoft Metashape, Pix4D, RealityCapture u otros programas. Estos programas nos permitirán generar a partir de las fotografías nubes de puntos densas, modelos 3d precisos, modelos digitales del terreno, ortofotos, etc.

3. PROCESADO O REGISTRO DE LOS DATOS

Una vez que tenemos recopilados todos los datos el siguiente paso es realizar el procesamiento para obtener una nube de puntos del conjunto o modelo 3d de nuestro objeto de estudio. Dependiendo de si hemos utilizado escáner láser o fotogrametría el método de procesamiento será diferente. Vamos a tener tres opciones de procesamiento:

1. Documentación con escáner láser. Obtenemos un modelo de gran precisión geométrica, pero de poca calidad de color, ya que las cámaras que incorporan los escáneres tienen poca resolución y los sensores de las cámaras son muy pequeños, por lo que la definición es baja. Además, no existe un control completo en los parámetros de captura de color ya que en la mayoría de los casos los valores se establecen de forma automática.
2. Documentación con fotogrametría. Obtenemos un modelo de mucha calidad de color y una buena geometría. Para que tenga una gran precisión es necesario realizar las fotografías con mucho detalle. Por ejemplo, no es lo mismo realizar las fotografías a una distancia de cinco metros del objeto que a menos de uno.
3. Documentación híbrida: escáner láser + fotogrametría. En este caso utilizamos los datos del escáner láser para la geometría y la fotogrametría para la textura o color. Para poder combinar ambos necesitaremos marcar unos puntos de registro comunes en los dos modelos.

3.1. Escáner láser

De la toma de datos realizada con el escáner láser vamos a tener un archivo de nube de puntos de cada posición de escaneo que hayamos realizado. Todas estas nubes de puntos tendremos que procesarlas realizando un alineamiento entre ellas para conseguir un modelo completo del objeto de estudio. Dependiendo del escáner láser utilizado utilizaremos un programa específico, ya que cada casa comercial tiene su propio software para procesar las nubes de puntos. Por ejemplo, los modelos de Faro utilizan el software Faro Scene²⁴, los modelos de Leica utilizan el software Leica Cyclon Register 360²⁵ o los modelos de Trimble el software RealWorks²⁶. Es necesario utilizar sus propios software ya que los archivos que genera cada escáner láser son nubes

²⁴ <https://www.faro.com/en/Products/Software/SCENE-Software>

²⁵ <https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360>

²⁶ <https://es-la.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-realworks>

de puntos pero con formatos propios, por ejemplo los archivos de FARO tienen extensión *.fls, los archivos de Leica tienen extensión *.PTX y los archivos de Trimble tienen extensión *.tbf. Una vez que hayamos realizado el procesado o registro de los archivos podremos exportarlos en formatos más comunes y legibles para otros programas. Los formatos universales de nubes de puntos pueden ser *.E57, *.LAS, *.LAZ, *.PTS o *.XYZ.

Existen algunos programas que mediante la instalación de plugins permiten cargar estos archivos de forma nativa, por ejemplo el software de Polyworks²⁷.

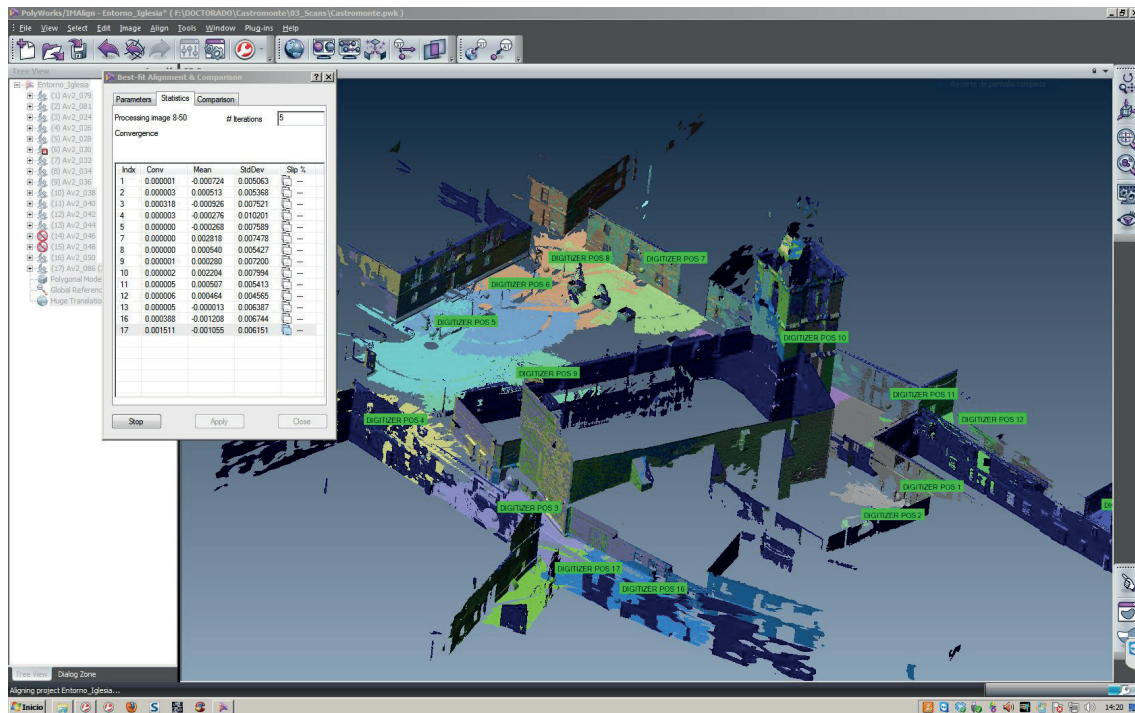


Figura 89. Registro de nubes de puntos de escáner Faro (FLS) en el software de Polyworks. Fuente: elaboración propia

La forma de trabajar con todos estos programas es muy similar, pero en esta metodología nos vamos a centrar en Faro Scene que es el software que hemos utilizado en los casos de uso ya que en el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica, en donde he realizado todos estos procesos, tienen licencia.

Cuando ejecutamos el programa Faro Scene nos muestra una pantalla de trabajo que está dividida en cuatro zonas:

- Barras de menú (1). Contiene todos los menús para el funcionamiento general del programa.
- Barra de herramientas (2). Acceso rápido a todas las herramientas del programa que se pueden utilizar. Muchas otras opciones se muestran cuando seleccionamos un objeto y pulsamos el botón derecho del ratón.
- Vista de la estructura de espacio de trabajo (3). Muestra la estructura de trabajo incluyendo las subcarpetas y los objetos utilizados en el proyecto (nubes de puntos, puntos de control, referencias, imágenes, modelos 3d, bases topográficas, etc).

27 <https://www.innovmetric.com/es/products/products-overview>

- Ventana de exploración o trabajo (4). Ventana de trabajo. Las visualizaciones pueden ser en vista rápida, vista plana detallada o vista 3D.
- Barra de estado (5). Muestra los detalles de los comandos y de los puntos de escaneo, los consejos de la herramienta y las respuestas al último comando ejecutado.

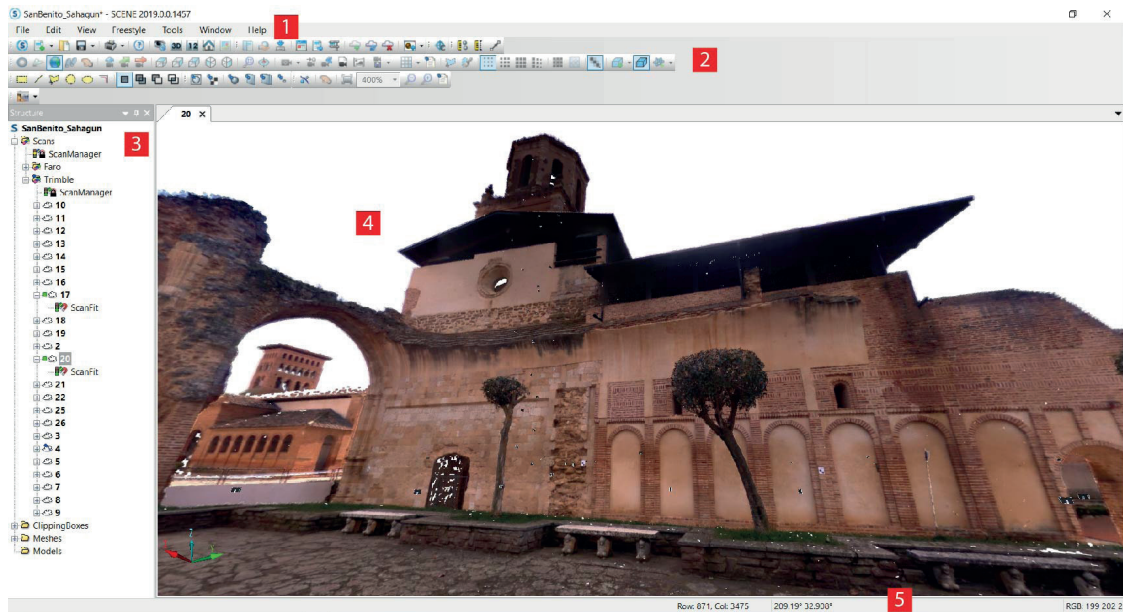


Figura 90. Pantalla de trabajo de Faro Scene. Fuente: software Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]

Para empezar, podemos crear un espacio de trabajo (*.fws) o un proyecto (*.Isproj). La diferencia entre ellos radica en la organización y que en el proyecto se pueden realizar cosas que en el espacio de trabajo no, por ejemplo, generar una nube de puntos de proyecto. La nube de puntos del proyecto está formada por los puntos de todos los escaneos dentro de su proyecto de escaneo y puede considerarse como una nube de puntos completa del proyecto de escaneo completo homogeneizada. Normalmente se crea a partir de todos los escaneos individuales del proyecto después de haberlos preprocesado, coloreado y registrado.

El flujo de trabajo en Faro Scene se puede definir en los siguientes pasos:

- Preparación del proyecto de escaneo. Es la parte en la que se configura el proyecto y su estructura.
- Importar datos de escaneo. Paso en el que se importan todos los escaneos realizados dentro del proyecto.
- Procesado de los datos. Es el tratamiento previo de los datos antes de proceder al registro. Dentro de este paso realizaremos un filtrado de puntos para eliminar puntos malos; eliminación manual de puntos de escaneo que no forman parte de nuestro objeto de trabajo ya que el escáner FARO Focus 3D recopila toda la información en el entorno del escáner; identificación de objetos o referencias que nos servirán para el registro de los escaneos y coloreado de los puntos.
- Registro de los escaneos. Paso en que realizamos el alineamiento entre las diferentes nubes de puntos.
- Exportación de los datos en diferentes formatos.

FLUJO DE TRABAJO PROCESADO DE DATOS ESCÁNER LÁSER	1. PREPARACIÓN DE PROYECTO DE ESCANEEO	
	2. IMPORTAR DATOS DE ESCANEEO	
	3. PROCESADO DE LOS PUNTOS	Filtrado de puntos
		Eliminación manual de puntos
		Identificación de objetos o referencias
		Coloreado de puntos
	4. REGISTRO O ALINEAMIENTO DE LAS NUBES DE PUNTOS	
	5. EXPORTACIÓN DE LOS PUNTOS DE ESCANEEO	Nubes de puntos individuales orientadas
		Nube de puntos completa
		Ortofotos
Webshare		

Tabla 8. Esquema del flujo de trabajo del registro de puntos en Faro Scene. Fuente: elaboración propia

3.1.1. PREPARACIÓN DE PROYECTO DE ESCANEEO

Para crear un nuevo proyecto tenemos que indicar ubicación en nuestro disco duro para los archivos y nombre del proyecto. Esta carpeta se estructurará de la siguiente forma:

- Carpeta RawScans: Contiene una copia del estado inicial de todos los escaneos del proyecto de escaneo. Cada escaneo se mantiene en el estado en que se encontraba cuando se añadió al proyecto. Es como una copia de seguridad de los datos de escaneo originales.
- Carpeta Revisions: Todas las revisiones del proyecto de escaneado se guardarán en esta carpeta. Una revisión típica puede contener las siguientes carpetas de datos:
 - 3PointData: Aquí se almacenan los datos de la nube de puntos del proyecto.
 - 3Escaneos: Aquí se almacenan las nubes de puntos de escaneo.
 - Exploraciones: Contiene todas las exploraciones con datos puntuales modificados.
 - ScansMeta: Contiene información sobre los cambios de transformación de las exploraciones.
 - Datos WebShare: Contiene todos los datos que se generan exclusivamente para WebShare. Es un sistema para compartir toda la información del proyecto vía online.
- Carpeta WorkspaceData: Datos de espacios de trabajo locales guardados en la carpeta del proyecto de escaneo.

RawScans	29.01.2014 13:17
Revisions	04.03.2014 11:22
WorkspaceData	18.10.2013 16:41
@description.txt	22.01.2014 11:53
@georeference.txt	22.01.2014 11:53
@keywords.txt	22.01.2014 11:53
@preview.jpg	22.01.2014 11:23
3D_View.jpg	22.01.2014 11:23
dataResult.txt	21.01.2014 12:58
ScanProject.fpr	22.01.2014 13:54
TowerBridge.csv	19.10.2013 11:16
TowerBridge.Isproj	22.01.2014 11:53

Figura 91. Estructura de la carpeta de proyecto de Faro Scene. Fuente: Manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]

3.1.2. IMPORTAR DATOS DE ESCANEEO

Cuando realizamos los escaneos estos se guardan en la tarjeta SD en carpetas independientes y dentro se distribuyen con una estructura de archivos en la que toda la información del escaneo está codificada y el archivo *.fls se muestra sin datos. Lo primero que hará Faro Scene cuando hayamos importado estos archivos será compilar toda esa información codificada dentro del archivo *.fls.

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Bitmaps	02/03/2021 20:04	Carpeta de archivos	
Scans	02/03/2021 20:04	Carpeta de archivos	
.classid	01/01/2002 0:17	Archivo CLASSID	1 KB
Isabelas000.flis	02/03/2021 20:12	Laser Scan	0 KB
Main	01/01/2002 0:17	Archivo	69 KB

Figura 92. Estructura de la carpeta de escaneo Faro Scene. Fuente: Manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]

Para importar estas carpetas podemos seleccionarlas y arrástralas dentro del programa o desde el menú Archivo/Importar. Una vez importados los archivos es aconsejable guardar el proyecto para que se realice la transformación legible de los archivos *.fls. Estos archivos se guardarán en la carpeta RawScans del proyecto. En la vista de estructura de proyecto organizaremos todos estos en carpetas de escaneo según las zonas o espacios de nuestro objeto de estudio. Por ejemplo, en un edificio esta estructura puede ser una carpeta de escaneos para el exterior y otra carpeta de escaneos para el interior, y en interior varias subcarpetas con los escaneos por plantas. Si visualizamos los escaneos recién cargados podemos observar que todos los escaneos están en un sistema de coordenadas locales y están ubicados en la coordenada 0,0,0 ya que el escáner otorga como posición a cada escaneo el centro del espejo rotativo.

3.1.3. PROCESADO DE LAS NUBES DE PUNTOS

La toma de datos con el escáner láser es una captura de datos masiva, el escáner captura toda la información que hay alrededor sin despreciar nada, por lo que es necesario realizar un procesado previo de los datos antes de proceder al registro o alineamiento de las nubes de puntos. En este proceso eliminaremos puntos que muestren errores o sobrantes de nuestro objeto de estudio.

Tenemos dos posibilidades de procesar las nubes de puntos, de modo manual en el que vamos realizado todos los pasos de uno en uno o de forma automática en la que realiza todos los pasos de forma seguida.

Procesado de datos manual

Paso 1. Filtrado de los puntos

En el método manual el primer paso será realizar un filtrado de los puntos para quedarnos con los de mejor calidad. Seleccionando cada escaneo o una carpeta de escaneo y pulsando botón derecho del ratón seleccionamos el menú Operaciones/Filtrado de puntos y podemos usar varias opciones:

- **Stray.** Filtro para eliminar los puntos de escaneo extraviados o dispersos resultantes de golpear dos objetos con el haz láser o no golpear ninguno, por ejemplo el cielo. Es muy adecuado para corregir las mediciones incorrectas sobre todo en bordes.

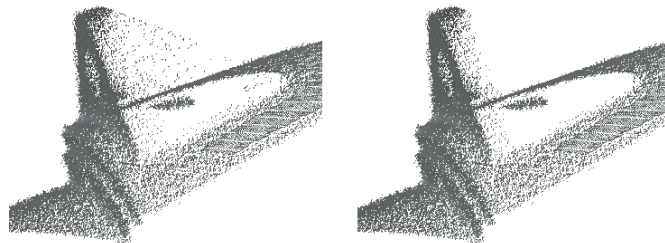


Figura 93. Ejemplo de eliminación de puntos con el filtro Stray. Fuente: manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]

- **Basado en la distancia.** Filtro para eliminar puntos de escaneo en un determinado rango de distancia desde la posición del escáner.
- **Puntos de escaneo oscuros.** Filtro para eliminar los puntos de escaneo con demasiado ruido. La selección se basa en el valor de reflexión de los puntos oscuros. Estos puntos se generan sobre todo en las superficies reflectivas que no devuelven al escáner una señal limpia generando ruido.
- **Smooth.** Filtro para minimizar el ruido en las superficies. No elimina puntos de exploración, sino que altera su posición. Este filtro no es recomendable aplicarlo sobre escaneos muy detallados ya que el filtro tendrá un efecto de suavizado que nos mostrará menos información.

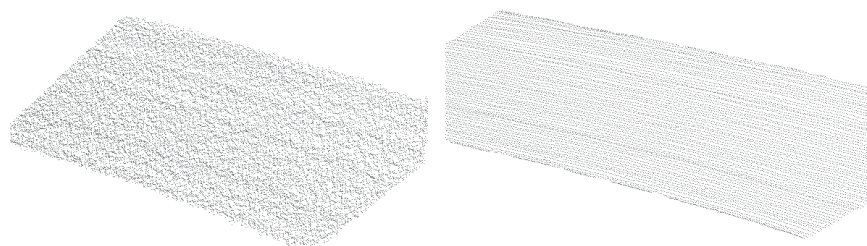


Figura 94. Ejemplo de aplicación del filtro Smooth. Fuente: manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]

Paso 2. Eliminación de puntos de los escaneos

El segundo paso será la eliminación de puntos de los escaneos que no sean necesarios para el registro. Por ejemplo, si hemos realizado escaneos del exterior de un edificio, podremos eliminar puntos de edificios colindantes, personas, vehículos o vegetación. En el caso de que no hayamos utilizado referencias externas o dianas durante el proceso de toma de datos, es aconsejable no eliminar los puntos para poder utilizarlos para el registro general.

Para poder hacer esta eliminación de puntos podemos realizarlo desde la ventana de exploración. Para ello podemos visualizar los escaneos de tres formas diferentes. Estas opciones las podemos elegir pulsando con el botón derecho sobre un escaneo de la ventana de exploración del proyecto en la opción Vista.

- **Vista rápida o Quick View:** La vista de escaneo estándar para examinar escaneos individuales. Para ello, no es necesario cargar el escaneo. La visualización solo se puede realizar desde la posición del escáner y el campo de visión no puede superar los 180°. Podemos realizar mediciones sobre esta vista.



Figura 95. Visualización de un escaneo mediante la opción Vista rápida. Fuente: elaboración propia

- **Vista plana o Planar View:** Se utiliza para examinar escaneos individuales. La representación es una imagen equirectangular o panorámica esférica desplegada. La visualización solo se puede realizar desde la posición del escáner. Podemos realizar mediciones sobre esta vista.



Figura 96. Visualización de un escaneo mediante la opción Vista plana. Fuente: elaboración propia

- **Vista 3D:** Nos permite ver los puntos de escaneo de un solo escaneo o la visualización combinada de todos los escaneos. La visualización se puede realizar desde cualquier posición.



Figura 97. Visualización de un escaneo mediante la opción Vista 3D. Fuente: elaboración propia

Una vez dentro de estas vistas utilizaremos las herramientas de selección para seleccionar los puntos que no queremos y poderlos eliminar. La eliminación de puntos es más sencilla de realizar en la vista rápida y la vista 3d, ya que no existen deformaciones en la visualización como ocurre en la vista plana.

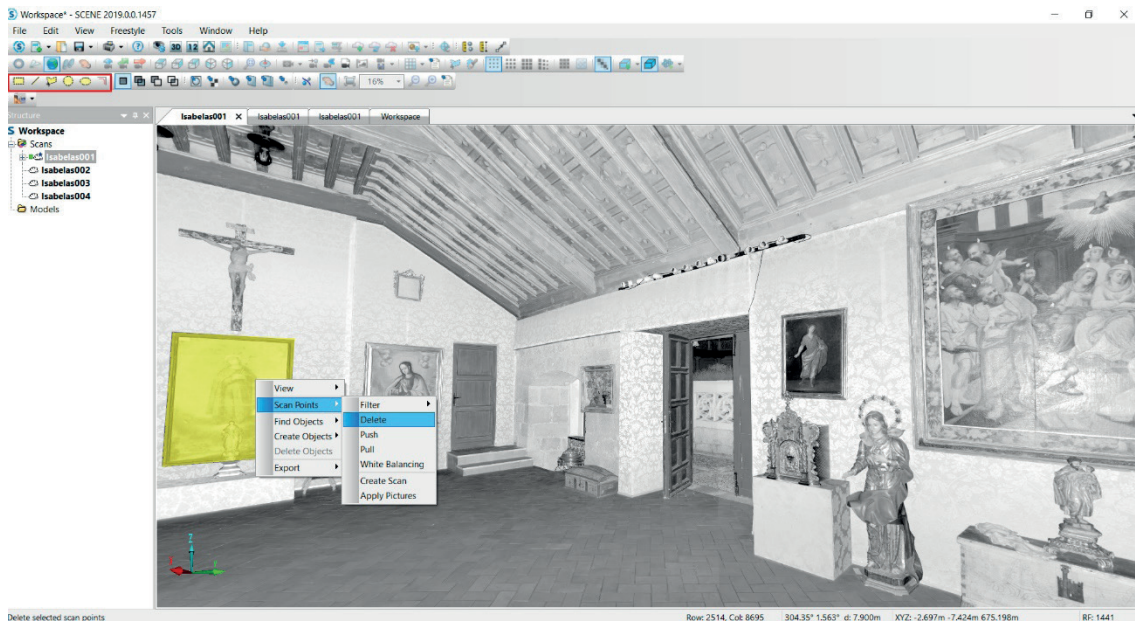


Figura 98. Selección de puntos en la vista rápida para realizar su eliminación. Fuente: elaboración propia

Este es un paso en el que tenemos que estar seguros, ya que una vez eliminados los puntos no podemos aplicar la función deshacer. Para recuperar los puntos eliminados es necesario importar de nuevo el escaneado original.

Paso 3. Identificación de objetos o referencias (dianas)

El tercer paso es la Identificación de objetos o referencias, es un paso en el que realizaremos la detección de las referencias artificiales (dianas tipo ajedrez o esferas) que hayamos utilizado en la toma de datos. En el caso de que no hayamos utilizado dianas podremos utilizar, como referencias naturales, elementos característicos de la geometría de nuestro objeto de estudio como pueden ser puertas, ventanas, grietas, planos, tuberías, etc.

Para que las referencias artificiales se puedan detectar bien en los escaneos es recomendable cumplir una serie de condiciones según el manual de Faro Scene²⁸:

Normas generales

- Los mejores objetos de referencia son las esferas y las dianas tipo ajedrez.
- Si se usa cualquier otro tipo de objeto de referencia tiene que tener una superficie no reflectante.
- Si utilizamos dianas impresas en papel tiene que ser con impresora láser.
- Tienen que ser fácilmente detectables y bien visibles en los escaneos.
- No deben de colocarse de forma simétrica. Deben de colocarse de forma poligonal alrededor de escáner a distancias variables y a diferentes alturas.
- Los parámetros de escaneo (resolución y calidad) y las condiciones del entorno (iluminado por el sol, nublado, en interiores, etc.) influyen en la detección de los objetos de referencia, por lo que estos no pueden estar demasiado alejados del escáner.

28 https://es-knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/User_Manual_for_SCENE

- Si los objetos de referencia no pueden colocarse a una distancia óptima del escáner, la solución es aumentar la resolución del escaneo o aumentar el tamaño de los objetos.
- La distancia entre las dianas no puede ser inferior a 1 m.

Dianas tipo tablero ajedrez

- El ángulo de incidencia entre el rayo láser y la diana no puede ser inferior a 45°.
- Dependiendo de la resolución del escaneo, la detección automática de dianas tipo ajedrez puede dejar de ser fiable a cierta distancia del escáner. Por ejemplo, cuando se utilizan este tipo de dianas en un tamaño de A4 y se escanea a una resolución de $\frac{1}{4}$ la distancia del escáner no puede ser superior a 15 m. Se puede escanear a mayores distancias si se aumenta la resolución del escaneo o el tamaño de la diana. La experiencia obtenida con todos los casos de estudio realizados me ha permitido determinar que la distancia idónea entre escaneos está entre los 15-20 m, tanto si se usan referencias artificiales como naturales.
- Para que puedan reconocerse necesitan tener suficientes puntos de escaneo sobre la diana, mínimo cuatro o más puntos por cada cuadrante.
- Este tipo de dianas tienen que colocarse obligatoriamente sobre superficies planas, nunca sobre superficies curvas.

Dianas tipo esfera

- Deben de ser totalmente visibles en el escaneado, hay que evitar que estén parcialmente cubiertos por otros objetos. Su visión parcial puede introducir errores de precisión.
- En Faro Scene tenemos que introducir el valor del diámetro de las esferas utilizadas para que el programa sea capaz de detectarlas. Esto se hace en la pestaña *Match Sphere Settings* a través de los menús *Tools/Options/Matching/Match Sphere Settings*.
- La resolución del escaneo y la distancia al escáner también afecta en su detección automática. Por ejemplo, cuando se escanea con una resolución de $\frac{1}{4}$ y se utilizan esferas de un diámetro de 145 mm, la distancia al escáner no puede ser superior a 18 m. Con esferas de 200 mm podremos aumentar la distancia hasta los 45 m. Una esfera para ser detectada tiene que tener como mínimo 60 puntos de escaneo en su superficie.

Para detectar referencias naturales utilizaremos las herramientas de detección de objetos geométricos. Tenemos las opciones de:

- Punto de damero. El ajuste se hace por el centro de los cuatro cuadrantes.
- Punto medio de contraste. En las dianas tipo círculo blanco sobre fondo negro, el punto medio del círculo se utiliza para el registro.
- Esfera. Se determina por su posición y radio. El ajuste puede ser por radio variable que se calcula de forma automática en la exploración o de radio preestablecido.
- Plano. Se crea a partir de una selección de puntos, se pueden utilizar suelo, techos o paredes.
- Losa. Este se utiliza cuando queremos alinear dos escaneos de lados opuestos de una pared
- Punto. Es el más sencillo y consiste en picar sobre un punto del escaneado.



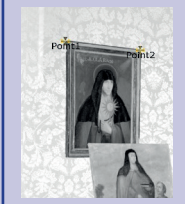



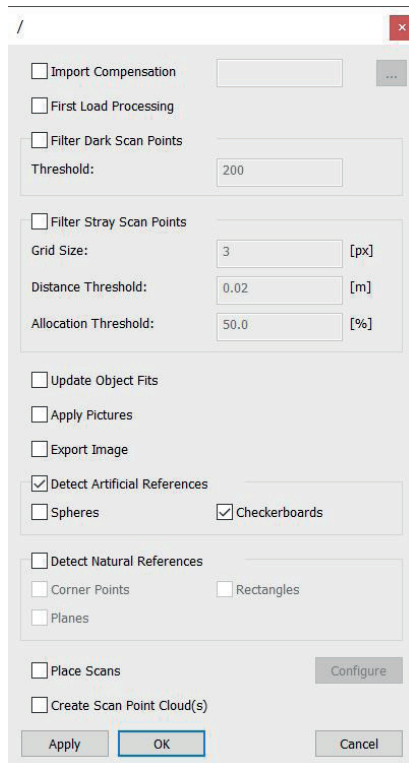
PUNTO DE DAMERO	PUNTO MEDIO DE CONTRASTE	ESFERA	PLANO	LOSA	PUNTO
					
					

Tabla 9. Tipos geometrías para la detección de referencias naturales. Fuente: elaboración propia

Todas las referencias artificiales serán medidas en sus puntos centrales con equipos topográficos como las estaciones totales. Esos datos se guardarán en un archivo .csv que importaremos a nuestro proyecto de Scene. Estos datos se pueden ver en árbol de exploración de los archivos del proyecto, dentro de la carpeta Referencias. Cada punto topográfico sale por separado con su nombre y coordenadas. Estos puntos topográficos solo afectarán a los escaneos que estén dentro de la carpeta de escaneos donde los hayamos importado.

Procesado de datos automático

Este procesado de los escaneos se puede realizar de forma automática utilizando la opción de Pre-procesado que puede aplicar varios pasos de procesamiento a un escaneo o a un grupo de escaneos de forma automática en un modo de procesamiento por lotes. Esto elimina la necesidad de previamente filtrar puntos, detectar e identificar objetos o colorear las nubes de puntos.



Para iniciar el pre-procesamiento picamos con el botón de derecho del ratón sobre la carpeta de escaneos que queremos procesar. Esto nos muestra una ventana con todas las opciones que podemos marcar.

Importar Compensación: Importar y aplicar un archivo de compensación. Esta opción se utiliza si para la toma de datos se ha utilizado un escáner que tiene desviaciones. Estas pueden ser el resultado de un problema en la estructura mecánica del escáner, por ejemplo que los ejes no estén bien orientados.

Procesamiento de la primera carga: Aplica los pasos de procesamiento que se realizan normalmente cuando se carga una exploración en SCENE por primera vez. Esta función aplicará el filtro por defecto (si está seleccionado).

Filter Dark Scan Points: Aplica el filtro basado en el valor de reflexión del punto de escaneo.

Figura 99. Ventana de configuración de los parámetros de pre-procesado escaneo. Fuente: elaboración propia

Filtro de puntos de escaneo extraviados: Aplica el filtro de puntos extraviados.

Actualizar ajustes del objeto: Actualiza los ajustes del objeto en todos los escaneos determinando los parámetros del objeto que mejor se ajustan a los puntos de escaneo.

Aplicar imágenes: Aplica las imágenes capturadas durante la toma de datos para colorear los escaneos.

Exportar Imagen: Crea una imagen panorámica de la Vista Planar para cada escaneo. Las imágenes se guardan en la carpeta del escáner.

Detectar referencias artificiales: Busca referencias de esferas o dianas tipo ajedrez.

Detectar referencias naturales: Busca referencias de puntos de esquina, planos, rectángulos y líneas rectas en los escaneos y ajusta los objetos detectados.

Colocar escaneos: Ejecuta el registro de los escaneos en su clúster. El botón **Configurar** hace que aparezcan los menús de selección de registro.

Crear nube(s) de puntos de escaneo: Crea una nube de puntos de escaneo de cada escaneo.

Realizar el procesado y registro de un proyecto de escaneos con la opción de Pre-Procesado reduce mucho el tiempo del operador delante del ordenador, ya que solo tiene que configurar los parámetros y dejar al ordenador procesando toda la información durante horas. Este procesado, dependiendo del tamaño del trabajo, puede oscilar entre las 6-24 h. Puede aprovechar todo ese tiempo para realizar otras tareas. Mientras que si hace todo el proceso de forma manual hay que ir configurando cada opción, ejecutarla, esperar el procesado y una vez finalizado, realizar la siguiente opción y así tantas veces hasta completar todo el proceso.

Paso 4. Coloreado de puntos

Cada uno de los escaneos están compuestos por millones de puntos, cada uno de los cuales tiene información de su geometría (valores X,Y,Z), reflectancia (valores de 0 a 255) y de color (valores R,G,B). Ya que el escáner láser además de capturar los datos métricos también realiza la captura de datos radiométricos o de color con la cámara integrada en el interior del escáner.

Existen dos opciones para colorear las nubes de puntos:

1. Utilizar las imágenes capturadas por la cámara interna del escáner. La cámara realiza las fotografías sobre el espejo rotativo del escáner. Para capturar todo lo que hay alrededor la cámara va tomando fotografías mientras el escáner va rotando poco a poco en fracciones de ángulo en el plano horizontal a la vez que el espejo va rotando también en fracciones de ángulo en el plano vertical. Para colorear un escaneo o varios escaneos, los seleccionamos y picamos con botón derecho del ratón para seleccionar la opción Operaciones -> Color/Imágenes -> Aplicar imágenes. Como conoce el tipo de cámara y su posición respecto al escáner de forma automática el programa utilizará todas las fotografías de cada escaneo para aplicarle color, quedándose solo con la parte central de la fotografía, que es la zona que no tiene distorsiones, y despreciando el

resto. Estas imágenes podemos exportarlas para editarlas o mejorarlas en un programa de retoque fotográfico, y posteriormente volver a importarlas dentro del escaneo.

Las imágenes capturadas por la cámara interna no tienen una buena profundidad de color, y al realizar los ajustes de forma automática los resultados no son los mejores. En la siguiente imagen se pueden ver zonas muy quemadas y otras muy en sombra donde se ha perdido mucha información imposible de recuperar. A pesar de eso se puede realizar una serie de ajustes para mejorar un poco estas imágenes.

- a. Aplicar filtro de contraste de color dentro de las opciones de Operaciones -> Color. En este caso mejora el color y un poco las zonas de iluminaciones y sombras.
- b. Exportar imagen y editar el programa externo (Photoshop). En este realizaremos ajustes en varios parámetros para conseguir un mejor resultado. Los archivos originales al ser JPG nos permiten un rango de ajuste pequeño en comparación con un archivo RAW que nos permitiría recuperar más las zonas de luces y sombras.



Figura 100. Proceso de recuperación de color de la fotografía original capturada por el escáner láser. Fuente: elaboración propia

2. Utilizar fotografías que hayamos realizado nosotros con una cámara externa. Para poder utilizar este tipo de fotografías debemos de cumplir dos condiciones a la hora de realizarlas:
 - La imagen digital debe estar libre de cualquier distorsión causada por el objetivo. Especialmente los objetivos gran angulares tienden a causar las llamadas distorsiones de barril. En una imagen con tales distorsiones, una línea recta no parece recta, sino que se dobla. En el caso de que la fotografía que realicemos sea esférica no influye que haya distorsiones de barril.
 - La posición, la orientación y el factor de zoom de la cámara tienen que ser conocidos. La posición de la cámara es la más importante, ya que tenemos que realizar la fotografía en la misma posición desde donde se captura la geometría, es decir, tenemos que colocarla a la altura y posición donde está el centro del espejo rotativo del escáner. De esta manera nos aseguramos tener el mismo punto de vista y evitar problemas de paralaje

Para colorear con imágenes externas tenemos que marcar un mínimo de 6 puntos de coincidencia entre la vista plana del escaneo y la imagen. Para realizar este proceso seleccionamos el escaneo que queremos colorear y picamos con el botón derecho del ratón sobre él seleccionando la opción Operaciones -> Color/Imágenes -> Colorear escaneo. En la ventana que sale buscamos la imagen que vamos a utilizar y pulsamos sobre el botón Agregar. Nuestra fotografía aparecerá en la ventana de exploración del proyecto. En el caso de que la fotografía importada sea una panorámica esférica, tendremos que activar la opción en las propiedades, sino el programa la considerará una imagen plana y no realizará bien el coloreado.

En la ventana de colorear escaneo se mostrará en el lado izquierdo la imagen y en la parte derecha la vista plana del escaneo en escala de grises, e iremos añadiendo parejas de puntos (mínimo 6) entre las dos imágenes.

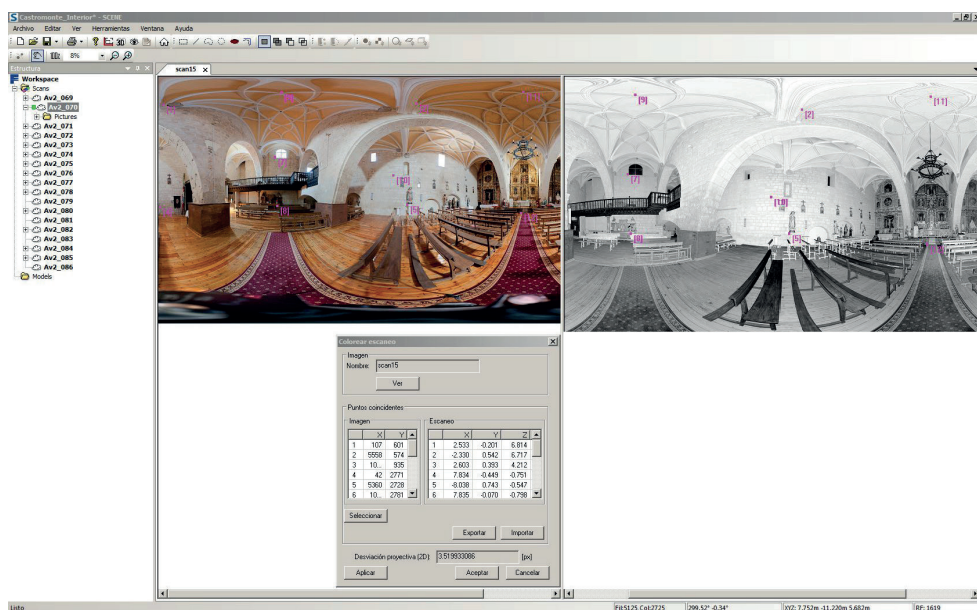


Figura 101. Proceso de coloreado a partir de fotografía capturada de forma externa

EL realizar fotografías con cámara externa viene motivado por la baja calidad en el color que ofrece la cámara interna ya que no realiza bien el ajuste de blancos y contamina los tonos de la fotografía. En la siguiente figura se puede apreciar la diferencia de color que existe entre la fotografía capturada por la cámara del escáner y una fotografía capturada con una cámara externa (Nikon D700).



Figura 102. Comparativa de calidad de color entre una imagen capturada por la cámara interna del escáner y una cámara externa. Fuente: elaboración propia

3.1.4. REGISTRO DE LOS PUNTOS

Registro manual con la vista correspondencia

La vista correspondencia es una herramienta que permite realizar el registro de forma manual y sencilla de los escaneos. Cada escaneo se muestra de un color para poder distinguirlos unos de otros. Si lo que se muestra son agrupaciones de escaneos, todos los escaneos que forman la agrupación tendrán el mismo color. Para poder manipular los escaneos de forma manual hay que picar sobre la etiqueta para que se activen los manipuladores de traslación y rotación.

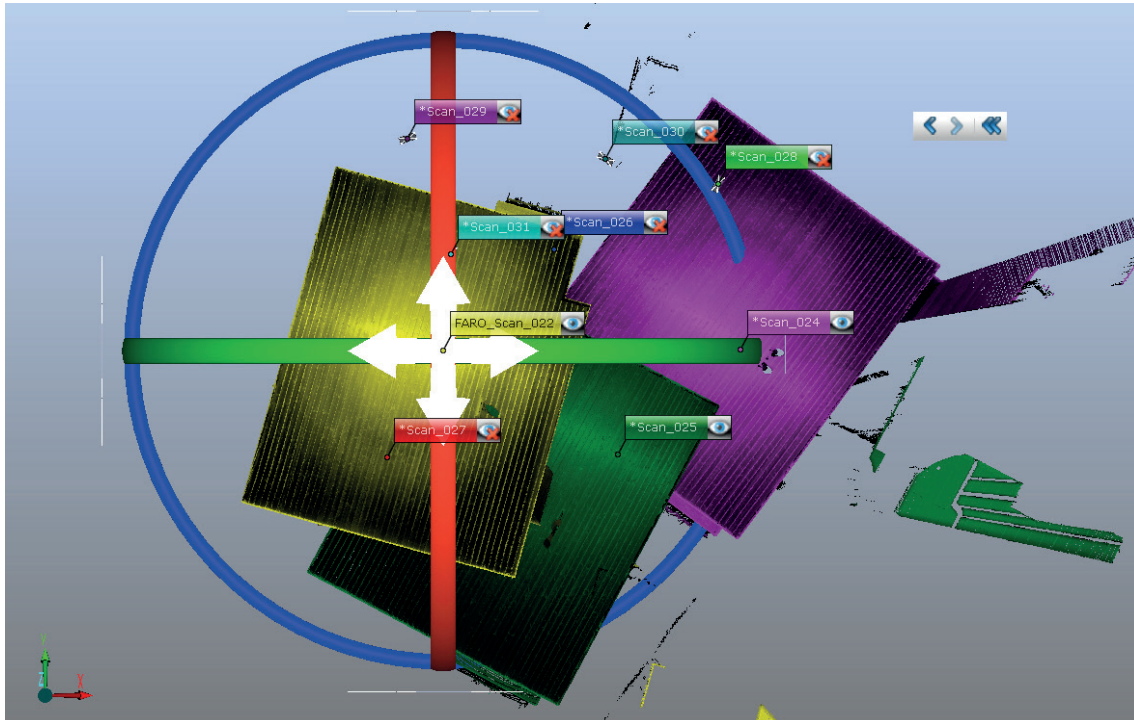


Figura 103. Visualización de la vista correspondencia para el registro manual de los escaneos

Una vez colocados los escaneos en sus posiciones hay que realizar un registro fino con alguna de las siguientes opciones.

Registro por referencias

Este modo permite realizar el registro o alineamiento de todos los escaneos utilizando las referencias artificiales (esferas y dianas) o las referencias naturales (geometría característica y reconocible de nuestro objeto: puntos, planos, esferas, targets,...). Al utilizar solo las referencias en el cálculo el proceso es rápido.

Registro en vista en planta

Si tenemos bien estructurado nuestro proyecto y distribuimos bien los escaneos en diferentes carpetas de escaneos podemos registrar grandes proyectos a buena velocidad. El registro basado en la vista superior es independiente de las posiciones iniciales del escáner si los datos del inclinómetro están disponibles. Si una exploración no tiene datos del inclinómetro, se utiliza su posición global actual para determinar el eje z.

Submuestreo:

Distancia media entre puntos utilizada para reducir la densidad de las nubes de puntos. El resultado es una densidad de puntos homogénea.

Bajo. Para alinear detalles pequeños.

Alto. Para las nubes de puntos de grandes dimensiones, por ejemplo para exteriores.

Fiabilidad:

El control deslizante a la derecha para obtener resultados con una alta probabilidad de ser correctos. El control deslizante a la izquierda, también se utilizarán colocaciones que podrían ser incorrectas.

Registro Nube a Nube (Cloud to Cloud)

Para poder aplicar este modo de registro, es necesario haber realizado previamente alguno de los anteriores. Este método utiliza todos los puntos de los escaneos por lo que es un proceso de cálculo de mucho tiempo. Los parámetros que podemos ajustar son:

Controlador de calidad de submuestreo: Submuestraa la nube de puntos para tener una densidad de puntos homogénea. El registro de nube a nube puede llevar algún tiempo para calcular la transformación mejorada.

Alto reduce el tiempo, pero puede llevar a resultados ligeramente menos precisos.

Bajo puede conducir a resultados de registro fino más precisos, pero aumenta el tiempo de cálculo.

Número máximo de iteraciones: Número máximo de iteraciones permitidas para que el algoritmo encuentre la mejor solución. Cuanto mayor sea, más precisos serán los resultados.

Distancia máxima de búsqueda: Distancia máxima de búsqueda de puntos cercanos.

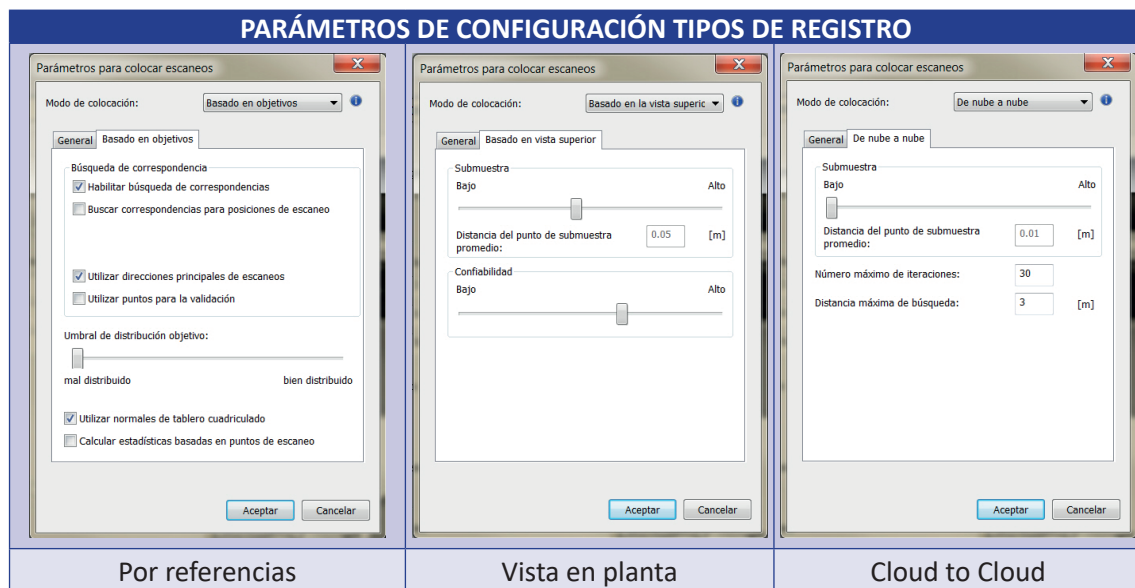


Figura 104. Ventanas de parámetros de configuración de los distintos modos de registro

Una vez realizados los procesos de registro en la ventana Scan Manager podemos visualizar la calidad de registro entre los diferentes escaneos.

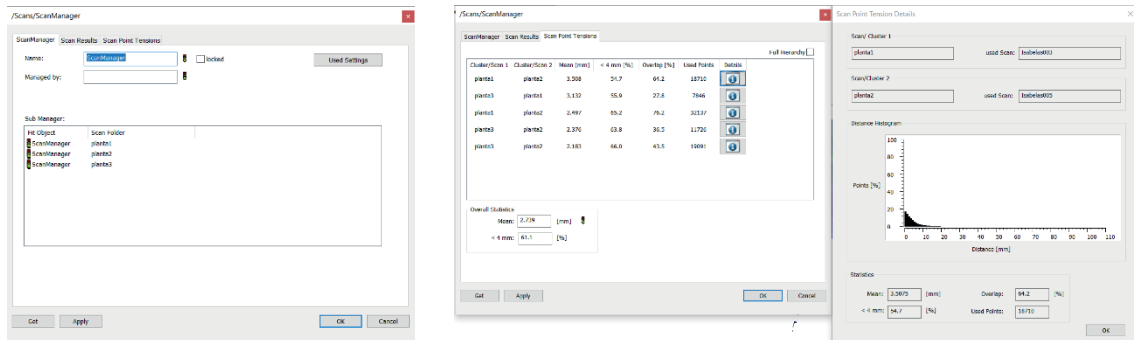


Figura 105. Ventanas Scan Manager donde se pueden visualizar los resultados del registro

El semáforo que aparece junto al **Scan Manager** indica si contiene datos buenos o fallidos **Scan Fits**. Si el semáforo que aparece junto a un **Scan Manager** está en rojo, significa que este **Scan Manager** contiene un mal **Scan Fits**. El color verde significa que se cumplen todos los criterios de calidad. El color ámbar muestra que al menos un criterio de calidad está algo comprometido. Si hay un símbolo de un aspa roja junto a un **Scan Manager** o un **Scan Fit**, esto significa que el registro no ha podido ser ejecutado, por ejemplo por falta de referencias.

Cuando ya tenemos terminado el registro de un clúster o carpeta de escaneos, lo bloqueamos para guardar la posición relativa calculada. Haremos el mismo proceso en todos los clúster o carpetas de escaneo hasta tener registrados todos los escaneos del proyecto.

3.1.5. EXPORTACIÓN DE LOS PUNTOS DE ESCANEO

Una vez que tenemos la nube completa de proyecto podremos generar archivos como resultado de todo este proceso. Para poder trabajar sobre partes concretas de la nube de puntos podemos crear cajas de recorte para visualizar solo lo que esté dentro o fuera de estas cajas. Se pueden combinar varias cajas. Solo se exportará lo que se visualice en estas cajas. Para poder exportar todo es necesario desactivar las cajas de recorte.

De los escaneos podemos conseguir una serie de productos para poder desarrollar documentación técnica y de divulgación.

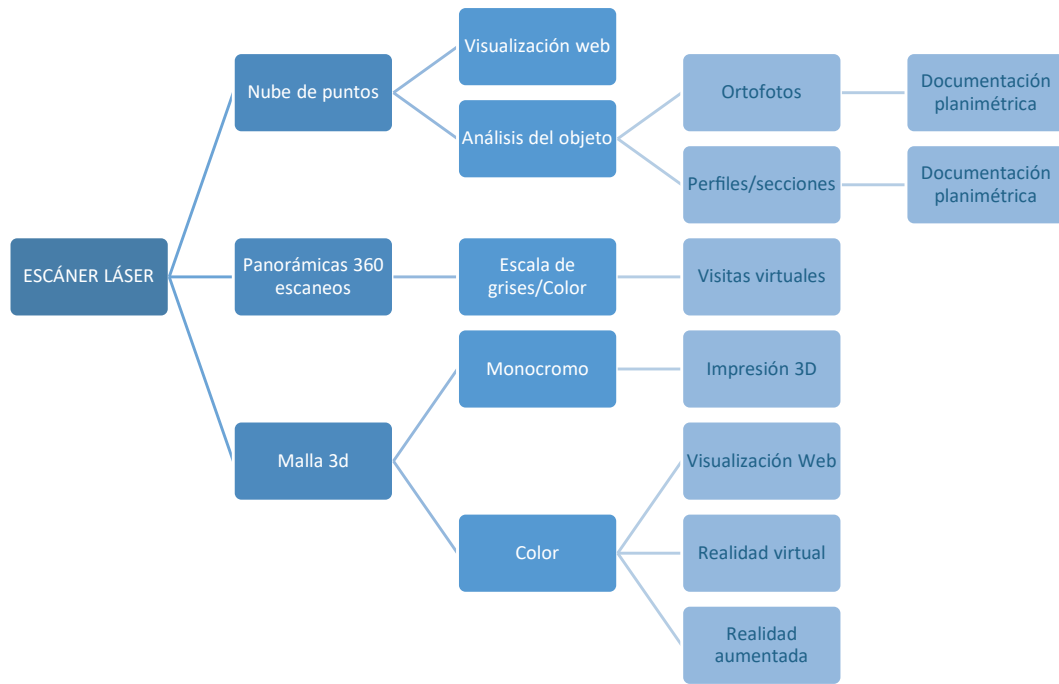


Figura 106. Esquema de los resultados que se pueden obtener con el escáner láser. Fuente: elaboración propia

Nubes de puntos individuales

Podemos exportar nubes individuales o partes de ellas utilizando la herramienta selección de puntos. Estas se exportan ya con la posición calculada en el registro de datos.

Nube de puntos de proyecto completa

Es la exportación de la nube de puntos completa con todos los escaneos, pero con la densidad de puntos homogeneizada según un paso de malla configurado.

Rebanadas de puntos

Se pueden exportar perfiles individuales o series de ellos mediante la definición de unos planos con límite superior e inferior que define el espesor de la rodaja de puntos.

Ortofotos

Podemos generar ortofotos de la nube de puntos, para ello se usan las cajas de recorte para ir adaptando las vistas de las ortofotos. Estas ortofotos se exportan en archivos DXF escalados.

En el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica se utiliza otro flujo de trabajo para la obtención de los ortoalados. Este flujo comienza con la exportación de la nube de puntos de proyecto en formato XYZ o PTX. Estos archivos posteriormente se abren en la aplicación UvaCAD²⁹

29 El grupo LFA-DAVAP, integrado por Laboratorio de Fotogrametría y el MoBiVAP (Modelización, Biomecánica y Visualización Avanzada) creo en el año 2007 el software UvaCAD, utilizado para manipular datos obtenidos por scanner láser. El programa permite la obtención de plantas, secciones, ortoalados, planos temáticos o modelos tridimensionales.

(PEREZ-MONEO et al., 2012) para generar la documentación de los diferentes ortoalzados. Esta genera también un DXF con una línea de escalado para poder meter la ortoimagen a escala en el archivo de dibujo. Este programa también permite generar perfiles o rebanadas de puntos a lo largo de un eje.

Malla 3D

Cuando se escanea un objeto, los puntos de escaneo representan puntos individuales en la superficie del objeto. Para reconstruir la superficie, creamos una malla tomando como base los puntos de escaneo y aproximando a las superficies dentro de ciertos límites. Esta aproximación se realiza con un conjunto de triángulos.

Dependiendo de la curvatura de la superficie real y de la calidad de aproximación requerida, el número de triángulos puede variar entre unos pocos y un número enorme.

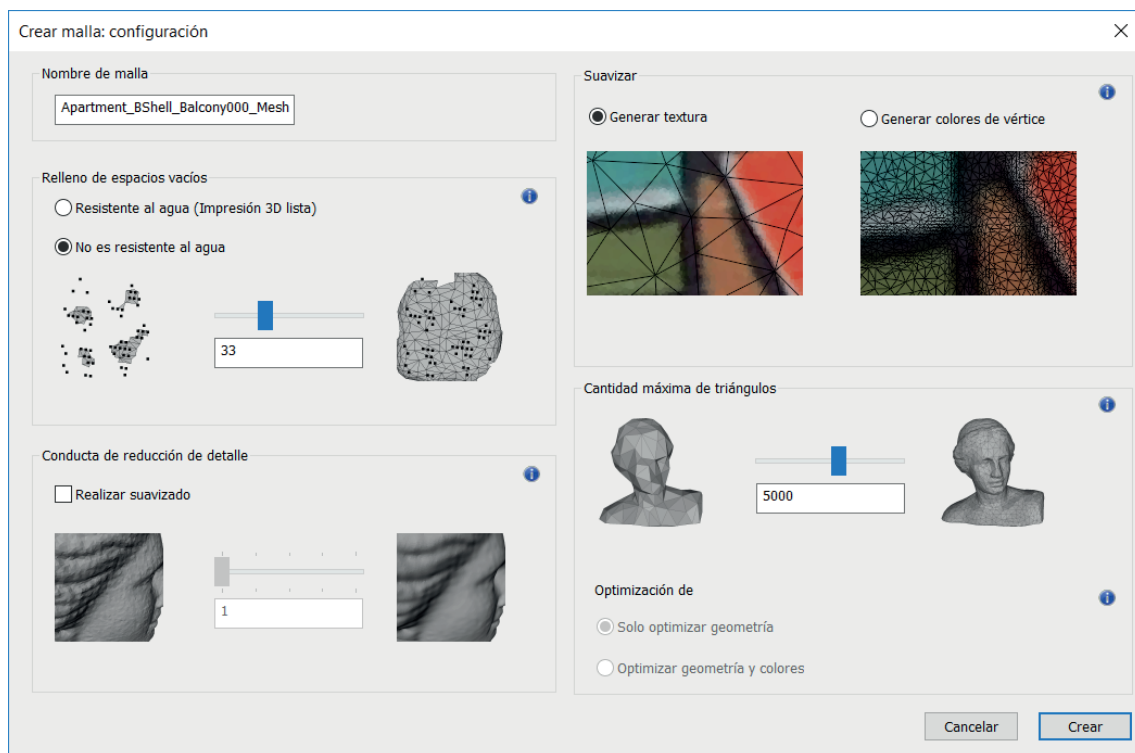


Figura 107. Ventana de configuración para la creación de mallas 3D

La ventana muestra varias opciones de configuración.

Relleno de huecos o espacios vacíos. Podemos seleccionar la opción de modelo estanco orientado a la impresión 3d. Esta malla o modelo es sólida, no tiene agujeros. O modo no estanco, es una malla abierta.

Selector deslizante Modo de malla. Permite controlar que el mallado cierre más o menos agujeros y expanda la malla más o menos más allá de los puntos. Esta opción está disponible cuando se selecciona el modo no estanco.

Suavizado. Activar la casilla para aplicar una operación de postprocesamiento para hacer la malla más suave. El suavizado reduce el detalle en la geometría.

Selector deslizante suavizado. Permite controlar la suavidad de la malla. Cuanto mayor sea el valor del deslizador, la malla será más suave.

Generación de textura de color. Hay dos opciones.

Generar textura. Crea color en la textura aplicando un archivo gráfico a cada triángulo.

Generar colores de vértices. Crea color en la textura aplicando información de color a los vértices de la malla.

Selector deslizante Número máximo de triángulos. Permite controlar cuántos triángulos se crearán en la malla, si el modo no estanco está activo.

Optimización de la malla. Geometría vs. Colores de los vértices. La geometría está seleccionada por defecto si tenemos seleccionada el parámetro Generar textura. Si está seleccionado Generar colores de vértices, hay que elegir Geometría para que la malla tenga la forma más precisa incluso a expensas del color. Se selecciona Colores de vértice si la precisión del color es más importante. Estas mallas se pueden exportar en formato: STL, OBJ y PLY.

[WebShare](#)

WebShare es un servicio web alojado por FARO Technologies Inc. que permite compartir los proyectos de escaneo sin necesidad de configurar un servidor web propio. Se puede acceder a los datos del proyecto con un navegador web estándar, sin necesidad de software o complementos adicionales. Este sistema nos permite visualizar cada uno de los escaneos que definen el proyecto desde la vista plana, en la que podremos movernos y consultar medidas de puntos y distancias. También nos permite navegar por la nube de puntos completa del proyecto en vista 3d.

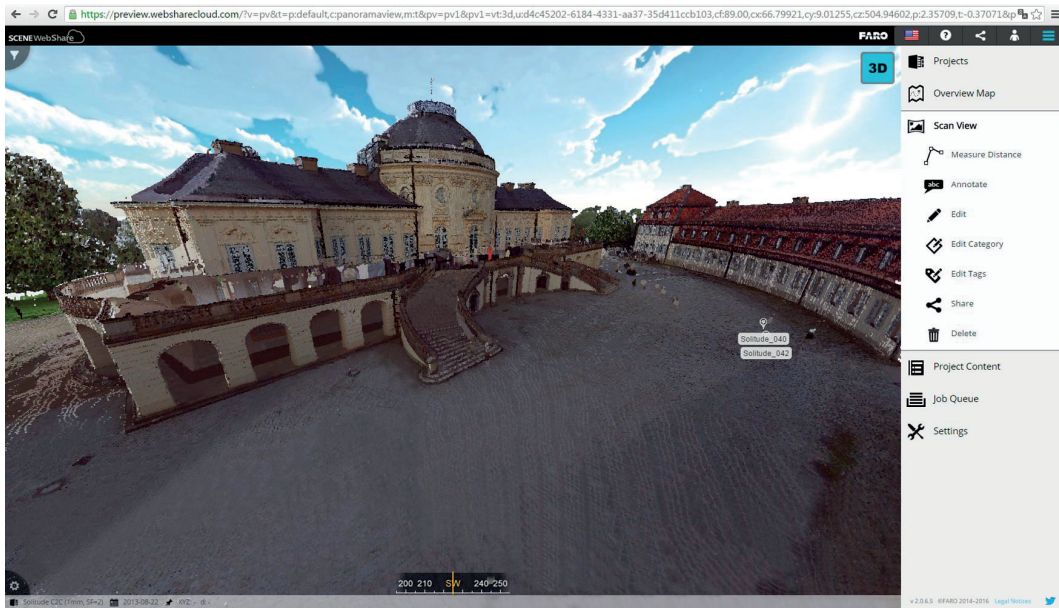


Figura 108. Scene WebShare Cloud proporciona una sencilla visualización 3D de los datos as-built a través de Internet

A continuación, se muestra una tabla con los tiempos aproximados de trabajo que supone cada una de las fases de la toma de datos y procesado con el escáner láser.

Tiempos de trabajo escáner láser

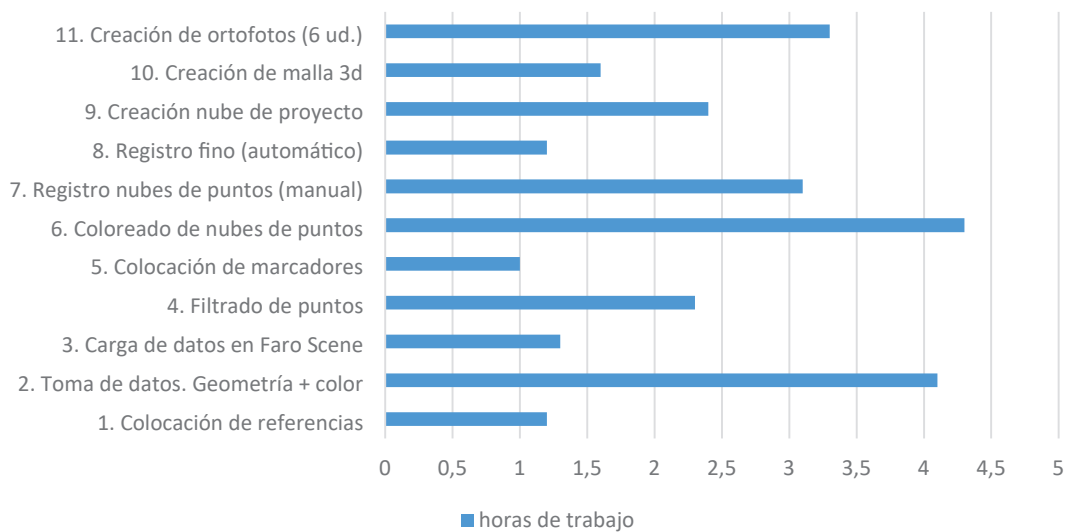


Tabla 10. Tabla de tiempos estimados para un trabajo realizado con escáner láser de unos 30 escaneos. Fuente: elaboración propia

3.2. Fotogrametría

El flujo de trabajo para el procesado de las fotografías para fotogrametría es el mismo para las fotografías realizadas en modo terrestre o aéreo. La variedad de programas para la realización del procesado de las fotografías es muy amplia, existen Agisoft Metashape³⁰, Pix4D³¹, Reality

30 <https://www.agisoft.com/>

31 <https://www.pix4d.com/es>

Capture³², Autodesk ReCap³³, Trimble Inpho³⁴, 3DZephyr³⁵, AliceVision Meshroom³⁶, etc. Esta última es gratuita. En este apartado voy a tratar el procesado con el programa Agisoft Metashape.

El flujo de trabajo para el procesado de las fotografías mediante fotogrametría va a ser el siguiente.

FLUJO DE TRABAJO PROCESADO DE DATOS FOTOGAMETRÍA	0. ACCIONES PREVIAS	Revelado digital Montaje de fotografías panorámicas esféricas o equirectangulares	
	1. IMPORTAR FOTOGRAFÍAS	Fotografías normales (planas) Fotografías equirectangulares	
	2. ORIENTACIÓN FOTOGRAFÍAS	Calibración de cámara Filtrado de puntos Uso de máscaras Identificación de puntos de control o referencias	
	3. CREACIÓN DE LA NUBE DENSA		
	4. CREACIÓN DE LA MALLA DE TRIÁNGULOS		
	5. TEXTURIZADO		
	6. EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS		

Tabla 11. Esquema del flujo de trabajo del procesado mediante fotogrametría con Agisoft Metashape. Fuente: elaboración propia

3.2.1. ACCIONES PREVIAS

Previamente a realizar el procesado tendremos que realizar el revelado de las fotografías y el montaje de las panorámicas esféricas.

Revelado digital

Cuando realizamos la captura de las fotografías la mejor opción es hacerlo mediante archivos RAW. Este tipo de archivo tiene la ventaja de que recoge toda la información de iluminación, sombras y profundidad de color en el momento de realizar la captura. Esto nos va a permitir mejorar la foto si nos ha quedado subexpuesta o sobrepuesta sin perder calidad.

Para poder realizar el revelado digital hemos utilizado la aplicación Adobe Lightroom. Este proceso también se puede realizar con la extensión Camera Raw de Adobe Photoshop, pero en mi experiencia personal durante el proceso de trabajo resulta más adecuado usar Lightroom porque permite un mejor control de todos los parámetros de revelado.

32 <https://www.capturingreality.com/>

33 <https://www.autodesk.es/products/recap/overview>

34 <https://es-la.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/inpho>

35 <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/>

36 <https://alicevision.org/>

La pantalla de trabajo de Lightroom se divide en varias partes:

1. Barra de menús. Tenemos acceso a las configuraciones de características generales del programa.
2. Selector de módulos. Cada módulo se centra en una fase específica del flujo de trabajo fotográfico: en el módulo Biblioteca se importan, organizan, comparan y seleccionan fotografías, el módulo Revelar permite ajustar colores y tonos, o procesar fotografías con efectos creativos, y los módulos Proyección, Imprimir y Web permiten presentar sus creaciones.
3. Paneles para trabajar con las fotografías de origen. En este panel podemos acceder a nuestras colecciones de fotografías, las carpetas de fotografías que tenemos importadas, ajustes preestablecidos, historial, etc.
4. Área de visualización de las imágenes. Nos ofrece varias posibilidades, pero la mejor para trabajar es la que muestra la fotografía original y la revelada.
5. Paneles de configuración de parámetros de revelado. Paneles para trabajar con metadatos y palabras clave, y para ajustar las imágenes.
6. Tira de diapositivas. Muestra miniaturas del contenido de las carpetas, colecciones, conjuntos de palabras clave o criterios de metadatos.

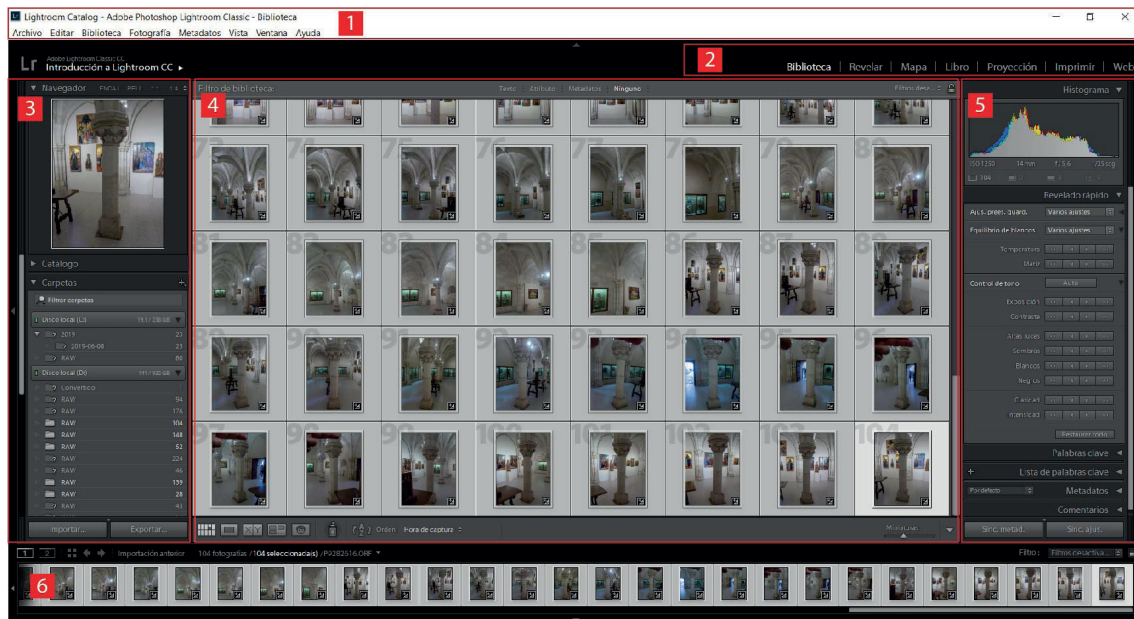


Figura 109. Espacio de trabajo programa Adobe Lightroom. Fuente: elaboración propia

El flujo de trabajo del revelado digital de fotografías es sencillo, ya que se reduce en importar las fotografías que pueden ser individuales o colecciones enteras, realizar los ajustes de revelado y exportar el resultado.

El módulo revelar de Lightroom permite modificar y corregir todos los parámetros de la fotografía: ajuste de color, iluminaciones, sombras, escala de tonos de color, blancos y negros, recortar la fotografía, eliminar ojos rojos, reducir ruido, etc. Todos estos ajustes son no destructivos, es decir, con la edición el archivo original no se modifica. Los ajustes que hagamos a cada fotografía se almacenan en Lightroom como un conjunto de instrucciones. La edición

no destructiva significa que podemos explorar y crear diferentes versiones de la fotografía sin dañar los datos de la imagen original. Estos ajustes solo se aplicarán en la fotografía que exportemos.

Los ajustes se pueden realizar de forma genérica en toda la fotografía o parcialmente por zonas utilizando pinceles. Podemos crear tantas zonas de edición como sean necesarias.

Los paneles del lado izquierdo del módulo Revelar permite seleccionar fotografías, seleccionarlas y previsualizarlas en las distintas etapas de edición y aplicar ajustes preestablecidos globalmente. El centro del módulo Revelar ofrece un área de visualización y trabajo. Las herramientas debajo del área de trabajo proporcionan diversas funciones, desde alternar entre vistas de antes y después a activar pruebas en pantalla. Los paneles del lado derecha ofrecen herramientas y controles para ajustar las fotografías.

Hay aspecto importante que tenemos que tener muy en cuenta, y es que las fotografías que vayamos a utilizar para fotogrametría solo las podremos ajustar los valores de escala de tonos de color, exposición, contraste, iluminación, sombras. No podremos utilizar todos aquellos ajustes que tengan que ver con la modificación de la nitidez, eliminación de ruido, transformaciones (recorte o giro) y correcciones de lente, ya que modifican la composición de la imagen añadiendo o eliminando artefactos que afectarán a la reconstrucción 3d introduciendo errores o aberraciones.

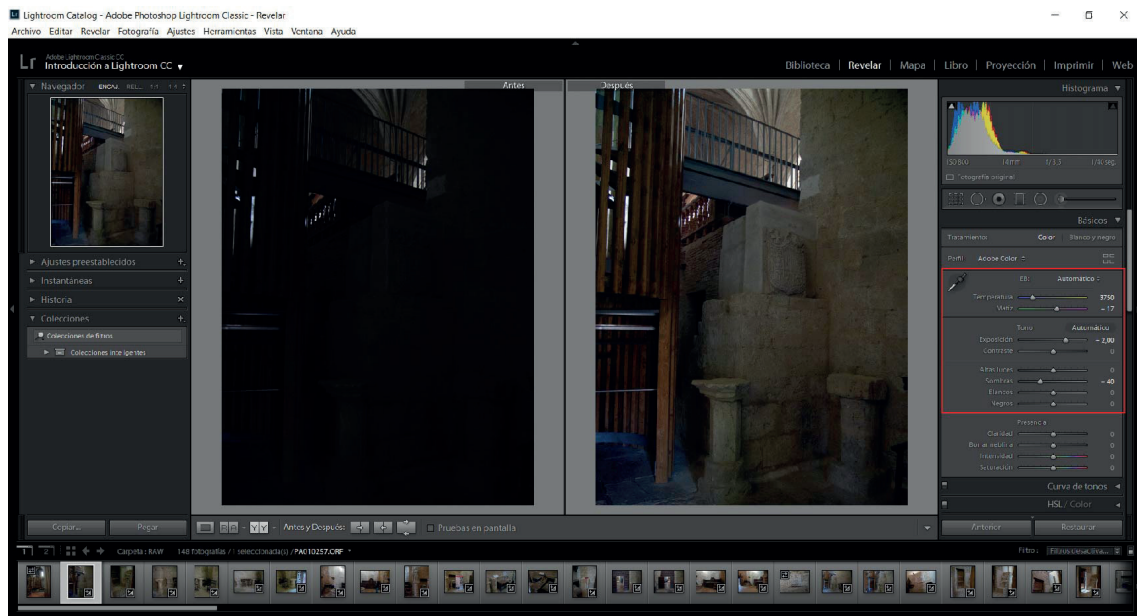


Figura 110. Visualización del módulo de revelado donde se puede observar cómo se puede mejorar la iluminación de una fotografía a partir de la información almacenada dentro del archivo RAW. Fuente: elaboración propia

[Montaje de fotografías panorámicas esféricas](#)

Las fotografías esféricas o equirectangulares se obtienen a partir de la captura de múltiples imágenes desde una misma posición haciendo rotar la cámara 360º en horizontal y 360º en vertical, fotografiando todo lo que hay a su alrededor.

El número de fotografías que componen un panorama esférico dependerá de la focal del objetivo, cuanto más baja sea la focal, mayor será el ángulo de visión y menor será el número de imágenes que habrá que realizar. Mientras que cuanto más alta sea la focal del objetivo, menor será el ángulo de visión y mayor será el número de imágenes que habrá que hacer. El detalle de una panorámica esférica realizada con muchas fotografías será mayor que una panorámica esférica hecha con menos fotografías.

Existen muchas opciones de aplicaciones para montar panorámicas esféricas: Adobe Photoshop, Adobe Lightroom, PTGui, Hugin, Pano2VR, etc. Yo voy a describir el flujo de trabajo en PTGui ya que es el programa que nos permite trabajar de forma menos automática pudiendo modificar cualquier parámetro en el proceso.

Cuando abrimos PTGui nos encontramos con un entorno muy sencillo, que nos permitirá crear nuestras fotografías esféricas en solo 3 pasos.

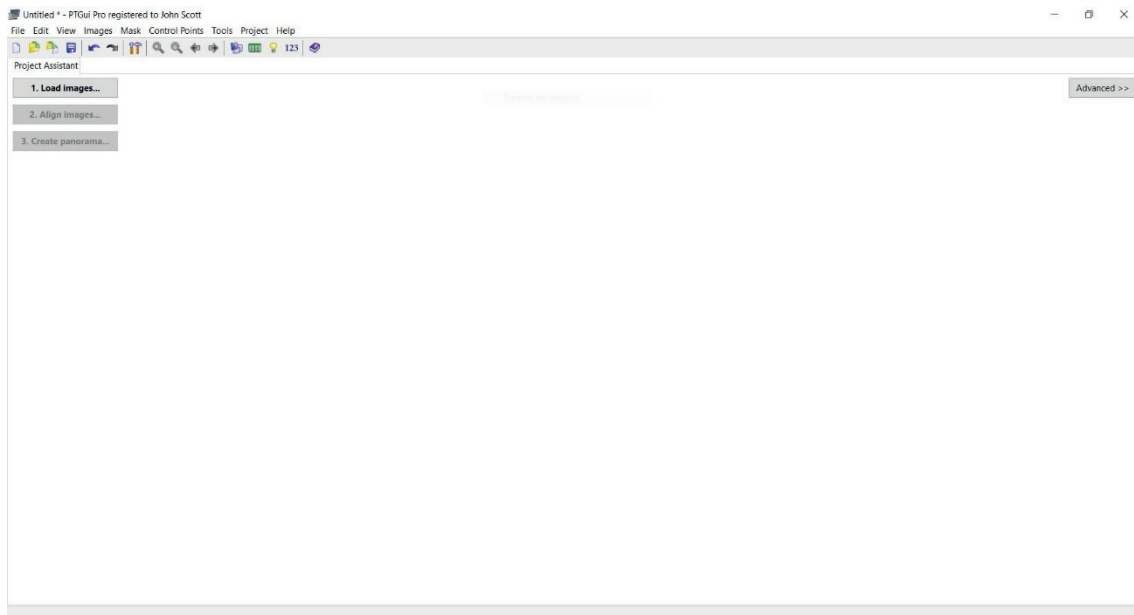


Figura 111. Espacio de trabajo de PTGui para procesado de panorámicas esféricas de forma automática. Fuente: elaboración propia

Pero si queremos modificar los parámetros de trabajo a nuestro gusto tendremos que activar el botón Avanzada para que nos muestre todas las pestañas con las opciones existentes.

El primer paso es importar las fotografías de nuestra panorámica esférica. El programa reconoce el tipo de cámara y focal utilizada a partir de los datos EXIF de las fotografías, y con estos datos hace una preconfiguración de los parámetros del proyecto y determina la vista de proyección del archivo de salida: rectangular, cilíndrica o esférica. Podemos revisar los valores utilizados y ajustarlos mejor accediendo a las pestañas de ajustes de lente y ajuste de panorámica.

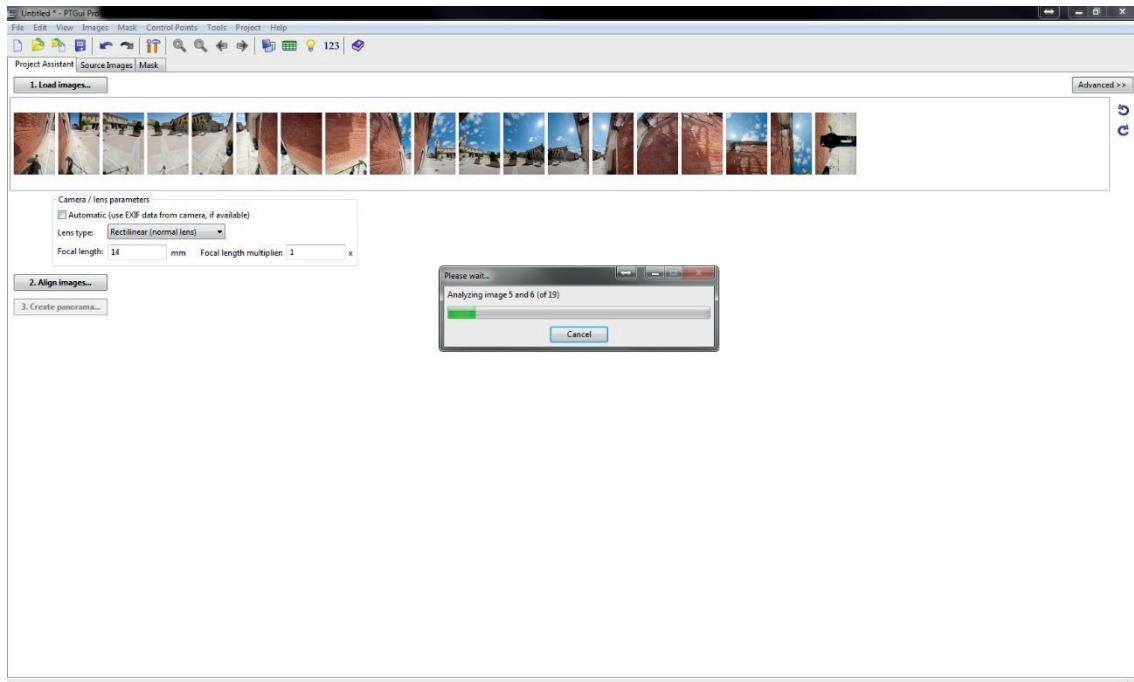


Figura 112. Proceso de cálculo de los puntos de control para hacer el cosido entre las fotografías. Fuente: elaboración propia

El segundo paso es calcular, de forma automática, los puntos comunes que existen entre las fotografías. Estos puntos son necesarios para realizar el cosido. Una vez calculados nos mostrará una previsualización de la panorámica. Podremos añadir más puntos de forma manual si vemos que son necesarios.

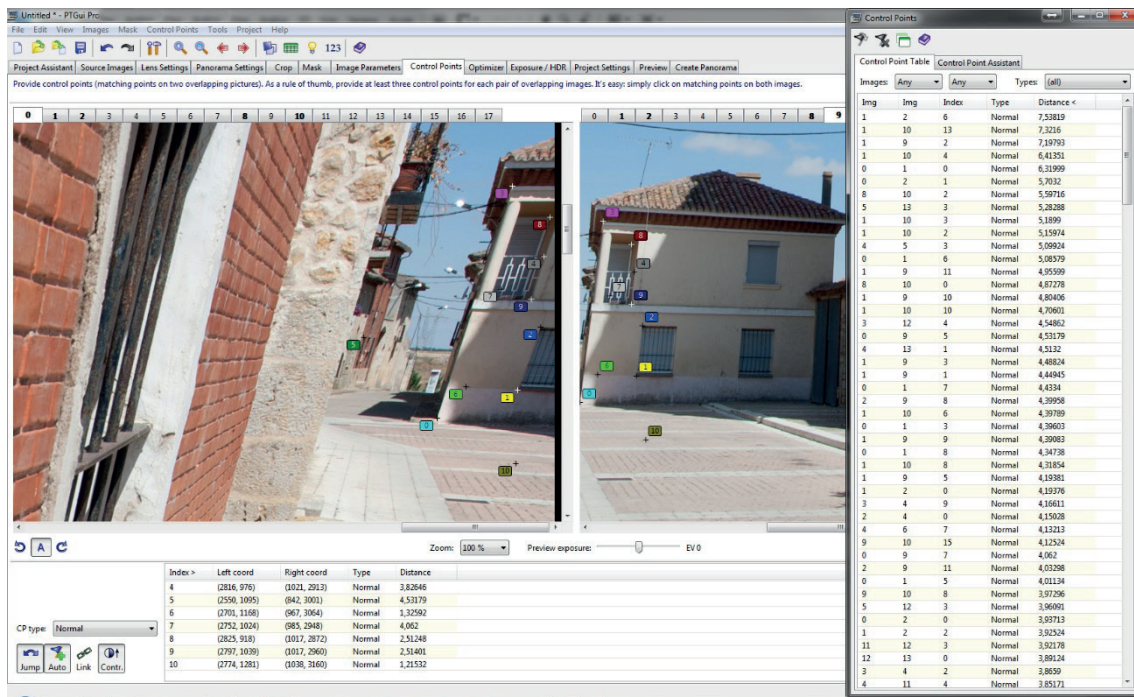


Figura 113. Pestaña de PTGui que muestra los puntos de control localizados en cada una de las fotografías. Podemos añadir, modificar o eliminar puntos para mejorar el resultado de la panorámica. Fuente: elaboración propia

El tercer paso es la realización de máscaras en las fotografías pintando sobre ellas con un pincel sobre los elementos que queremos ocultar. Este proceso nos sirve para eliminar cosas que se mueven durante la captura de las fotografías (personas, coches, pájaros, etc.).

El cuarto paso es la optimización de estos puntos y el filtrado de los que arrojan un mayor error.

El quinto paso es revisar la previsualización de la panorámica y en el caso de que este todo correcto, configuramos los parámetros del archivo de salida y exportamos la imagen. El programa tiene una opción de procesamiento por lotes que nos permite crear los proyectos de todas las fotografías y luego exportarlos todos juntos.

3.2.2. *IMPORTAR FOTOGRAFÍAS*

En Agisoft podemos trabajar con fotografías normales y con fotografías esféricas (Barba et al., 2019). Estas últimas se pueden utilizar sin montar, es decir, importar todas las fotografías que componen la panorámica esférica; o se puede importar la fotografía equirectangular en la que ya están las fotografías cosidas entre sí.

Fotografías normales

Las fotografías normales se importan al programa arrastrando las fotos sobre la ventana de Agisoft o mediante el botón Añadir fotos que aparece en la ventana del Espacio de trabajo (Workspace). También se puede hacer pulsando el botón derecho sobre el chunk o bloque y eligiendo la opción **Añadir -> Añadir Fotos**.

Una vez importadas el programa reconoce a través de los datos EXIF de las fotografías el tipo de cámara y los parámetros utilizados para realizar la fotografía.

Esto lo podemos comprobar en **Herramientas -> Calibración Cámara**. En esta ventana tenemos que asegurarnos que en tipo de cámara aparece marcado **cuadro** (*Frame*).

Fotografías equirectangulares

La forma de proceder es similar a la anterior, salvo algunas diferencias que dependerán de si cargamos las fotografías esféricas ya montadas o sin montar.

Cuando importamos las fotografías esféricas ya montadas, o desarrolladas en una fotografía equirectangular, para que el programa trabaje de forma correcta deberemos ajustar el tipo de cámara ya que en con los datos EXIF seguirá considerando que es una cámara tipo cuadro. Esto lo ajustamos en **Herramientas -> Calibración Cámara**. En esta ventana tenemos que asegurarnos que en tipo de cámara aparece marcado **esférica** (*Spherical*).

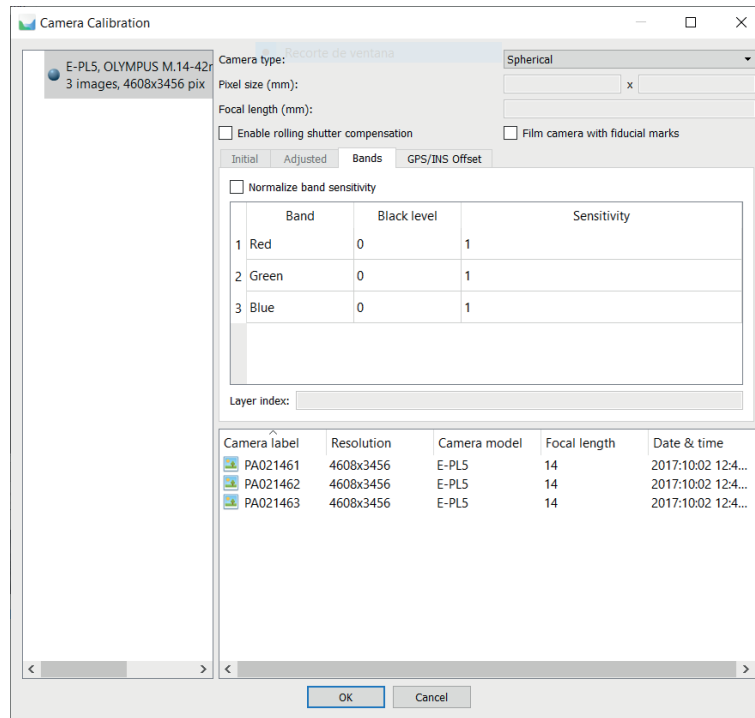


Figura 114. Ventana de calibración de la cámara de Agisoft Metashape. Fuente: elaboración propia

Cuando importamos las fotografías esféricas sin montar el proceso será diferente, ya que como hemos mencionado anteriormente, una de las condiciones para realizar un modelo por fotogrametría es que las fotografías tienen que estar realizadas desde posiciones diferentes. Si están realizadas en la misma posición generarán errores y puntos perdidos en el espacio. El problema es que las fotografías para realizar una panorámica esférica tienen que estar tomadas desde la misma posición para que no existan problemas en el cosido. Para solucionar este problema en el Espacio de trabajo dentro del chunk hay que agrupar en carpetas independientes las fotografías que compone cada una de las esféricas e indicar que esa carpeta es una estación.

Para ello se seleccionan las fotografías, se pulsa botón derecho del ratón sobre ellas y marcamos la opción **Mover cámaras -> Nuevo grupo de cámaras**. Con esto creamos una carpeta que contiene las fotografías de la panorámica esférica. Ahora se pulsa de nuevo el botón derecho del ratón sobre la carpeta y se le aplica la opción **Estación** en el desplegable **Establecer el tipo de grupo**.

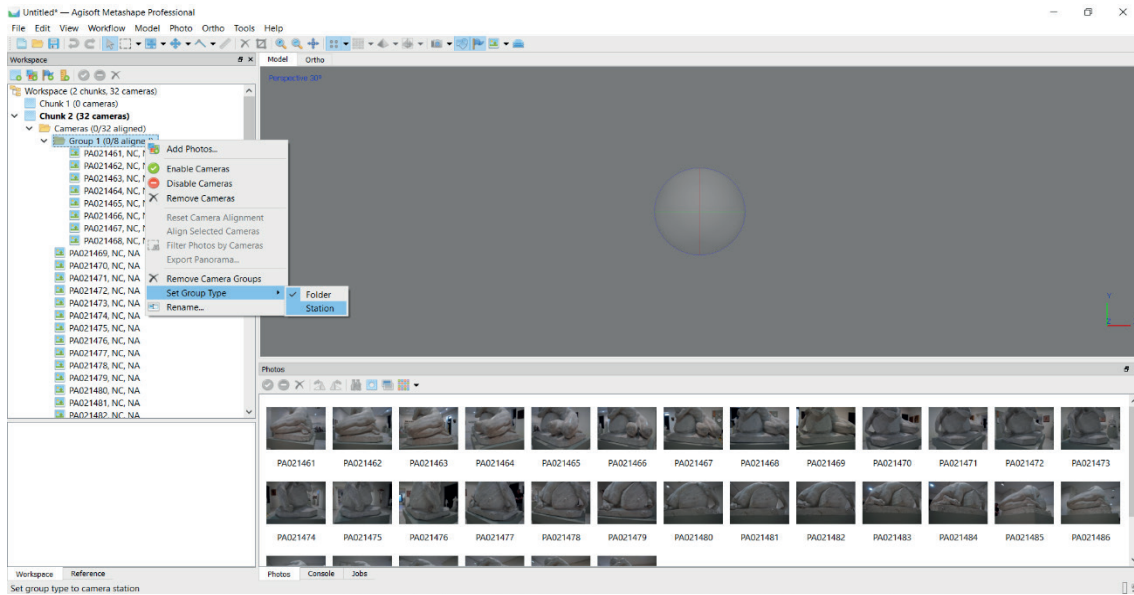


Figura 115. Configuración de tipo de carpeta para fotografías esféricas sin procesar. Fuente: elaboración propia

3.2.3. ORIENTACIÓN FOTOGRAFÍAS

Una vez que las fotografías se han cargado en el programa el siguiente paso es alinearlas entre sí. Para ello hay que calcular la posición y orientación de las cámaras. En este paso se construye un modelo de nube de puntos de paso o dispersos. Para ello hay que acceder al menú de opciones **Flujo de trabajo -> Orientar fotos...** Se abre una ventana con parámetros, se aceptan los que salen por defecto.

Si una vez que ha terminado de orientar observamos que falta alguna fotografía por orientar, seleccionamos las fotografías no orientadas (NA) y repetimos el proceso de orientación solo con esas fotografías.

Filtrado de puntos

La nube de puntos de paso se puede filtrar para eliminar los puntos que más error muestren. Para ello realizaremos una selección gradual basada en diferentes criterios:

- Error de reproyección. Un valor alto suele indicar una precisión de localización deficiente de las proyecciones de puntos correspondientes en el paso de coincidencia de puntos. También es típico de coincidencias falsas. La eliminación de estos puntos puede mejorar la precisión del paso de optimización posterior.
- Incertidumbre de la reconstrucción. La alta incertidumbre en la reconstrucción es típica de los puntos, reconstruidos a partir de fotografías cercanas con una línea de base pequeña. Dichos puntos pueden desviarse notablemente de la superficie del objeto, introduciendo ruido en la nube de puntos. Si bien la eliminación de dichos puntos no debería afectar la precisión de la optimización, puede ser útil eliminarlos antes de construir la geometría en el modo Nube de puntos o para una mejor apariencia visual de la nube de puntos.
- Recuento de imágenes. Metashape reconstruye todos los puntos que son visibles al menos en dos fotos. Sin embargo, es probable que los puntos que solo son visibles en dos

fotos se ubiquen con poca precisión. El filtrado de recuento de imágenes permite eliminar esos puntos poco fiables de la nube.

- Precisión de proyección. Este criterio permite filtrar puntos cuyas proyecciones fueron relativamente más pobres localizadas debido a su mayor tamaño.

La forma de proceder es a través del menú **Modelo -> Selección gradual**. Se elige un criterio de los mencionados anteriormente y se ajusta el deslizador hasta el valor que consideremos óptimo. Los puntos seleccionados se muestran de un color cálido y ya solo queda eliminarlos.

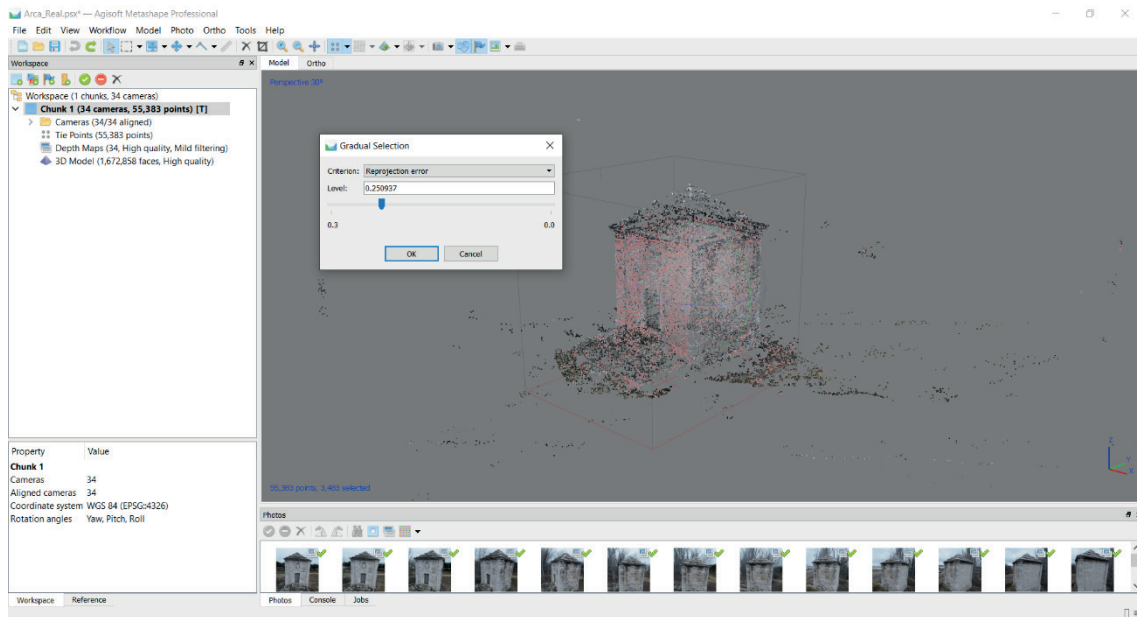


Figura 116. Filtrado de la nube de puntos de paso mediante la selección gradual por criterio de Error de Reproyección. Fuente: elaboración propia

Uso de máscaras

Cuando notemos que la nube de puntos de paso tiene puntos muy dispersos, es porque el objeto no se distingue bien del fondo, por lo que será necesario crear máscaras en las imágenes para que el programa defina mejor el objeto. Una máscara lo que hace es ocultar los píxeles de una zona de la fotografía para que no sean utilizados en el cálculo. El uso de máscaras es más recomendable cuando se realizan modelos de objetos pequeños. En modelos de objetos grandes como edificios o terrenos no es necesario realizar las máscaras. Como mucho si quisiéramos eliminar algún objeto concreto con farolas o árboles, o incluso ocultar el cielo para que no intente usarlo en el cálculo.

Metashape tiene una barra de herramientas de selección específicas para este paso. Son como las herramientas de selección de Adobe Photoshop. Es un proceso lento ya que hay que ir imagen por imagen.

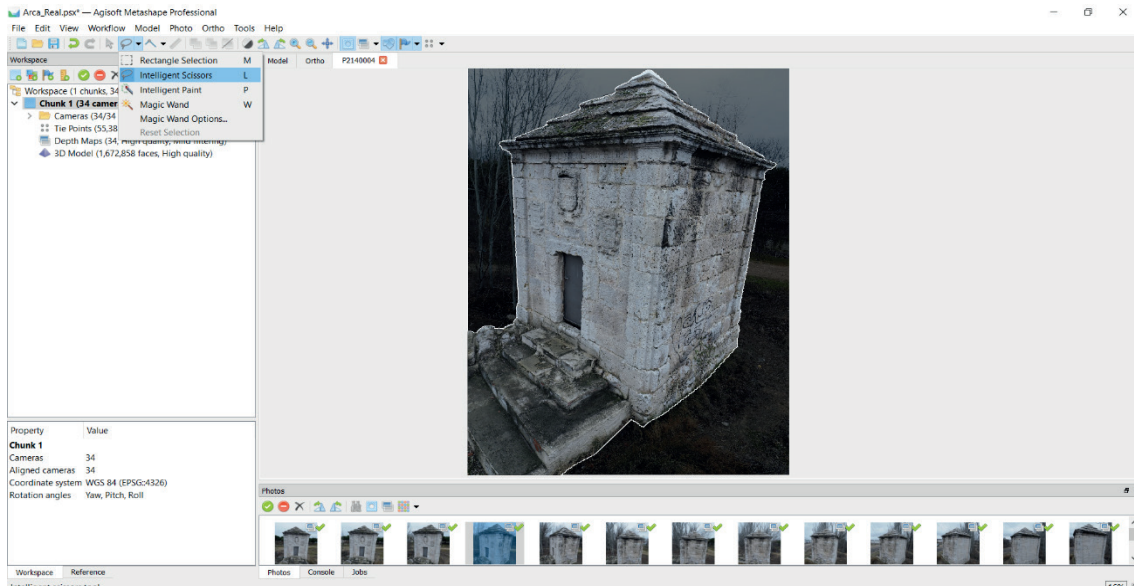


Figura 117. Proceso de enmascarado en las fotografías. Fuente: elaboración propia

Hay veces que hay que enmascarar muchas fotografías, otras veces menos y en algunos casos no son necesarias, todo depende de lo dispersos que estén los puntos de paso.

Una vez creadas las máscaras es necesario volver a realizar la orientación de las fotografías indicando en los parámetros que utilice las máscaras para los puntos de paso.

Otra opción más rápida de enmascarar las fotografías, pero que posteriormente habrá que comprobar máscara por máscara e incluso editarlas, será generar un modelo 3d de baja calidad para que se procese rápido. Una vez calculado, importamos de forma automática las máscaras a partir de ese modelo. Esto lo hacemos desde el menú **Importar -> Importar máscaras**. En la ventana de configuración seleccionamos Método: Desde modelo y Operación: Reemplazo. Todo ello aplicado a todas las fotografías.

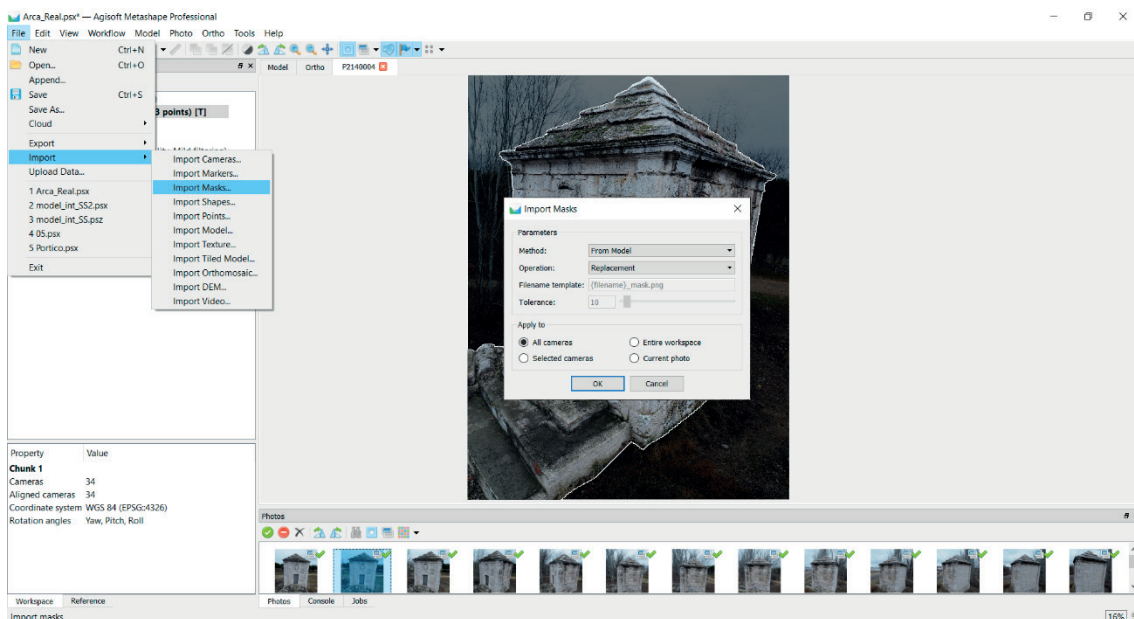


Figura 118. Modo de enmascaramiento mediante la importación de máscaras desde modelo 3d. Fuente: elaboración propia

Identificación de puntos de control

Otro de los pasos importantes es la identificación de puntos de control. Estos nos van a permitir dar escala al modelo, ya que al estar generado desde fotografías sin escala el modelo generado no es métrico. Estos puntos de control pueden ser referencias artificiales (dianas) o referencias naturales (elementos característicos o geometría reconocible en el modelo). Estos puntos tendrán que haber sido previamente medidos durante la toma de datos o extraídos de un modelo métrico. Cada punto o marcador tendrá que darse en múltiples fotografías. En cuantas más fotografías aparezca mayor será la precisión de su ubicación.

Para insertar un marcador se puede hacer desde la nube de puntos o desde las fotografías. Esta última es más precisa ya que si las fotos son buenas hay más detalle para poder colocarlos. Abrimos una fotografía y pulsamos botón derecho sobre el punto donde queremos insertar un marcador, y en el menú desplegable que aparece seleccionamos **Añadir marcador**. Este marcador aparecerá sobre la esquina superior derecha de las miniaturas de las fotografías de la barra inferior. Si la bandera es de color verde es porque el marcador está activo. Si el símbolo es gris, es porque el programa ha detectado el marcador, pero no está activado. Si la bandera es de color azul es porque el marcador está activo, pero hay que comprobarlo. Estos marcadores los utilizaremos para introducir coordenadas reales o crear barras de escala conocida entre pares de puntos.

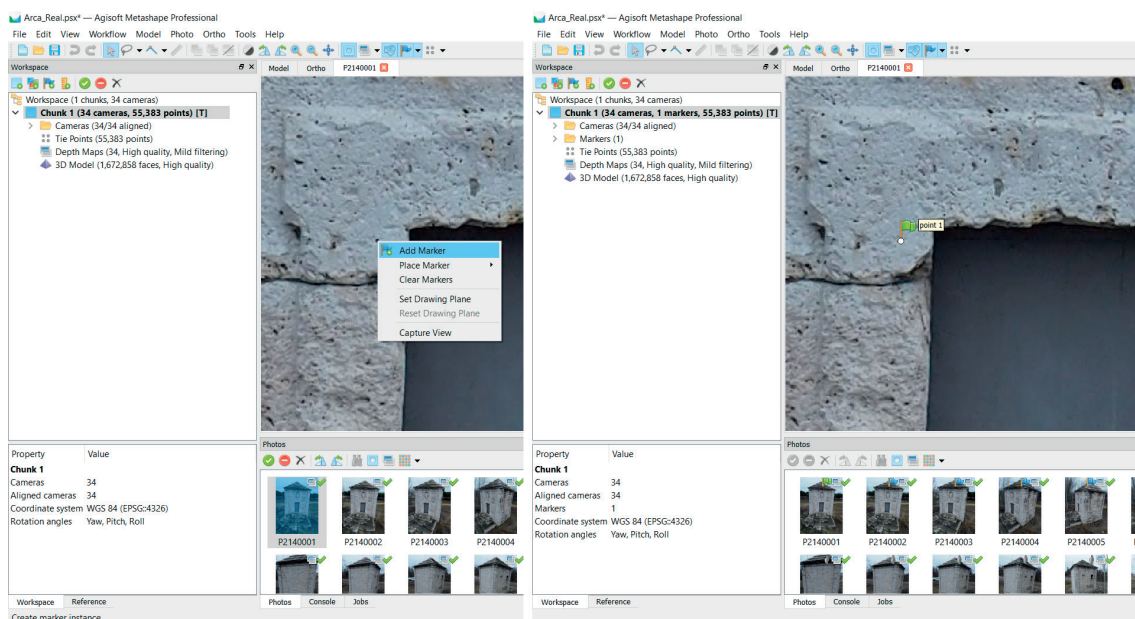


Figura 119. Proceso de añadir un punto de control o marcador en el modelo. Fuente: elaboración propia

3.2.4. CREACIÓN DE LA NUBE DENSA

La siguiente fase es la creación de la nube de puntos densa. En base a las posiciones de las cámaras el programa calcula la información de los mapas de profundidad para cada cámara con los que determina la posición de todos los puntos que definen el objeto. Esta nube de puntos puede ser editada y clasificada antes de la exportación o la generación de la malla 3D.

Antes de crear la nube de puntos densa hay que comprobar que la nube de puntos dispersa está dentro del cuadro o caja delimitadora, ya que si alguna zona queda fuera de esta caja no será calculada y habrá que repetir el proceso.

El cuadro delimitador se puede desplazar, girar y escalar en cualquiera de sus ejes.

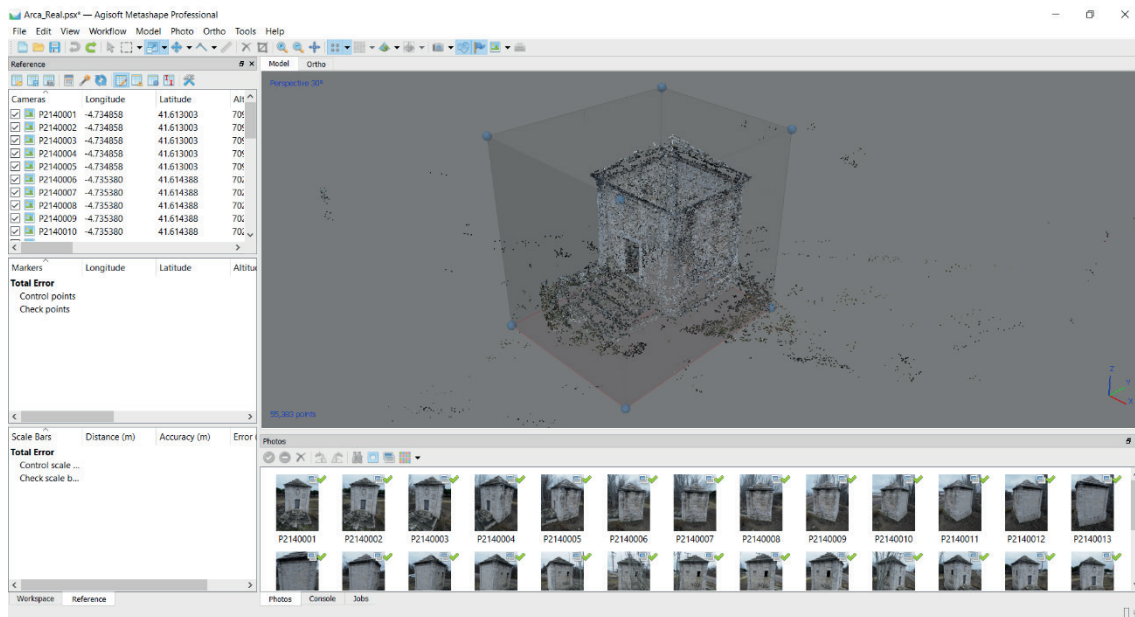


Figura 120. Ajuste de la caja delimitadora en traslación, rotación y escala para contener la nube dispersa completa. Fuente: elaboración propia

Una vez que comprobamos que la nube de puntos se encuentra dentro del cuadro delimitador, se procede a la generación de la nube de puntos densa desde el menú **Flujo de trabajo -> Construir nube densa**.

En los parámetros de configuración de la ventana Crear nube densa podemos elegir la calidad que más nos convenga, el nivel del filtrado de profundidad, el usar o no los mapas de profundidad calculados o calcular el color para los puntos.

El parámetro de calidad va a determinar los tiempos de cálculo, si elegimos una calidad baja el proceso de cálculo será muy rápido mientras que con una configuración alta los tiempos de cálculo aumentan y será un proceso lento. Elegiremos la calidad dependiendo de cuál sea la necesidad de nuestro trabajo, del tiempo del que dispongamos y el nivel de detalle que queramos conseguir.

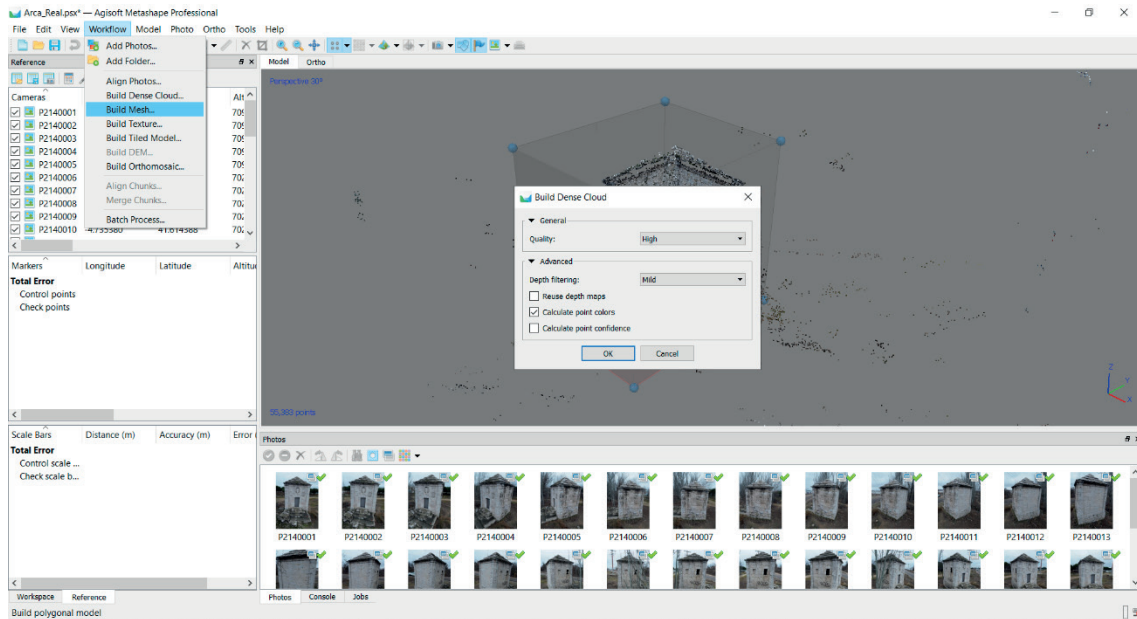


Figura 121. Ventana de configuración de los parámetros de la nube densa. Fuente: elaboración propia

3.2.5. CREACIÓN DE LA MALLA DE TRIÁNGULOS

La siguiente fase es la reconstrucción de una malla de triángulos de la superficie del objeto a partir de los datos de la nube de puntos densa. Para generarla hay que ir al menú **Flujo de trabajo** -> **Crear malla**.

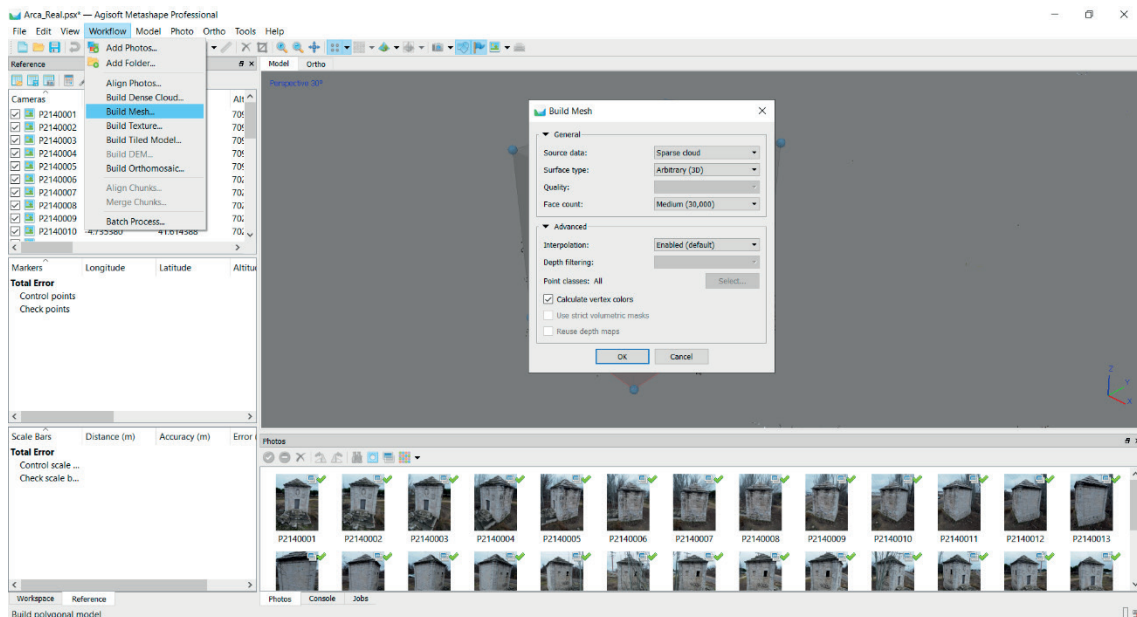


Figura 122. Cuadro de dialogo de la configuración de los parámetros de malla de triángulos. Fuente: elaboración propia

En el cuadro de dialogo de creación de malla se pueden configurar los siguientes parámetros³⁷.

37 Manual de usuario de Agisoft Metashape. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf

Datos de origen

- Nube dispersa. Para la generación rápida de modelos 3D basados únicamente en la nube de puntos dispersos. La configuración de la nube densa supone un tiempo de procesamiento más largo, pero genera un resultado de alta calidad.
- Mapas de profundidad. Permite utilizar toda la información de las imágenes de entrada de manera más eficaz y requiere menos recursos en comparación con la reconstrucción basada en nubes densas.

Tipo de superficie

- Arbitrario (3D). Se utiliza para modelar cualquier tipo de objeto. Debe seleccionarse para objetos cerrados, como estatuas, edificios, etc. No hace ninguna suposición sobre el tipo de objeto que se está modelando, lo que tiene un costo de mayor consumo de memoria.
- Campo de altura (2.5D). Está optimizado para el modelado de superficies planas, como terrenos o relieves de base. Debe seleccionarse para el procesamiento de fotografías aéreas, ya que requiere una menor cantidad de memoria y permite el procesamiento de conjuntos de datos más grandes.

Calidad.

Especifica la calidad de reconstrucción deseada de los mapas de profundidad, siempre que estén seleccionados como una opción de origen. Se pueden utilizar configuraciones de mayor calidad para obtener una geometría más detallada y precisa, pero requieren más tiempo para el procesamiento.

Recuento de caras.

Especifica el número máximo de polígonos en la malla final. Los valores sugeridos (Alto, Medio, Bajo) muestran el número óptimo de polígonos para una malla con un nivel de detalle determinado. También es posible introducir el número de polígonos en la malla final, pero es probable que un número demasiado pequeño de polígonos dé como resultado una malla demasiado rugosa o que un número personalizado demasiado grande cause problemas de visualización del modelo 3d en programas externos.

Además, se pueden ajustar los siguientes parámetros avanzados.

Interpolación (solo para opciones de fuente de nube de puntos). Si el modo de interpolación está desactivado, se obtienen resultados de reconstrucción precisos, ya que solo se reconstruyen las áreas correspondientes a puntos densos de nubes de puntos. Con el modo de interpolación habilitado (predeterminado), Metashape interpolará algunas áreas de superficie dentro de un círculo de un cierto radio alrededor de cada punto de nube densa. En el modo Extrapolado, el programa genera un modelo sin agujeros con geometría extrapolada. Se pueden generar grandes áreas de geometría adicional con este método, pero se pueden eliminar fácilmente más adelante utilizando herramientas de selección y recorte.

Clases de puntos (solo se activa cuando se ha realizado una clasificación de los puntos)

Especifica las clases de la nube de puntos densos que se utilizarán para la generación de mallas. Por ejemplo, seleccionar sólo “Puntos de tierra” para producir un DTM en lugar de un DSM.

Calcular los colores de los vértices

Si los datos de origen tienen información de color para los puntos, opcionalmente puede calcular los colores de los vértices.

Utilizar enmascaramiento volumétrico estricto

Con esta opción habilitada, se suprimirá el volumen de espacio cubierto con máscara de al menos una foto. Cada máscara hace que la reconstrucción de la malla sea más lenta. Por ejemplo, las máscaras volumétricas estrictas son útiles para suprimir el ruido entre los dedos enmascarando el espacio entre ellos desde una sola cámara. También es útil para suprimir el fondo sin textura pegado a los contornos de los objetos, enmascarando el fondo de una sola cámara.

Reutilizar mapas de profundidad

Esta opción es aplicable únicamente al método de reconstrucción basado en mapas de profundidad. Después de construir la malla puede ser necesario editarla. Algunas ediciones básicas se pueden realizar en Metashape, pero para una edición más compleja es recomendable utilizar programas externos de edición 3d (3DMax, Maya, ZBrush, Blender, etc.). Metashape permite exportar la malla, editarla en un programa externo y volverla a importar de nuevo.

3.2.6. TEXTURIZADO

Tras crear la malla el siguiente paso es texturizar o mapear su superficie. El programa a cada triángulo le determinará unas coordenadas UVW y aplicará un fragmento de textura de una de las fotografías utilizadas en la restitución correspondiente a esa zona.

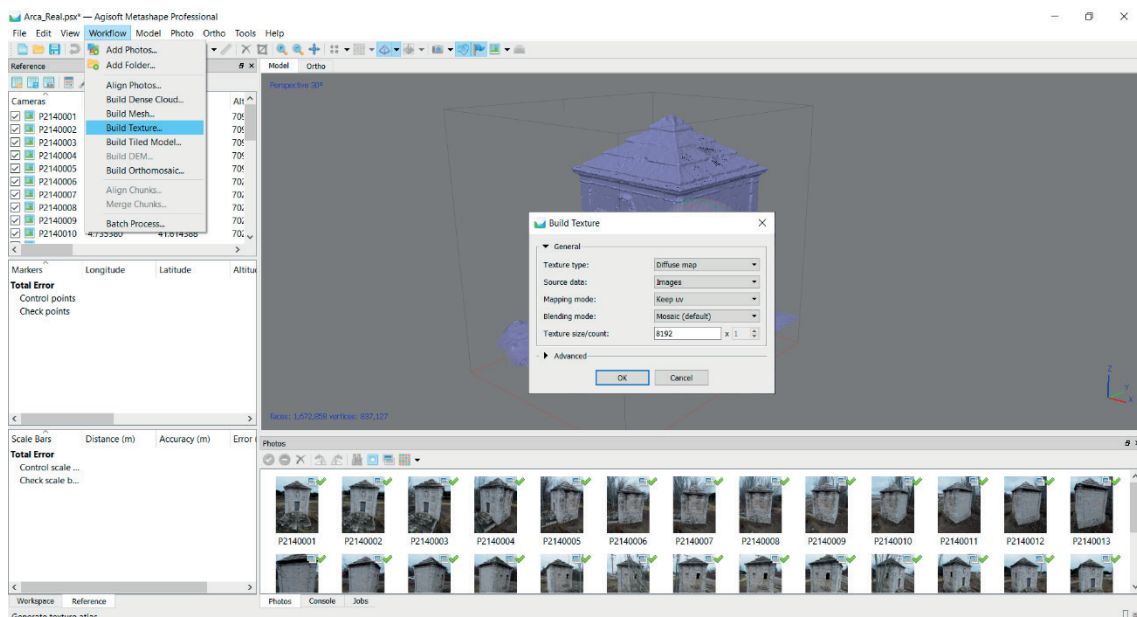


Figura 123. Cuadro de diálogo de Metashape con los parámetros para el cálculo de la textura. Fuente: elaboración propia

El procedimiento para calcular la textura es ir al menú **Flujo de trabajo -> Crear textura**. En el cuadro de dialogo que se abre hay varios parámetros de configuración:

Tipo de textura

- Mapa difuso: textura básica con los colores de la superficie del modelo.
- Mapa normal: textura de las normales de la malla. Es una textura para dar relieve.
- Mapa de oclusión: textura que contiene información de sombreado calculada a partir de la iluminación de fondo.

Datos de origen

- Imágenes: crea el mapa de color a partir de las imágenes utilizadas en el alineamiento.
- Modelo 3D: crea el mapa de normal a partir de otro modelo y lo transfiere al modelo actual.

Modo de mapeo. Determina cómo se desarrollará el atlas de texturas.

- Mapeo genérico (es el modo predeterminado). El programa crea una textura lo más uniforme posible.
- Mapeo de Ortofoto. La superficie del objeto está texturizada en la proyección ortográfica.
- Mapeo de ortofoto adaptativa. La superficie del objeto se divide en la parte plana y las regiones verticales.
- Mapeo esférico. Solo se usa cuando los objetos tienen forma de bola. Permite exportar atlas de texturas continuas para este tipo de objetos, por lo que es mucho más fácil editarlo posteriormente.
- Mapeo de imágenes individuales. Genera una textura a partir de una sola foto. La foto que se utilizará para texturizar se puede seleccionar de la lista 'Textura de'.
- Mapeo conservar UV. Genera un atlas de texturas usando la parametrización de texturas actual. Se utiliza para reconstruir atlas de texturas con diferente resolución o para generar el atlas para el modelo parametrizado en el software externo.

Modo de fusión (no se usa en el modo de mapeo de una sola cámara). Selecciona la forma en que se combinan los valores de color de los píxeles de diferentes cámaras en la textura final.

- Mosaico. Da más calidad para la Ortofoto, ya que no se mezclan detalles de la imagen de fotos superpuestas, pero utiliza la foto más apropiada. Este modo es especialmente útil para la generación de ortofotos basado en el modelo geométrico aproximado
- Promedio. Utiliza el valor promedio ponderado de todos los píxeles de fotos individuales.
- Intensidad máxima. Selecciona la foto que tiene la máxima intensidad de píxel.
- Intensidad mínima. Selecciona la foto que tiene la mínima intensidad de píxel.
- Deshabilitado. La foto de la que se toma el valor de color para el píxel se elige como la del componente de alta frecuencia en el modo mosaico.

Tamaño / recuento de textura

Especifica el tamaño (ancho y alto) del atlas de textura en píxeles y determina la cantidad de archivos a los que se exportará la textura.

Además, se pueden ajustar los siguientes parámetros avanzados.

Habilitar el llenado de agujeros

Esta opción está habilitada de forma predeterminada, ya que ayuda a evitar el ruido de sal y pimienta³⁸ en caso de una superficie complicada con numerosas partes diminutas que sombrean otras partes del modelo.

Habilitar filtro fantasma

En caso de que la escena incluya algunas estructuras delgadas u objetos en movimiento que no se pudieron reconstruir.

Hay cuatro formas diferentes de visualizar la malla generada: modelo sombreado a color, modelo sólido monocromático, modelo alámbrico y modelo texturizado.

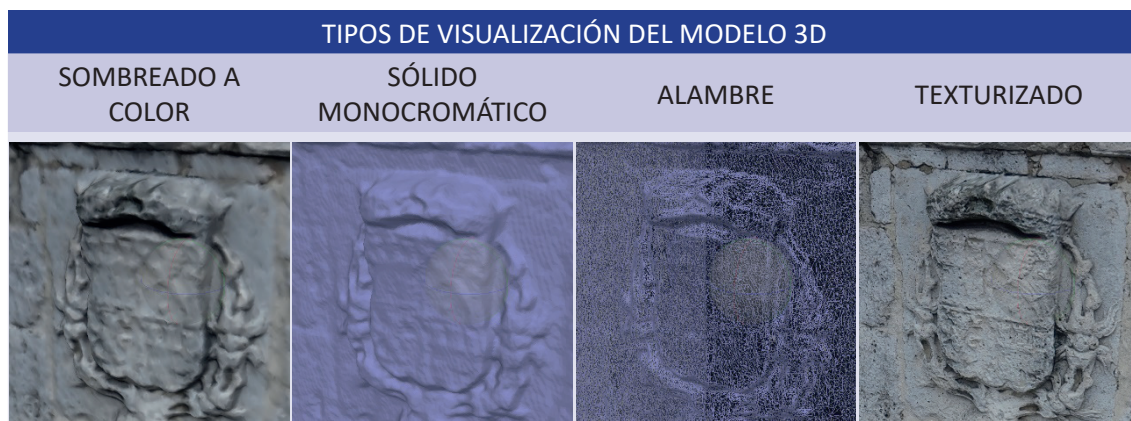


Tabla 12. Tipos de visualización en Metashape de la malla tridimensional

3.2.7. CREACIÓN DE ORTOFOTOS

Metashape solo crea la ortofoto de lo que hay dentro del cuadro delimitador. Para generar una ortofoto hay que ir al menú **Flujo de trabajo** -> **Construir Ortomosaico**.

³⁸ El ruido sal y pimienta (*salt-and-pepper noise*) se presenta principalmente en imágenes y se caracteriza principalmente por cubrir de forma dispersa toda la imagen con una serie de píxeles blancos y negros

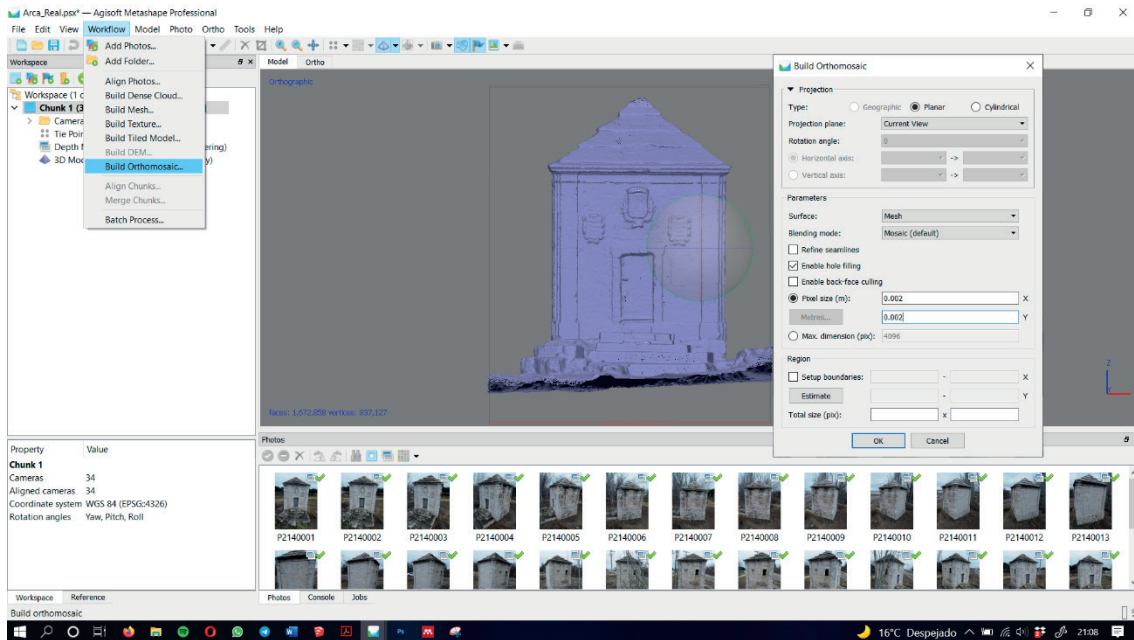


Figura 124. Cuadro de diálogo de creación de ortofoto en Metashape. Fuente: elaboración propia

El cuadro de diálogo muestra una serie de parámetros para configurarlo.

Tipo de proyección

- Geográfico: permite elegir un sistema de coordenadas geográficas de la lista desplegable o cargar parámetros de un sistema de coordenadas geográficas personalizado.
- Planar. Metashape permite proyectar el ortomosaico en un plano definido por el usuario, siempre que se seleccione malla como tipo de superficie.
- Cilíndrico: permite proyectar un ortomosaico en una superficie cilíndrica.

Plano de proyección

- Vista actual. Utiliza el plano de proyección de lo que estamos viendo en ese momento, es un plano paralelo a la pantalla.
- Marcadores. Plano definido por marcadores. Se requieren al menos tres marcadores. El primer par establece el eje y el tercer marcador define el punto cero.
- Vistas predefinidas. Podemos elegir cualquiera de las vistas de un cubo (frente, atrás, derecha, izquierda, arriba y abajo)

Parámetros

- Superficie
 - o Malla. Utiliza la malla creada como base para proyectar la ortofoto.
- Modo de fusión
 - o Mosaico (predeterminado). Implementa un enfoque con división de datos en varios dominios de frecuencia que se combinan de forma independiente. El componente de frecuencia más alta se mezcla solo a lo largo de la línea de unión.

- Promedio. Utiliza el valor de color promedio ponderado de todos los píxeles de imágenes individuales.
- Desactivado. El valor de color para el píxel se toma de la imagen con la vista de la cámara casi a lo largo de la normal a la superficie reconstruida en ese punto.
- Cara posterior. Si está activado no considera las caras posteriores, las que tienen las normales en dirección contraria al plano de proyección.
- Llenado de agujeros. Está habilitada de forma predeterminada ya que ayuda a evitar el efecto de sal y pimienta en caso de una superficie complicada con numerosas partes diminutas que somborean otras partes del modelo de superficie de origen.
- Refinar las líneas de costura. Activar para ortomosaicos basados en MDT (modelo digital del terreno) para crear líneas de unión creadas sin artefactos visuales en la imagen final.
- Tamaño de píxel. Hace referencia a la resolución de la ortofoto definida por el tamaño del píxel en metros.

Max. dimensión (pix). El parámetro permite establecer la dimensión máxima para los datos raster resultantes.

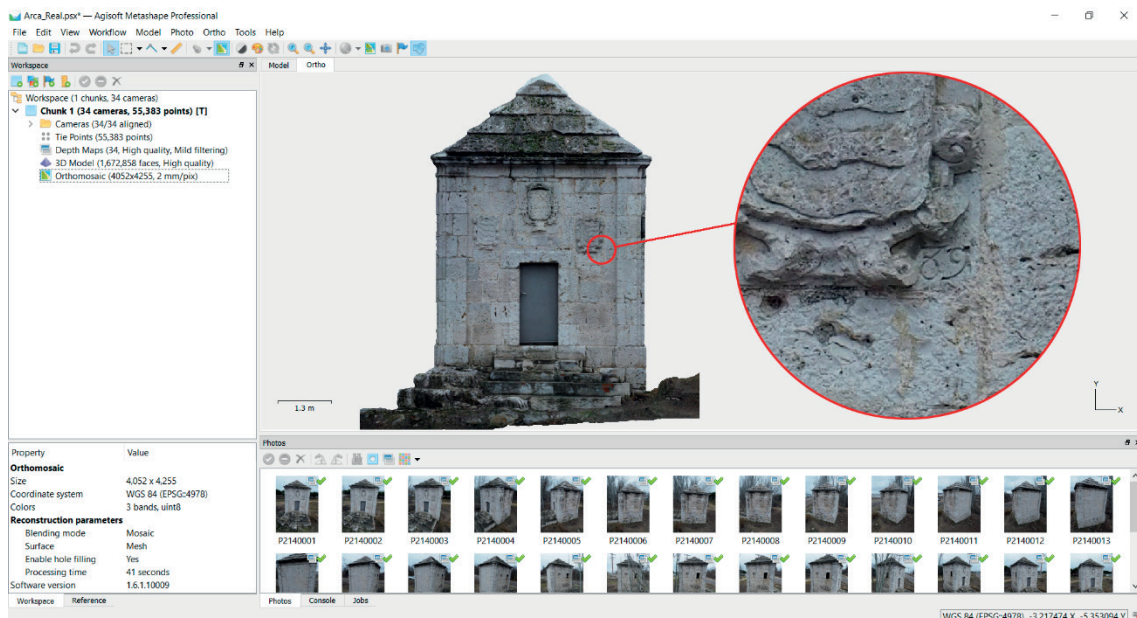


Figura 125. Visualización de la ortofoto creada y ampliación de nivel de detalle. Fuente: elaboración propia

3.2.8. EXPORTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Son varios los productos que se obtienen en Metashape, y estos se pueden exportar para poder trabajar con ellos de forma externa al programa.

Nube de puntos densa

La nube de puntos densa se puede exportar como si fuera un escaneo para ser utilizada en los programas de registro de escaneos. Para ello lo recomendable es exportar la nube en formato E57. También se puede exportar en formatos PTS, LAS, LAZ o XYZ. Se realiza desde **Archivo** ->

Exportar -> Exportar Puntos... o desde el menú contextual cuando pulsamos botón derecho del ratón sobre el grupo que tiene nuestro trabajo. En los parámetros de exportación se puede elegir el sistema de coordenadas, exportar el color o no de los puntos o incorporar la información de las normales de cada punto.

Estas nubes de puntos se pueden subir a visores web que permiten navegar por los puntos, realizar mediciones, etc. Ejemplo de esto es el visor web PointBox³⁹ creado por la empresa española Geobit Consulting.

[Malla de triángulos](#)

La malla o modelo 3d se puede exportar en varios formatos que posteriormente se podrán editar o visualizar en programas externos. Se realiza desde el menú **Archivo -> Exportar -> Exportar Modelo**

Hay varios formatos de exportación:

- U3D. Formato de archivo para poderlo insertar dentro de un pdf.
- OBJ. Es el formato estándar. Lleva asociado un archivo *.mtl con las características del mapeo de la textura. Este formato se puede utilizar para los visores web como Sketchfab⁴⁰. Metashape también tiene la opción de subir directamente los modelos 3d a Sketchfab sin tener que exportarlos. El formato OBJ también es el más utilizado en los programas de edición 3d.
- FBX. Formato que puede contener información extra como animaciones. Es el formato utilizado en los motores de renderizado o programas de realidad virtual como Unity o Unreal Engine⁴¹.
- STL. Formato enfocado a la producción con impresoras 3d. Es un formato sin textura.

[Ortofotos](#)

Para exportar las ortofotos hay que ir al menú **Archivo -> Exportar -> Exportar Ortomosaico**

En el cuadro de dialogo solo hay que indicar el sistema de coordenadas si el modelo está georeferenciado. El resto de parámetros están establecidos según los parámetros establecidos en la creación de la ortofoto.

39 <https://www.pointbox.xyz>

40 <https://sketchfab.com>

41 <https://www.unrealengine.com>

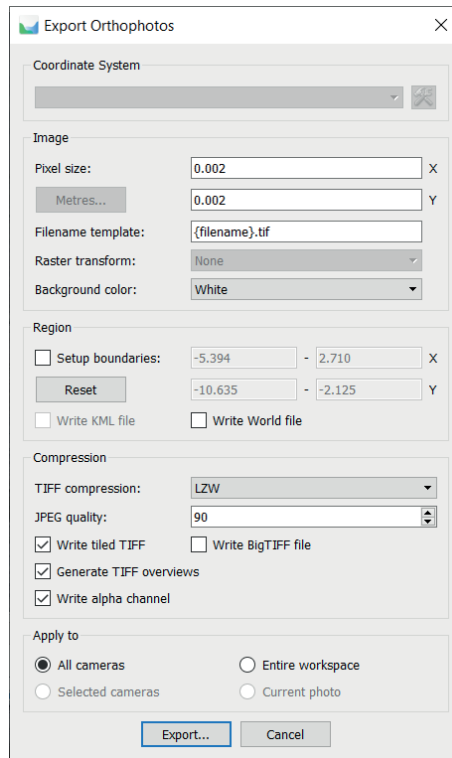


Figura 126. Ventana de configuración parámetros exportación ortofoto. Fuente: elaboración propia

Los resultados que podemos obtener a partir de la fotogrametría digital son varios tipos de productos, cada uno de los cuales podremos orientarlos a un fin determinado. Las nubes de puntos se pueden utilizar para su visualización para consulta de datos o para realizar análisis del objeto. El modelo 3d sin textura puede ser utilizado para la reproducción 3d mediante impresoras (filamento, polvo o resinas). El modelo 3d con textura será utilizado para aplicaciones de realidad virtual o realidad aumentada (Ángel J.Fernández Álvarez, 2010; Caiza Infante et al., 2016; Ruiz Torres, 2013). Y las ortofotos serán utilizadas para el desarrollo de planimetrías para la definición del objeto (plantas, alzados y secciones).

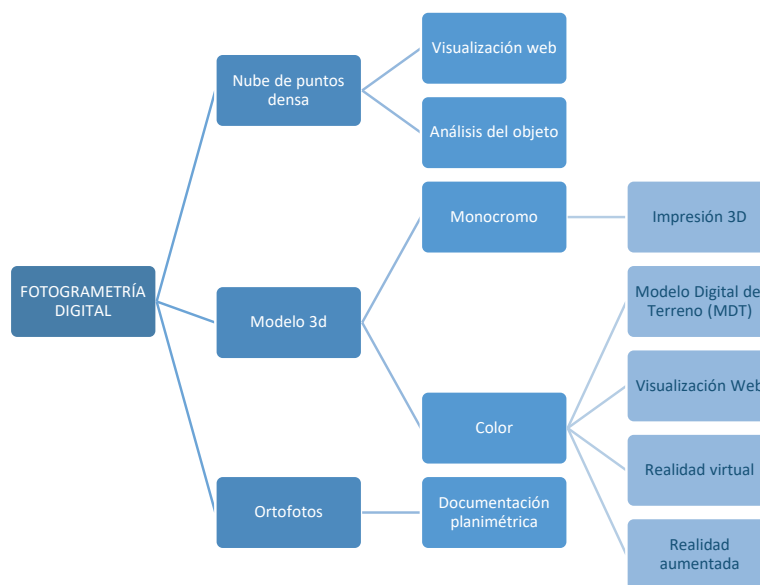


Figura 127. Esquema de los resultados que se pueden obtener en la fotogrametría digital. Fuente: elaboración propia

Al final los resultados obtenidos mediante la fotogrametría digital están bastante parejos a los conseguidos a través del escaneado láser. Existen varios estudios o investigaciones centradas en esta equiparación de resultados (Fernandez et al., 2005), sobre todo cuando se documentan objetos de pequeño formato. Además, los tiempos de trabajo son inferiores a los tiempos de trabajo con datos de escáner láser.

Tiempos de trabajo Fotogrametría digital

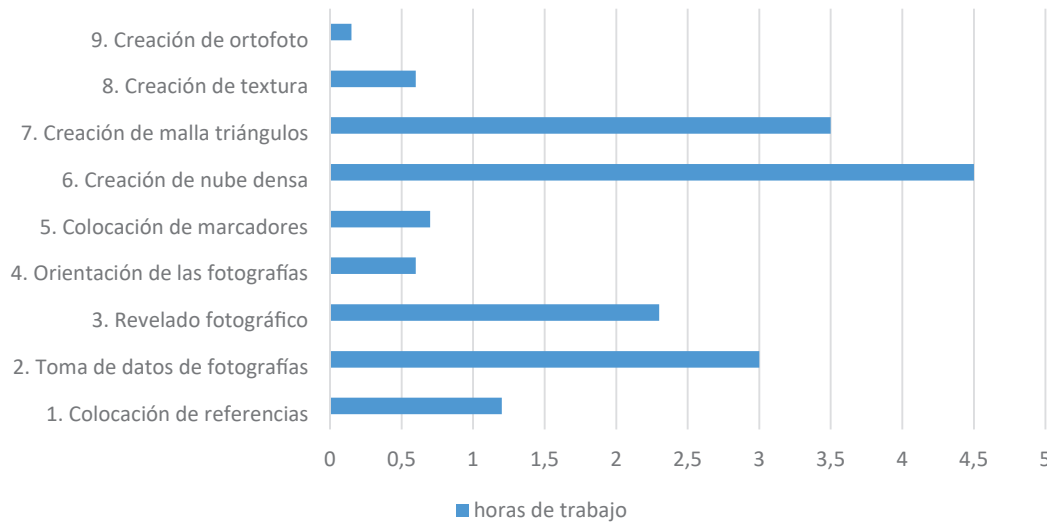


Tabla 13. Tabla de tiempos estimados para un trabajo realizado de Fotogrametría Digital de unas 120 fotografías.

Fuente: elaboración propia

3.3. Metodología híbrida

La metodología híbrida es la combinación de los resultados obtenidos tanto con el escáner láser como con la fotogrametría digital (B. Alonso et al., 2016). Esta combinación se puede producir en las dos direcciones, y es conveniente utilizarla, ya que los resultados obtenidos con el escáner láser tienen una gran precisión métrica (dependiendo del escáner utilizado se pueden alcanzar precisiones de milímetro) pero una baja calidad de color o radiométrica. Mientras que los datos obtenidos con la fotogrametría digital tienen una buena calidad métrica y radiométrica que dependerá fundamentalmente de la calidad de las fotografías, cantidad de fotografías y el nivel de detalle reflejado en cada fotografía (Barba et al., 2020; Moussa, 2014).

Otra cosa que también es bueno tener en cuenta es que las aplicaciones de procesado y registro de los escáneres láser están más enfocadas a trabajar con nubes de puntos, mientras que los programas de fotogrametría digital están más enfocados a trabajar como mallas de triángulos.

3.3.1. DE ESCÁNER LÁSER A FOTOGRAMETRÍA

Este proceso se utiliza cuando queremos generar un modelo de malla de buena calidad métrica y radiométrica. En este caso se utiliza la nube de puntos de proyecto generada por el escáner láser dentro del programa de fotogrametría (Lerma et al., 2015). El proceso será calcular una nube de puntos del conjunto homogénea (no hace falta que tenga color) y exportarla en formato *.E57

con la misma orientación y posición que tiene el modelo de fotogrametría. Esta nube hay que importarla en el programa de fotogrametría como una nube densa y marcar puntos de control comunes. Es necesario que coincidan en posición para que el texturizado se calcule en su posición correcta. Una vez cargada y alineada la nube de puntos densa obtenida con el escáner láser, se procede al cálculo de la malla de triángulos y a su texturizado.

También existe la posibilidad de exportar de forma individual cada uno de los escaneos en formato E57. Estos se importarán dentro de Metashape como nubes de puntos, pero el programa los tratará como una fotografía esférica.

3.3.2. DE FOTOGRAMETRÍA A ESCÁNER LÁSER

Este proceso se utiliza cuando queremos tener un modelo de nube de puntos más completo. En este caso se utiliza la nube de puntos densa generada dentro del programa de fotogrametría digital dentro del programa de procesado y registro del escáner láser. Un ejemplo sería la documentación de un edificio con ambos sistemas, en el que se ha realizado todo el exterior e interior con escáner láser con escaneos realizados a una cota baja (cobertura edificio 70-80%), y la documentación de las cubiertas y el exterior mediante fotogrametría aérea utilizando un dron con dos rejillas de toma de datos, una cenital y otra oblicua (cobertura edificio 95%). Si combinamos los resultados de los dos métodos conseguiremos una cobertura de casi el 100% de la superficie paramentos y cubiertas del edificio. Para ello se exporta desde el programa de fotogrametría digital la nube densa en formato *.E57 y se importa dentro del programa de procesado y registro del escáner láser. Para que quede bien alineado con el resto de escaneos se realiza un registro de ajuste fino mediante el modo Cloud to Cloud.

4. DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS A TRAVÉS DE LOS NUEVOS SERVICIOS WEB 2.0

En un principio todos estos métodos de documentación tridimensional de objetos (arquitectura, escultura, arqueología, etc.) mediante escáner láser o fotogrametría, tienen como objetivo el documentar y dejar registro del estado del objeto. Y como mucho con esos modelos tridimensionales extraer información para generar una documentación planimétrica del estado actual.

En la actualidad gracias a todas las herramientas web que han surgido, podemos dar más utilidades y generar más contenido de estos modelos tridimensionales desde el punto de vista de la difusión. Estos trabajos dejan de ser solo utilizados para generar una documentación especializada y usada solo por técnicos, a ser elemento de acercamiento a la gente para que conozcan mejor estos objetos e incluso puedan interactuar con ellos, aunque se encuentren a miles de kilómetros de distancia.

4.1. Documentación planimétrica

Existen varias formas de difundir los resultados, siendo la más extendida y conocida la del pdf. Es un formato universal de consulta de datos. En este tipo de archivos podemos compartir y alojar en cualquier web o espacio de internet la documentación planimétrica que define la planta, alzados y secciones de nuestro objeto. Pero otra de las cualidades de este tipo de archivos es que puede incorporar otro tipo de documentación, como audio o vídeos. Pero también permite incorporar modelos 3d en los que podremos navegar e incluso interactuar realizando medidas o visualizando su sección respecto a cualquiera de los ejes.

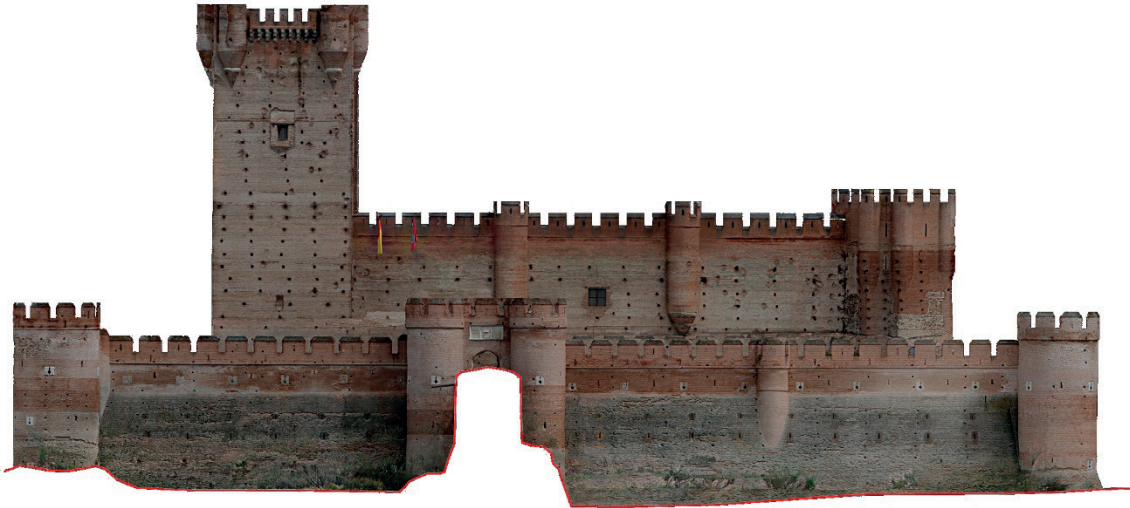


Figura 128. Ortofoto del castillo de la Mota en Medina del Campo generada a partir de un modelo fotogramétrico. Fuente: elaboración propia

4.2. Nubes de puntos

Las nubes de puntos obtenidas tanto desde escáner láser como desde fotogrametría digital nos van a permitir realizar trabajos especializados sobre ellas como son la extracción de datos para diagnósticos, análisis de los datos para la comprobación de deformaciones o la generación de documentación gráfica a través de la generación de ortomosaicos. Pero además del trabajo especializado también podemos utilizarlas como elemento de divulgación para la población. Para ello podemos servirnos de las aplicaciones que ofrecen las propias empresas de los escáneres láser o utilizar las diferentes alternativas que hay en la web que funcionan realmente como visualizadoras de nubes de puntos. Ejemplo de una de estas herramientas de visualización web es Pointbox⁴². Es una herramienta gratuita bastante potente, que nos permite visualizar y navegar por una nube de puntos de grandes dimensiones. No tiene límite en el número de puntos de la nube, solo en el tamaño máximo del archivo, este no puede superar los 2Gb.

42 Herramienta creada por la empresa leonesa Geobit Consulting. www.pointbox.xyz

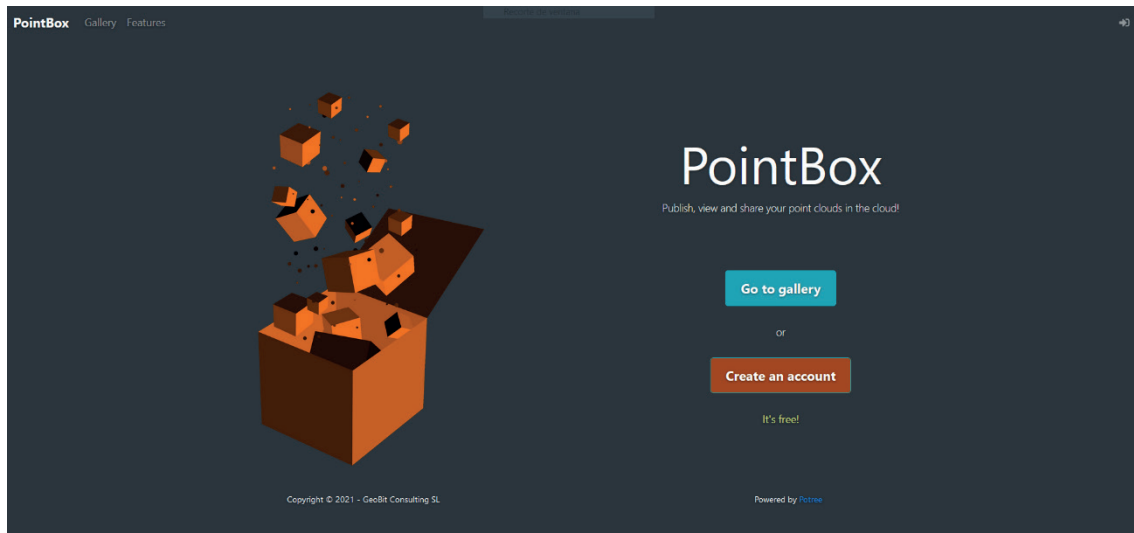


Figura 129. Pantalla de inicio de la aplicación web de visualización de nubes de puntos Pointbox. Fuente: www.pointbox.xyz [Consultado: 01/04/2019]

La agilidad en la visualización es debido al uso de Potree⁴³, lo que nos va a permitir incluso visualizar las nubes de puntos desde soportes móviles como tablets o smartphone. Potree basa su funcionamiento en algoritmos que segmentan la nube de puntos en octrees⁴⁴. Para ello divide la nube de puntos en muchos cuadrados pequeños o vóxeles⁴⁵, cada lado de un pequeño cuadrado se corta en dos de manera uniforme, este pequeño cuadrado se convertirá en ocho pequeños cuadrados del mismo tamaño. Este paso puede repetirse continuamente hasta que el tamaño del cuadrado final alcance la mayor precisión de modelado, haciendo que según sea el nivel de visualización se muestre más o menos detalle. Lo único a tener en cuenta es estar conectado a una red wifi o tener un buen plan de datos, ya que el tráfico de archivos es muy grande. Potree está diseñado para trabajar con nubes de puntos en formato LAS.

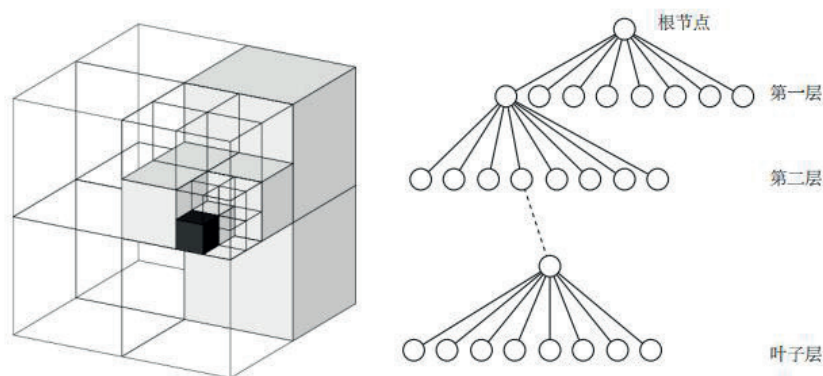


Figura 130. Esquema de división del cubo en octrees. Fuente: <https://programmerclick.com/article/13011211203> [Consultado:18/06/2019]

43 Software de código abierto basado en WebGL, capaz de renderizar grandes nubes de puntos. <https://github.com/potree>

44 Octree es una estructura en “árbol” de datos en la cual cada nodo interno tiene exactamente 8 “hijos”. Las estructuras octree se usan mayormente para particionar un espacio tridimensional, dividiéndolo recursivamente en ocho octantes. <http://diccionario.sensagent.com/Octree/es-es/>

45 El vóxel (del inglés *volumetric pixel*) es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional. Constituye la unidad mínima procesable de una matriz tridimensional y es, por tanto, el equivalente del píxel en un objeto 2D

La herramienta tiene diferentes modos de visualización, pero además tiene algunas herramientas que nos permitirán realizar mediciones entre puntos, calcular volúmenes o generar perfiles/secciones.

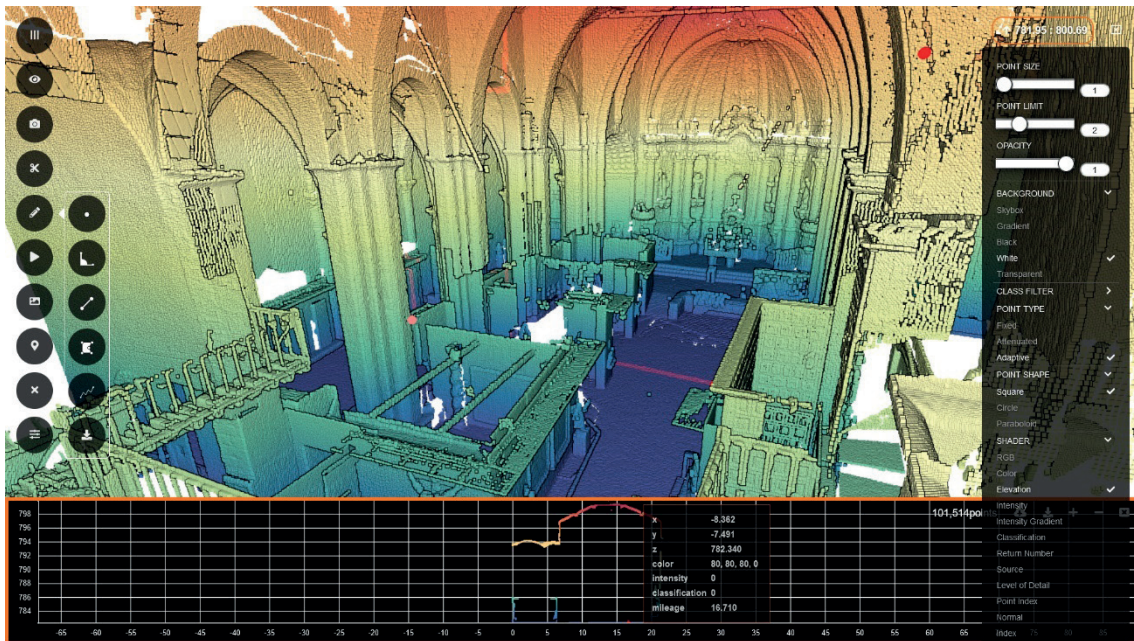


Figura 131. Ventana de visualización de nube de puntos en Pointbox. Fuente: elaboración propia. Nube de puntos del interior de la iglesia de Santa María en Becerril de Campos (Palencia)

4.3. Mallas tridimensionales

Las mallas de triángulos que obtenemos desde los datos del escáner láser o desde la fotogrametría digital vamos a poder utilizarlas para conseguir diferentes soluciones de difusión tanto físicas como virtuales.

4.3.1. REPRODUCCIONES 3D

Se basa en la generación de objetos tangibles a partir de los modelos tridimensionales que hemos creado. Para poder hacer la reproducción únicamente necesitamos un modelo 3d sin textura. En este caso como se busca la obtención de una reproducción con el máximo detalle posible, es necesario que el modelo 3d utilizado sea el de alta resolución (High poly). Existen dos métodos de fabricación para la obtención de reproducciones a partir de modelos 3d:

- Fabricación sustractiva. Se basa en el mecanizado CNC (control numérico por computadora) en el que se va eliminando material hasta obtener la pieza. Se trata de un proceso de mecanizado automático con herramientas como taladros, tornos y láseres para generar piezas físicas a partir de archivos de CAD (diseño asistido por ordenador). Es un proceso de fabricación muy rápido, preciso y requiere muy poca intervención humana. Este tipo de máquinas pueden trabajar con cualquier tipo de material y tamaño. Las máquinas CNC operan en un mínimo de tres ejes XYZ y estos determinan el movimiento que puede realizar la máquina siguiendo las instrucciones de la computadora. Las instrucciones que recibe la máquina están escritas en un lenguaje de programación

conocido como G-code⁴⁶. Las mejores máquinas son aquellas que tienen 5 ejes de trabajo, ya que van a conseguir realizar piezas más difíciles y con mejor detalle.

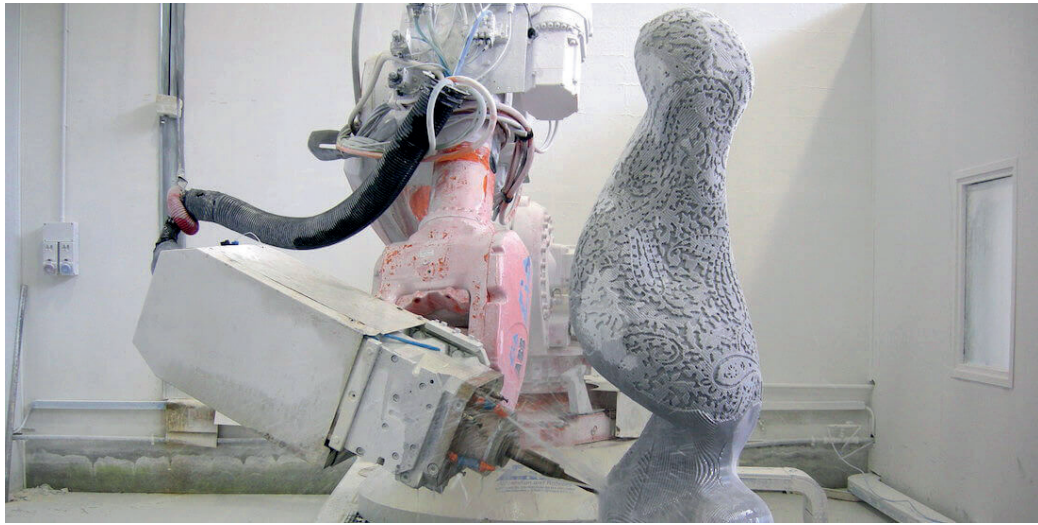


Figura 132. Máquina CNC de 5 ejes. Fuente: <https://redshift.autodesk.es/digital-stone-project> [Consultado: 11/02/2021]

- Fabricación aditiva o fabricación por adición de capas depositando material. Hace referencia a la impresión 3D. Se basa también en un sistema CNC basado en movimientos en coordenadas cartesianas XYZ, que recibe las instrucciones a través un archivo que va escrito en un lenguaje G-code. Está enfocado a la producción de piezas pequeñas, y aunque se trata de un sistema rápido ya que la fabricación es directa (no se necesita la creación de moldes previos) los tiempos de ejecución son largos. Por ejemplo, para la fabricación de una pieza de un tamaño aproximado de 20 x 20 x 20 m se pueden llegar a tiempos de producción de hasta 48 h.

Según la tecnología utilizada podemos encontrar varios tipos de impresión 3d:

Sinterización Selectiva por Láser (SLS). También conocido en inglés como *Selective Laser Sintering* (SLS), esta tecnología hace uso del láser para imprimir los objetos en 3D.

Nació en los años 80, y pese a tener ciertas similitudes con la tecnología SLA, ésta permite utilizar un gran número de materiales en polvo (cerámica, cristal, nylon, poliestireno, etc.). El material se pone en una gran cubeta o compartimento y su funcionamiento se basa en un láser que se desplaza capa a capa impactando en el polvo, funde el material y se solidifica. Todo el material que no se utiliza se almacena en la misma cubeta por lo que, no se desperdicia nada. No necesita soportes de impresión.

Impresión por inyección. Es un sistema muy parecido a las impresoras de tinta, pero en ve de inyectar gotas de tinta en el papel, inyecta capas de fotorpolímero líquido que posteriormente es curdo o endurecido con luz ultravioleta. No necesita soportes de impresión.

Estereolitografía (SLA). Se basa en la aplicación de un haz de luz ultravioleta en una resina líquida sensible a la luz que está en una cubeta. La luz UV va solidificando la resina

⁴⁶ Según la Wikipedia, el G-code, también conocido como RS-274, es un lenguaje de programación utilizado en el control numérico de máquinas en el que se les indica qué hacer y cómo hacerlo.

capa por capa. La base que soporta la estructura se desplaza hacia abajo para que la luz vuelva a ejercer su acción sobre el nuevo baño, así hasta que el objeto alcanza la forma deseada. La producción es en sentido invertido, de abajo hacia arriba. Las piezas son de muy alta calidad, pero se desperdicia una parte de material. Además, es necesario tenerla en espacios bien ventilados ya que produce gases tóxicos. Necesita soportes de impresión.

Deposición de material fundido (FDM). También se las conoce como FFF (*Fused Filament Fabrication*) y son las impresoras de uso más extendido. Su funcionamiento consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana, capa a capa. El material se encuentra inicialmente sólido almacenado en rollos o bobinas, este pasa por un extrusor y un hotend⁴⁷ donde se funde a altas temperaturas y es expulsado por la boquilla en finos hilos que se van solidificando según va tomando la forma de cada capa. Los materiales que más se utilizan son el ABS⁴⁸ y el PLA⁴⁹. Necesita soportes de impresión.



Figura 133. Diferentes tecnologías existentes de impresión 3d mediante fabricación aditiva. Fuente: imágenes Google

Para preparar el archivo para la impresión 3d, partimos de un modelo 3d guardado en formato OBJ o STL. Este archivo tendrá que estar completamente cerrado, sino no será posible imprimirlo. Para asegurarnos que el modelo no tiene agujeros, podemos solucionarlo desde la barra de herramienta de Agisoft Metashape en la opción de cerrar agujeros. Si estos son pequeños el cierre no se notará, pero si los agujeros son grandes el cálculo por interpolación puede producir resultados no muy precisos.

Si tenemos el modelo ya generado, otra opción es abrir el archivo en el programa 3D Builder que viene instalado por defecto en Windows. Al abrir el archivo, el programa nos notificará si el modelo 3d tiene errores o agujeros y lo solucionará.

47 El hotend es el conjunto de elementos destinados a fundir y extruir el filamento, antes de depositarlo en el espacio de construcción. Trabaja siempre en conjunto con el extrusor, ya sea en montaje directo o indirecto.

48 El filamento de ABS, acrilonitrilo butadieno estireno, es un polímero termoplástico conocido principalmente por su buena resistencia a las bajas temperaturas y su peso liviano.

49 El filamento PLA, ácido poliláctico, es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar.

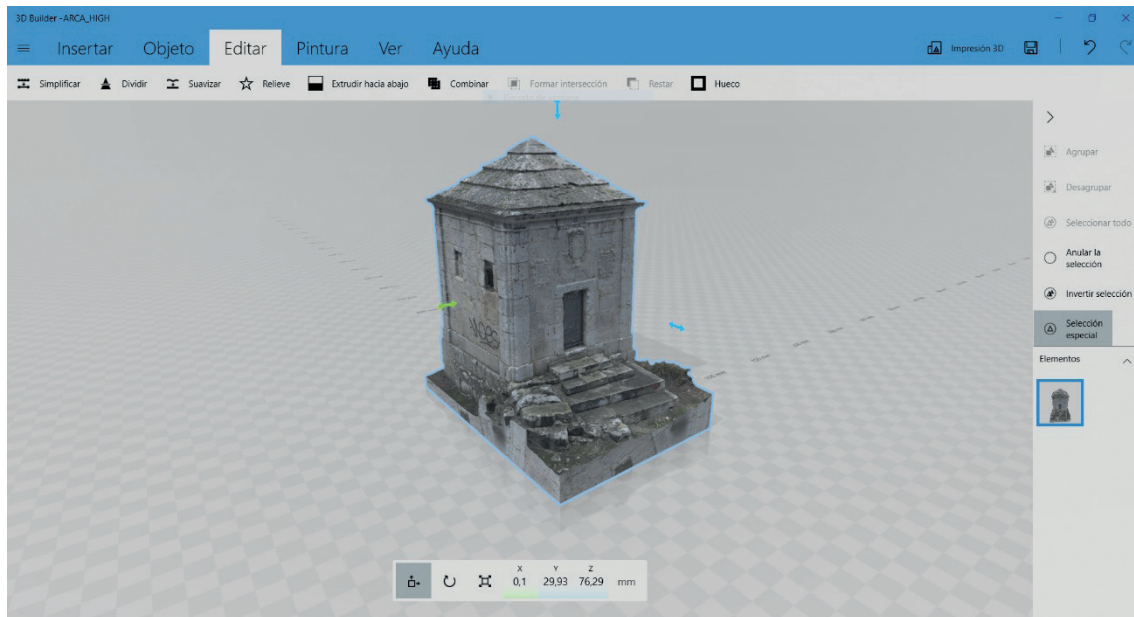


Figura 134. Ventana de trabajo del programa 3DBuilder. Fuente: elaboración propia

El archivo ya cerrado hay que abrirlo en un programa específico para generar el archivo G-code. Este es un archivo con todas las instrucciones de impresión para generar el modelo capa a capa. El programa más utilizado para realizar este paso es el Ultimaker Cura.

Este programa nos va a permitir elegir el tipo de impresora, pero además configurar cualquier parámetro de la impresión (espesor de capa, velocidad de impresión, tipo de relleno, soportes, etc). Una vez configurados todos los parámetros habrá que pulsar sobre el botón segmentar para que se genere nuestro archivo G-code. Este proceso nos indicará una estimación del tiempo de impresión del archivo según los parámetros que hayamos introducido.

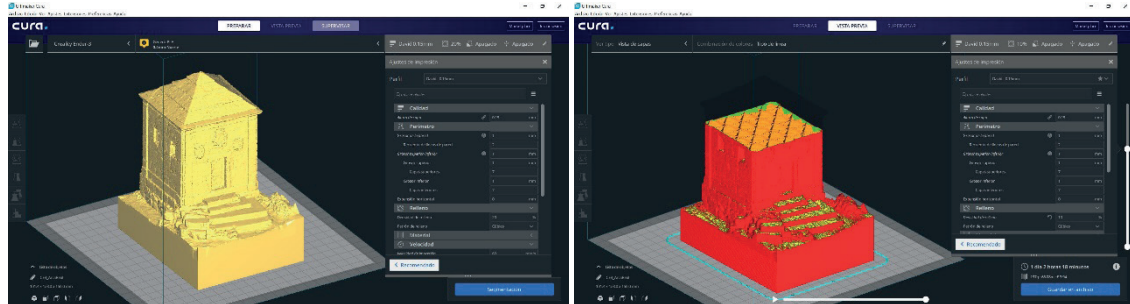


Figura 135. Preparación del archivo G-code en el programa Ultimaker Cura. Fuente: elaboración propia

Posteriormente este archivo G-code solo habrá que abrirlo en la impresora 3d e imprimirlo.

4.3.2. VISORES WEB

Otra de las herramientas más importantes para la difusión de nuestro trabajo son los visores web, los cuales nos van a facilitar compartir y visualizar la navegación por los modelos 3d desde cualquier dispositivo que esté conectado a internet. Existen varias opciones, pero el más conocido y extendido es el programa Sketchfab, que utiliza tecnología WebGL⁵⁰.

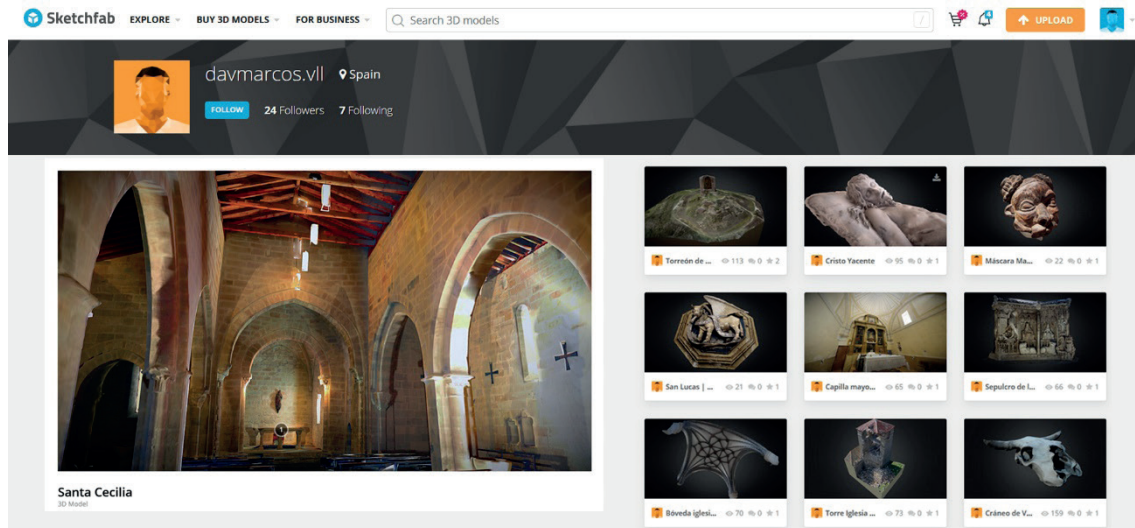


Figura 136. Pantalla de trabajo de Sketchfab. Fuente: <https://sketchfab.com> [Consultado: 10/08/2021]

En este tipo de visualizadores tendremos que añadir nuestro modelo 3d preferiblemente en formato OBJ, el cual irá acompañado del archivo con el mapa de textura y un archivo MTL con la información del ajuste del mapeado.

Existe un inconveniente en todo este tipo de tecnologías y está relacionado con el tamaño de los modelos tridimensionales. En principio se pueden subir mallas con millones de triángulos, pero esto va a ser un problema importante para la correcta visualización ya que la cantidad de información a manejar va a ser muy grande, lo que puede ralentizar su visualización sobre todo si se ejecuta desde dispositivos móviles que tienen menos potencia de procesamiento y desde conexiones de datos móviles.

Para solucionar este problema es recomendable realizar un paso intermedio antes de subir nuestro modelo al visualizador. Este paso consiste en realizar una optimización de nuestro modelo fotogramétrico que facilite su manipulación. Esta optimización va a consistir en reducir el número de polígonos de la malla, pero sin perder el nivel de detalle. Para conseguir esto deberemos realizar una retopología⁵¹ de nuestro modelo generando un modelo *Low poly* con menos polígonos.

50 Según Wikipedia WebGL (*Web Graphics Library*) es una especificación estándar que define una API implementada en JavaScript para la renderización de gráficos en 3D dentro de cualquier navegador web. WebGL está integrada completamente en todos los estándares web del navegador, permitiendo la aceleración hardware (física) de la GPU y el procesamiento de imágenes y efectos como parte del lienzo o “canvas” de la página web.

51 La retopología es un proceso digital en el que construimos una malla de polígonos simplificados de una forma 3D que ya tenemos. Se basa en redibujar cada polígono de un objeto 3D ya existente, pero que tiene una cantidad de polígonos mucho mayor a la que necesitamos. Normalmente este tipo de retopología se basa en modelado de mallas mediante Quads (polígonos de 4 lados)

Este proceso se puede hacer de forma automática o de forma manual creando una malla nueva desde cero. Con este proceso conseguimos reducir el tamaño del modelo, pero también hemos reducido su nivel de detalle.

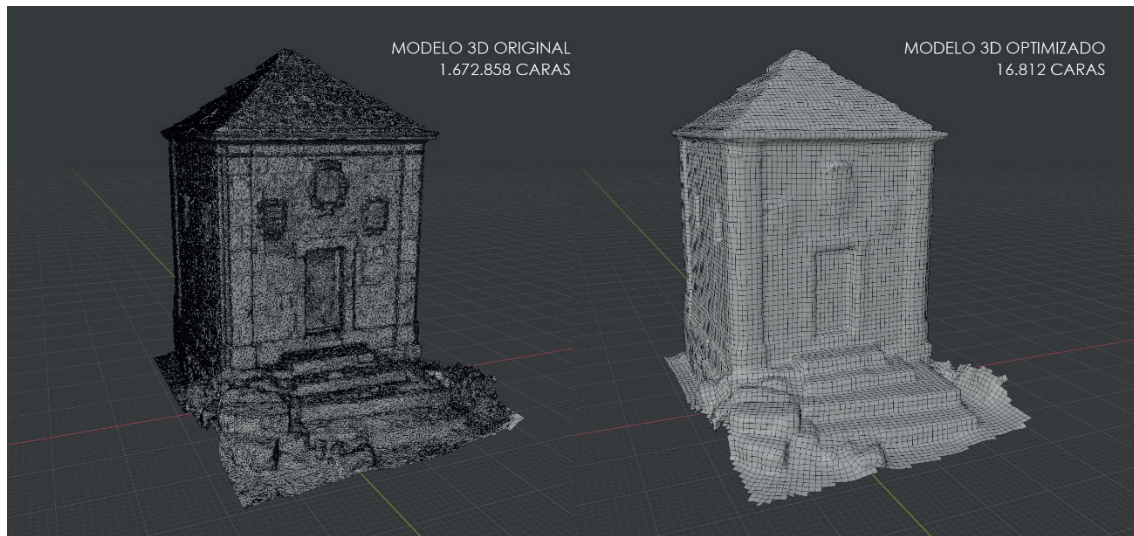


Figura 137. Retopología automática de modelo 3D realizada con Instant Meshes. Fuente: elaboración propia

Para que nuestro modelo *Low poly* tenga el mismo nivel de detalle que el modelo *High poly* inicial, deberemos trabajar con las texturas las cuales van a ser las que den el detalle del acabado final al modelo 3d. Primero para poder texturizar tendremos que generar las UVs de nuestro modelo 3D mediante la representación plana de las superficies de nuestro objeto de forma desplegada.

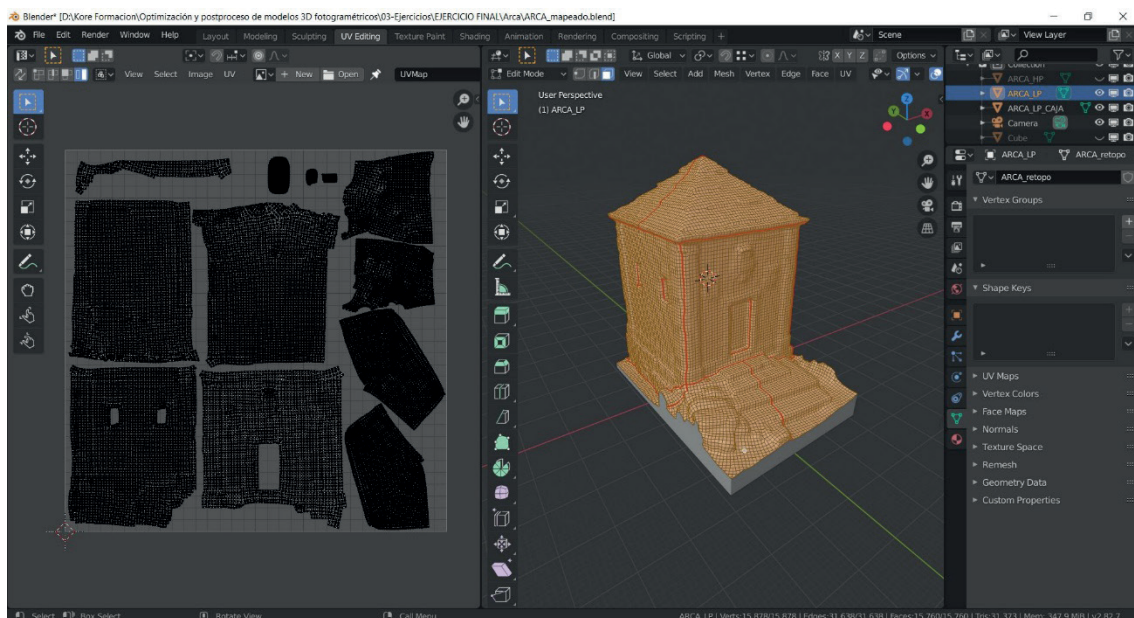


Figura 138. Generación de las UVs del modelo low poly en el programa de Blender. Fuente: elaboración propia

Posteriormente tendremos que realizar un cocinado o *backeado* de las texturas del modelo *High poly* al modelo *Low poly*. Las texturas que tendremos que generar son:

- textura Diffuse. Es la textura básica y más necesaria. Es la que representa el color o valores RGB de la textura
- textura Ambient Occlusion. Es la textura que muestra la información de iluminación y sombras que llegan sobre el objeto.
- textura Normales. Representa el relieve del objeto y realmente es la textura que da el detalle a los modelos *low poly*. El mapa de normales cuenta con 3 colores que representan cada uno de los ejes del espacio 3D: rojo para la X, verde para la Y, azul para la Z. De este modo indica en qué dirección rebota la luz sobre el objeto, dándonos una falsa información de volúmenes.

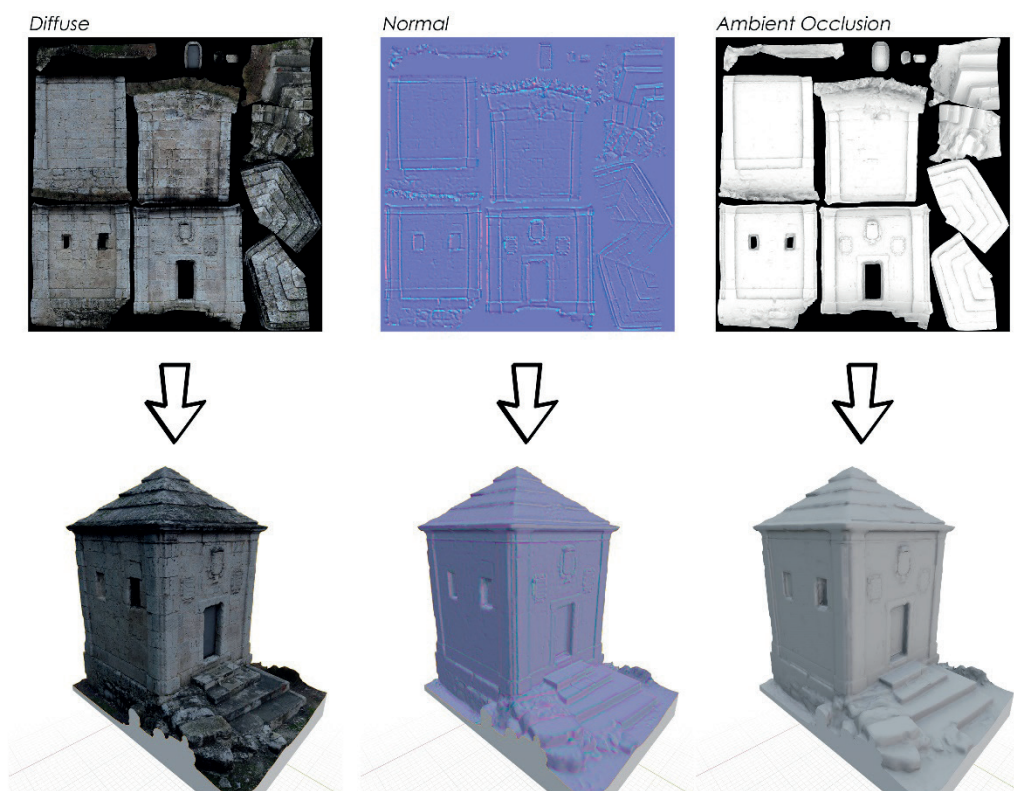


Figura 139. Imagen de las diferentes texturas quedan forma al modelo 3d. Fuente: elaboración propia

El resultado va a ser un modelo con la misma calidad de visualización que el original, pero con una décima parte de polígonos en la definición de su geometría.

Este modelo *low poly* es el que subiremos a la aplicación Sketchfab para su visualización a través de internet

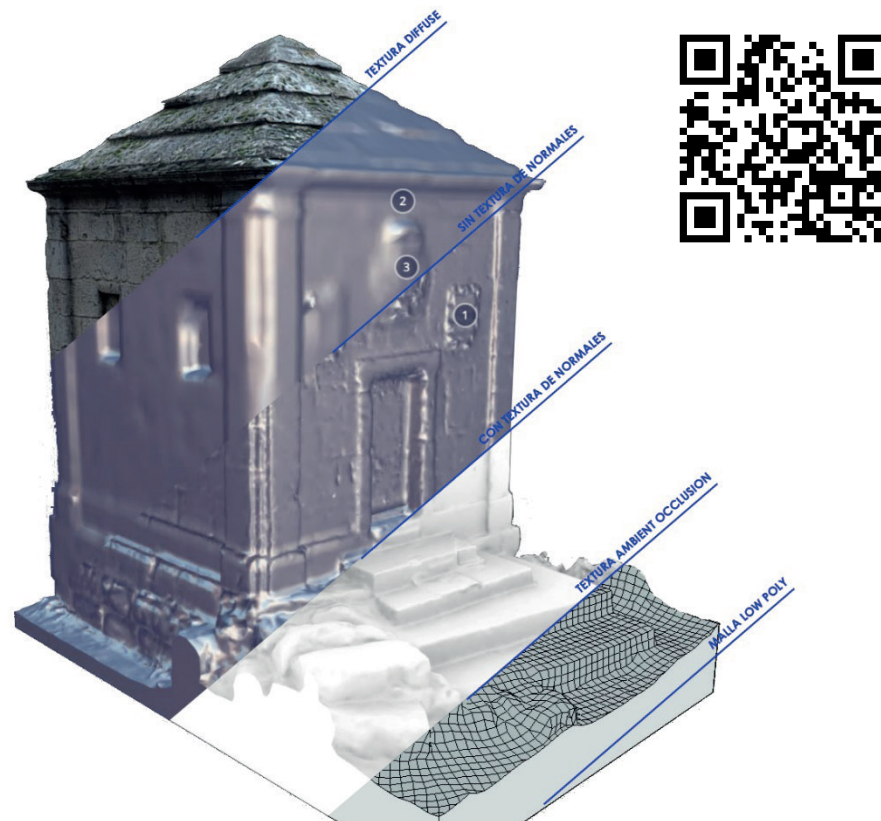


Figura 140. Resultado final de la optimización de un modelo fotogramétrico. Fuente: elaboración propia

4.3.3. REALIDAD VIRTUAL, AUMENTADA Y MIXTA

Realidad Virtual

La realidad virtual también conocida como VR, consiste en sumergirnos en un mundo completamente digital en el que podemos movernos libremente. Estos sistemas de realidad virtual son también conocidos como sistemas 6DOF (*Degrees of Freedom*). Estas siglas hacen referencia a los 6 grados de libertad dentro de ese mundo virtual, es decir, el número de direcciones en la que se puede mover un objeto en el espacio 3D. En los espacios virtuales 6DOF está permitido la rotación en los tres ejes y el desplazamiento en los 3 ejes.

Los espacios virtuales 3DOF solo se permite la rotación en los 3 ejes ya que la traslación está bloqueada. Los sistemas de realidad virtual que utilizan 3DOF son capaces de rastrear la orientación de la cabeza, es decir, saben hacia dónde estamos mirando. Los ejes vienen determinados por los ángulos de navegación y son:

- Guiñada (*yaw*), respecto al eje vertical perpendicular al avión
- Cabeceo (*pitch*), respecto al eje transversal de las alas del avión
- Alabeo (*roll*), respecto al eje longitudinal que une el morro con la cola del avión

Un ejemplo de espacios virtuales 3DOF son las visitas virtuales generadas a partir de fotografías equirectangulares o esféricas. En las visitas virtuales las posiciones están preestablecidas por la visual que ofrece la fotografía esférica, pero podemos rotar la visualización en los tres ejes (*yaw*, *pitch* y *roll*).



Figura 141. Esquema de los dos sistemas de realidad virtual según los grados de libertad. Fuente: <https://emiliusvgs.com> [Consultado: 13/04/2021]

Los dispositivos para la visualización de la realidad virtual suelen ser cascos tipo gafas que tienen que estar conectados a pc potentes para que sean capaces de renderizar estos espacios virtuales. Al ser una experiencia inmersiva es necesario que exista un sistema exterior de cámaras que nos rastrea el movimiento de las manos y la posición en el espacio para crear una zona de seguridad y así evitar que al desplazarnos colisionemos con algún objeto o pared. Uno de los inconvenientes de estos sistemas ha sido la limitación de movimiento por los cables que conectan el casco con el pc.

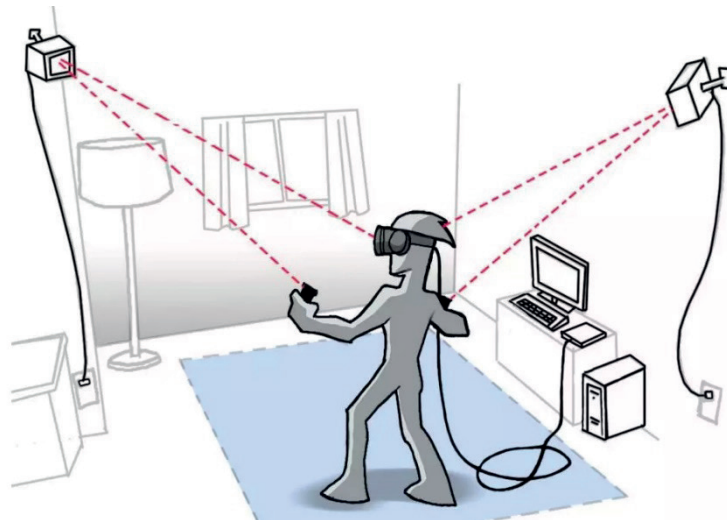


Figura 142. Sistema de seguimiento externo de los dispositivos de realidad virtual. Fuente: <https://itigic.com/virtual-reality-glasses-6-dof> [Consultado: 18/04/2021]

La realidad virtual es una de las herramientas que está teniendo más auge en el último año gracias a la aparición de periféricos de gran calidad y un precio bajo (aproximadamente el coste de un móvil de gama media-alta) lo que ha permitido que pueda acceder a ello un amplio número de usuarios. Uno de los responsables de esta situación ha sido la empresa Facebook con su plataforma Oculus, en la que a finales del año 2020 puso a la venta las gafas Oculus Quest 2. La evolución de estas gafas es la calidad de los visores y su sistema de cámaras incorporadas en el dispositivo que permiten rastrear los movimientos de las manos y la posición en el espacio creando una zona de seguridad (sistema guardián) sin necesidad de dispositivos externos. Otra

ventaja es que gracias al procesador que incorpora en su interior es capaz de reproducir experiencias virtuales de forma independiente. En el caso de experiencias virtuales que exijan una mayor potencia de procesado, las gafas se pueden conectar mediante cable a un pc.



Figura 143. Esquema del sistema guardián y pantalla de interacción en el espacio virtual. Fuente: <https://distritoxr.com> [Consultado: 27/07/2021]

Para crear sistemas de realidad virtual 3DOF utilizaremos las fotografías esféricas realizadas con la cámara, las obtenidas en los escaneos láser o las que podamos generar mediante el renderizado de nuestros modelos digitales desde programas de edición 3d. Para crear estas visitas virtuales es necesario utilizar programas que permitan la conexión entre las fotografías esféricas generando un flujo de movimiento entre ellas. Existen muchas opciones de programas como pano2VR, Matterport, Tourweaver, Kolor Panotour o 3DVista. Los entornos de trabajo de todos estos programas suelen ser muy parecidos. Una vez que tenemos definido el recorrido preestablecido de la visita, dotaremos a cada fotografía esférica de contenido extra que pueda ser consultado mediante la generación de puntos calientes o *hotspots*. El contenido que se puede incorporar puede ser texto, audio, vídeo o enlaces a datos externos.



Figura 144. Entorno de trabajo de programa de creación de visitas virtuales. Fuente: Kolor Panotour [Consultado: 12/05/2018]

Podemos crear contenidos de realidad virtual 6DOF a partir de la documentación que generamos a través de los escáner láser y fotogrametría, ya sean modelos fotogramétricos o modelos tridimensionales que modelemos desde cero a partir de los datos que obtenemos en un levantamiento (Campi et al., 2017; Chias et al., 2019).

Pero esos mundos virtuales no son solo el modelo 3d, sino también intervienen aspectos de la iluminación, el tiempo o el entorno. Para conseguir esto es necesario utilizar programas que nos permitan generar estos mundos. Estos programas son los Game Engine, que son sistemas de renderizado en tiempo real. Algunos de estos programas son GameMaker Studio, CryEngine, Amazon Lumberyard, Unity o Unreal Engine (este último tiene una variante enfocada a la visualización de arquitectura Twinmotion).



Figura 145. Entorno de trabajo del programa Twinmotion. Fuente: elaboración propia

En estos programas también es recomendable utilizar modelos optimizados, ya que como su visualización es en tiempo real, agilizará mucho los cálculos de iluminación sobre los objetos.

Por la experiencia obtenida en estos meses de investigación, el programa Twinmotion es mucho más intuitivo y fácil de manejar, ya que la creación de estos mundos virtuales se basa en un flujo de trabajo más visual. Con Unreal Engine las opciones de edición son infinitas, pero tiene una curva de aprendizaje más compleja ya que el flujo de trabajo no es solo visual, sino que también es necesario realizar labores de programación mediante código para la generación de acciones o rutinas dentro del mundo virtual.

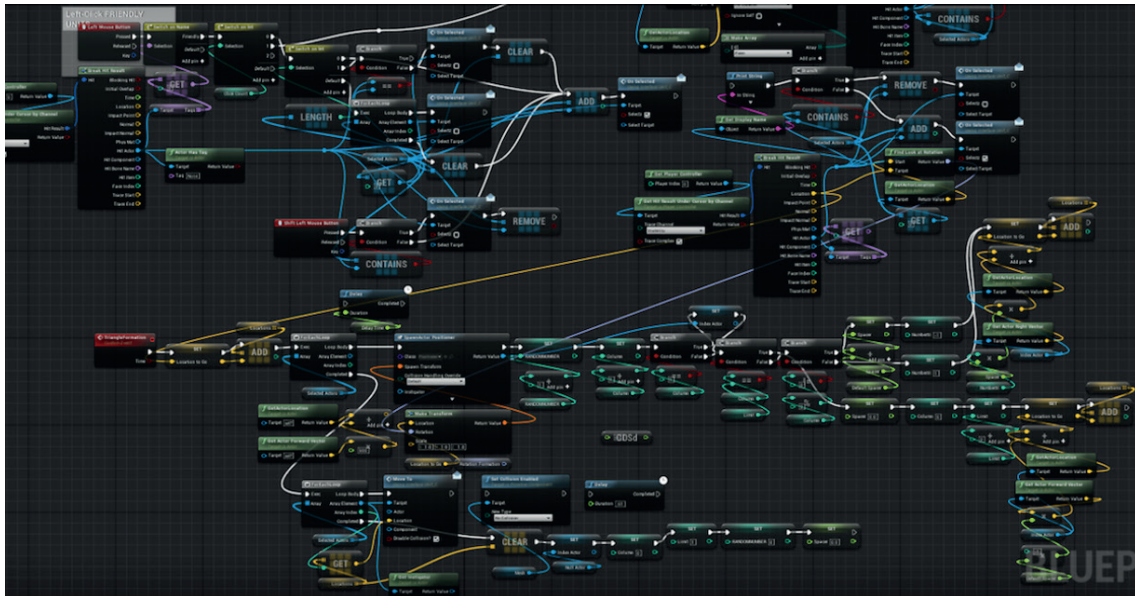


Figura 146. Blueprints es el sistema de scripting visual dentro de Unreal Engine y es la forma de crear acciones o rutinas dentro del mundo virtual. Fuente: Unreal Engine [Consultado: 17/08/2021]

Realidad aumentada

La realidad aumentada o AR es una tecnología que agrega elementos virtuales superponiéndolos al mundo real, por lo que podemos interactuar con ellos sin salir del mundo físico. La forma de interactuar es diferente ya que se realiza a través de dispositivos móviles como tablets o smartphones.

La realidad aumentada requiere de tres cosas para poder mezclar los objetos virtuales en el entorno real:

- Pistas, etiquetas o marcas del entorno. Funcionan como referencia para la creación y adaptación del objeto virtual. Con los nuevos programas estos marcadores no son necesarios, ya que utiliza el entorno como marcador realizando previamente un *trackeo* del espacio a través de la cámara.
- Dispositivo con cámara. Para poder transmitir la imagen del objeto.
- Software especial. Es el que va a interpretar las imágenes transmitidas por la cámara.

En estos momentos existen dos grandes plataformas de desarrollo de realidad aumentada. Por un lado, está la tecnología ARkit de Apple y por otro lado la tecnología ARCore de Google. Ambas tecnologías prometen simplificar y acelerar el proceso de creación.

Para las pruebas se ha utilizado la tecnología ARkit de Apple a través de un dispositivo iPad. La aplicación utilizada es Reality Composer, la cual permite crear escenas de realidad aumentada importando cualquier modelo fotogramétrico para su visualización.

El funcionamiento es sencillo pero el problema es que solo trabaja con archivos de formato USDZ, por lo que será necesario transformar nuestros modelos 3D OBJ en ese nuevo formato. Para ello Apple ha creado la herramienta Reality Converter para convertir cualquier archivo en formato USDZ pero tiene una serie de restricciones que dificultan mucho el poder experimentar. Por un lado, la herramienta existe solo para MAC y por otro lado solo puede utilizarse siendo propietario de una cuenta de desarrollador.

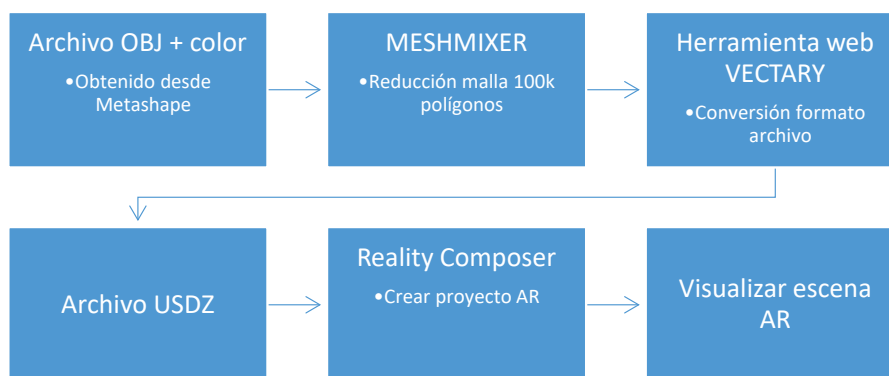


Figura 147. Flujo de trabajo para la creación de una escena. Fuente: elaboración propia

El objetivo era conseguir convertir el archivo OBJ en USDZ y al final se ha podido localizar una alternativa online y gratuita. Es a través de la herramienta web Vectary⁵², pero en realidad se trata de una herramienta online de diseño 2D y 3D que además permite la generación de contenido AR. En principio nuestro objetivo es solo utilizarla para convertir nuestros archivos en formato USDZ. Para poder utilizarla es necesario crear una cuenta gratuita y tiene dos limitaciones: los archivos tienen que tener un tamaño máximo de 100 mb y recomienda que el modelo 3D tenga un máximo de 100.000 polígonos.

El proceso será importar nuestro modelo, ubicarlo, escalarlo y exportar el modelo en formato USDZ. Es un formato de archivo que contiene toda la información del modelo (geometría y textura), es decir, la geometría, las coordenadas de las UVW del mapeado y la textura están dentro de este archivo y nos son archivos independientes como ocurre con los modelos en formato OBJ.

52 <https://www.vectary.com>

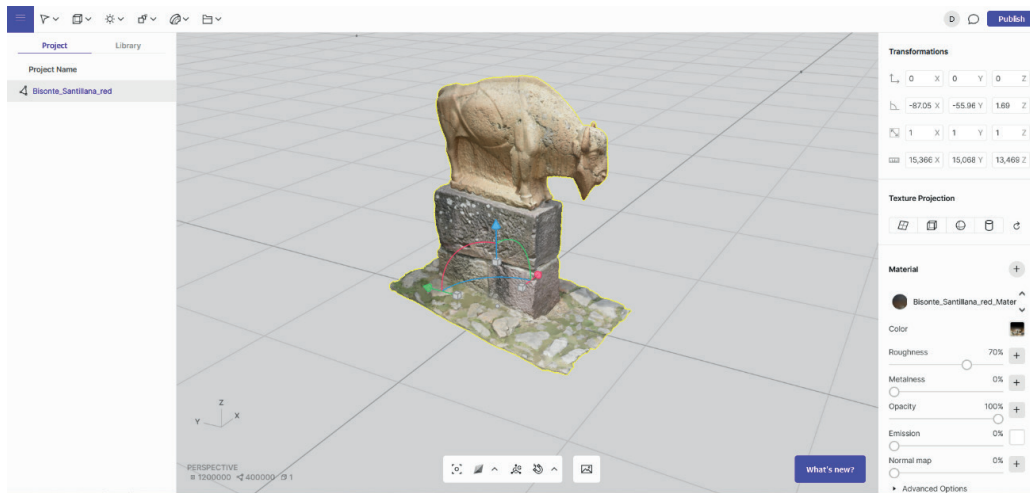


Figura 148. Ventana de trabajo de la herramienta web Vectary. Fuente: <https://www.vectary.com> [Consultado: 13/09/2021]

En Reality Composer creamos un nuevo proyecto en el que el ancla sea tipo horizontal. Esto lo que va a hacer es que nuestro objeto 3d se quede fijo a un plano horizontal. A continuación, importamos el archivo USDF y ajustamos su posición, rotación y escala en la escena. Iniciamos la escena AR.

La visualización de este tipo de realidad aumentada no requiere de targets o marcadores sobre los que proyectar el modelo virtual, sino que la aplicación lo que hace es realizar un trackeo previo del entorno con la cámara del dispositivo, y a partir de esos datos integra el modelo virtual (Campi et al., 2019).



Figura 149. Flujo de trabajo dentro de Reality Composer. Fuente: elaboración propia

Realidad mixta

La realidad mixta o MR, es la combinación entre realidad virtual y realidad aumentada y posibilita espacios de interacción con objetos y personas reales o ficticias. Es decir, la realidad mixta crea objetos virtuales y los modifica a través de la interacción con el entorno real.

Funciona por medio de dispositivos tipo gafa o cascos espaciales equipados con sensores y un visor inteligente que hacen posible la interacción.

CAPÍTULO

4

CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se va a realizar una exposición de los diferentes casos de estudio que se han llevado a cabo en estos años de investigación doctoral. Todos estos casos son situaciones reales en los que se ha aplicado la metodología definida en el apartado anterior para comprobar sus ventajas y desventajas.

Quiero agradecer tanto al Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica, perteneciente al departamento de Urbanismo y Representación de la Arquitectura en la Universidad de Valladolid, como a la empresa Geobit Consulting la posibilidad que me han dado de poder participar en la realización de estos trabajos.

Los casos de estudio seleccionados son:

- Iglesia del Santo Sepulcro en Toro, Zamora
- Escultura de Nuestro Padre Jesús Nazareno, Valladolid
- Capiteles románicos del Museo Arqueológico de Madrid
- Interior de la Catedral de Cádiz
- El convento de los Valles en Torresandino, Burgos
- La Calzada de Béjar, Salamanca
- Artesonado de la cabecera de la Iglesia de Santa María en Fuentes de Nava, Palencia
- Catedrales de Plasencia

CASO 1

DIGITALIZACIÓN 3D PARA INVESTIGACIÓN

IGLESIA DEL SANTO SEPULCRO EN TORO

ZAMORA



La documentación de este edificio forma parte de una línea de investigación iniciada junto a mis directores de tesis y que tiene su origen en dos motivos: por un lado a raíz de la realización en el año 2012 del Proyecto Fin de Máster del MIA (Máster de Investigación en la Arquitectura) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid, en donde se desarrolló una aproximación a una base de metodología de levantamiento aplicada a la Iglesia de la Inmaculada Concepción de Castromonte, en la provincia de Valladolid; y por otro lado la inquietud de conocer el motivo de la forma de construir estos edificios.

1. Antecedentes

En el s. XII y s. XIII en las arquitecturas románicas los interiores de las iglesias eran espacios pesados y poco luminosos en el que las pilastras que separaban las naves del templo eran bastante potentes para poder recoger los empujes de las cargas de los arcos formeros. Estos arcos se disponen de forma paralela al eje longitudinal de la iglesia separando la nave central de las naves laterales.

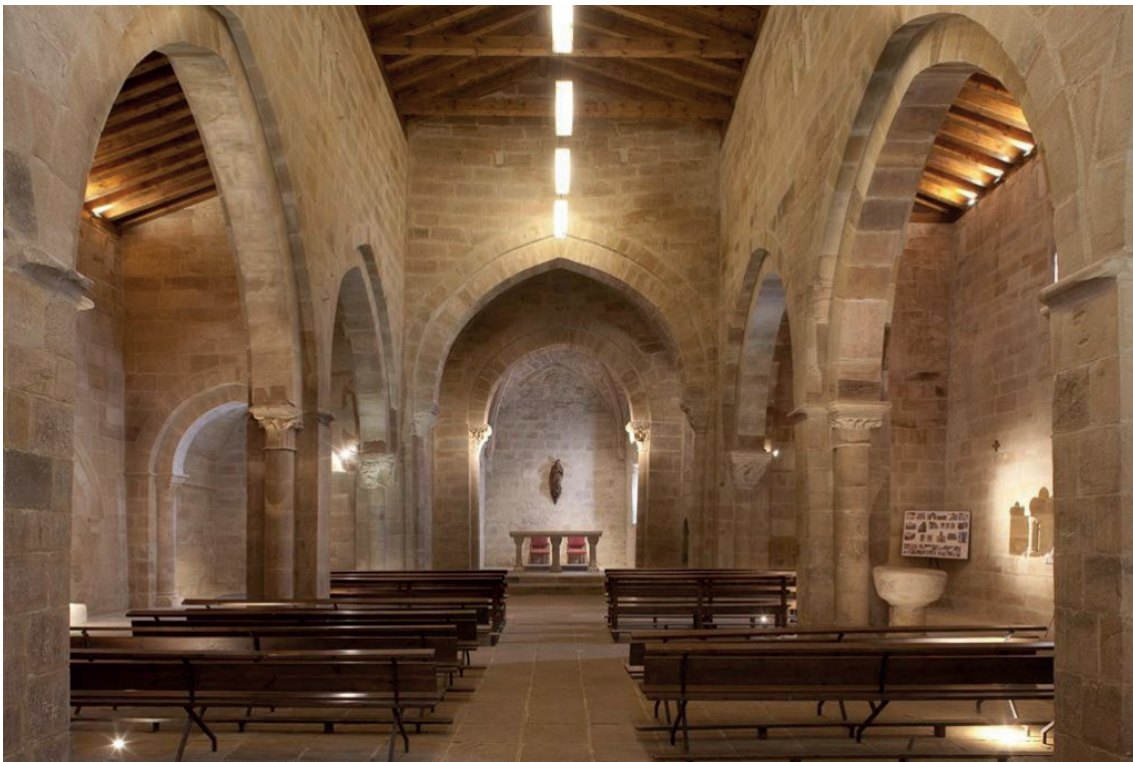


Figura 150. Interior de la ermita de Santa Cecilia en Aguilar de Campoo. Construida entre los s. XII y XIII es un claro ejemplo del románico en la zona norte de Palencia. Fuente: <https://www.santamarialareal.org> [Consultado: 19/09/2018]

Los arcos formeros normalmente son de medio punto o apuntados en los que el centro está a la misma cota que la línea de imposta (nivel de arranque de los arcos), pero estos arcos de grandes luces son de tipo escarzano. Los arcos escarzanos, también denominados arcos corvados, son

arcos rebajados simétricos con un segmento de circunferencia que poseen su centro por debajo de la línea de imposta. Si ese centro está más arriba o más abajo, el resultado serán arcos escarzanos más o menos pronunciados.

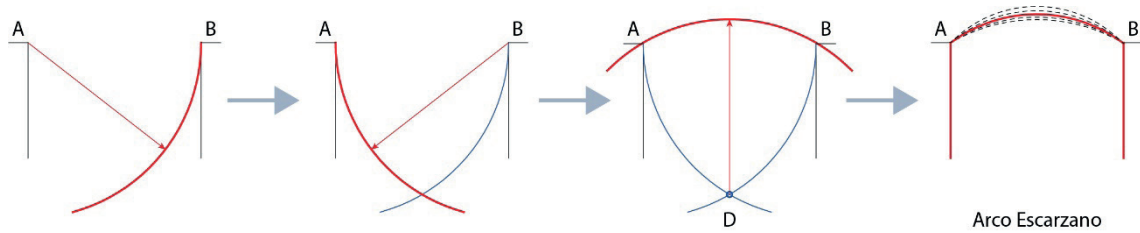


Figura 151. Desarrollo geométrico para la construcción de un arco escarzano. Fuente: elaboración propia

Habitualmente los arcos formeros cubren una luz pequeña, lo que hace necesario colocar pilastras cada cierta distancia. Normalmente las naves se suelen dividir longitudinalmente en 3 o 4 crujías. En este caso estos arcos cubren luces de hasta 20 metros, lo que hace que el interior de estos templos sea muy diáfanos y luminosos. La desventaja es que los empujes de estos arcos son muy grandes lo que obliga a ubicar torres y ábsides con muros muy anchos, y en algunos casos en la torre es necesario macizar el cuerpo inferior, para contrarrestar el empuje de los grandes arcos.

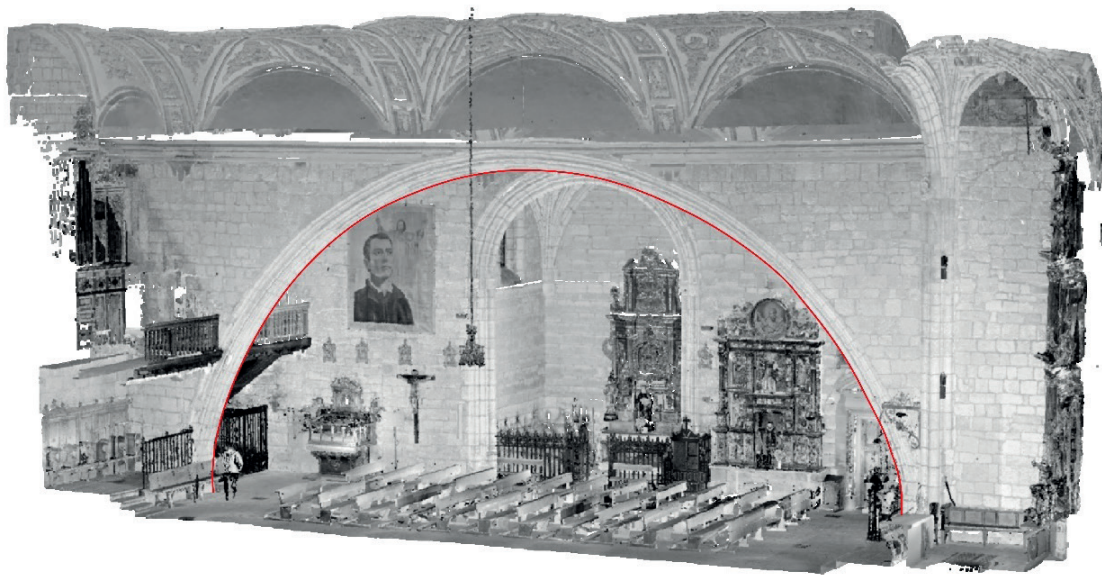


Figura 152. Nube de puntos del interior de la iglesia de Santa María en Torrelabán. Fuente: elaboración propia

El primer contacto con un edificio con esta característica constructiva fue la Iglesia estudiada en el Proyecto Fin de Máster, pero a partir de ahí continuamos buscando información e investigando para ver si existían más edificios similares en la provincia o provincias limítrofes. La búsqueda dio resultados positivos hasta el punto de llegar a localizar un total de 64 edificios repartidos de la siguiente forma: 16 edificios en la provincia de Ávila, 12 edificios en la provincia de Salamanca, 16 edificios en la provincia de Segovia, 10 edificios en la provincia de Valladolid y 10 edificios en la provincia de Zamora.

DENOMINACIÓN PRINCIPAL	PROVINCIA	LOCALIDAD	COMARCA	BIC	FECHA DECLARACION	LATITUD	LONGITUD
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Ávila	Adanero	La Moraña	SI	30/10/1995	40,94414	-4,60386
Iglesia de San Miguel Arcangel	Ávila	Albornos	La Moraña	NO		40,83546	-4,88606
Iglesia de San Miguel	Ávila	Arévalo	Tierra de Arévalo	NO		41,06628	-4,72212
Iglesia de San Martín	Ávila	Blasconuño de Matascabras	La Moraña	NO		41,12384	-4,98996
Iglesia parroquial de Nuestra Señora de la Asunción	Ávila	El Barraco	La Moraña	NO		40,47595	-4,64091
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Ávila	Fuentes de Año	La Moraña	NO		41,01746	-4,89812
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Ávila	Gutierre Muñoz	La Moraña	NO		40,98267	-4,63628
Iglesia de San Julián y Santa Basilisa	Ávila	Horcajo de las Torres	La Moraña	NO		41,06494	-5,09033
Iglesia parroquial de Nuestra Señora de la Asunción	Ávila	La Horcajada	La Moraña	NO		40,43527	-5,46618
Iglesia parroquial Santa María del Castillo	Ávila	Narros del Castillo	La Moraña	NO		40,85895	-5,05945
Iglesia de San Pedro	Ávila	Nava de Arévalo	La Moraña	NO		40,97853	-4,77621
Iglesia de San Juan Bautista	Ávila	San Juan de la Encinilla	La Moraña	SI	18/06/1982	40,83155	-4,84435
Iglesia San Pelayo Martir	Ávila	Sinlabajos	La Moraña	NO		41,07725	-4,83174
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Ávila	Vega de Santa María	Valle de Amblés y Sierra de Ávila	NO		40,83622	-4,63409
Iglesia parroquial de San Miguel Arcángel	Ávila	Villatoro	Valle de Amblés y Sierra de Ávila	NO		40,55533	-5,11065
Iglesia San Juan de la Cruz	Salamanca	Alba de Tormes	Tierra de Alba	SI	24/06/1993	40,82646	-5,51398
Iglesia Santiago Apóstol	Salamanca	Alba de Tormes	Tierra de Alba	SI	24/10/1996	40,82683	-5,51163
Iglesia parroquial de la Asunción	Salamanca	Aldeaseca de la Frontera	Tierra de Peñaranda	NO		40,94197	-5,20754
Iglesia parroquial San Pedro Apóstol	Salamanca	Cantalpino	Tierra de Peñaranda	SI	24/06/1993	41,05295	-5,32802
Iglesia de Nuestra Señora del Castillo	Salamanca	Macotera	Tierra de Peñaranda	SI	24/07/1982	40,83090	-5,28546
Iglesia de la Advocación a San Miguel	Salamanca	Nava de Sotrobal	Tierra de Peñaranda	NO		40,89113	-5,28437

Iglesia de San Pedro Apóstol	Salamanca	El Pedroso de la Armuña	Tierra de Peñaranda	NO		41,08149	-5,39691
Iglesia de San Martín	Salamanca	Villaflores	Tierra de Peñaranda	NO		41,08449	-5,23286
Iglesia parroquial de San Pedro y San Felipe	Salamanca	Villar de Gallimazo	Tierra de Peñaranda	NO		40,95359	-5,28871
Iglesia parroquial de San Pedro	Salamanca	Villoria	Tierra de Peñaranda	SI	07/07/1993	40,99532	-5,37456
Iglesia parroquial de San Pedro Apóstol	Salamanca	Villoruela	Tierra de Peñaranda	NO		41,00767	-5,39452
Iglesia parroquial de San Miguel Arcángel	Salamanca	Zorita de la Frontera	Tierra de Peñaranda	NO		41,01452	-5,19644
Iglesia de la Natividad de Nuestra Señora	Segovia	Adrados	Tierra de Pinares	NO		41,36855	-4,11543
Iglesia de San Miguel	Segovia	Arcones	Sepúlveda	NO		41,11851	-3,72445
Iglesia de San Bartolomé	Segovia	Armuña	Segovia	NO		41,07775	-4,31903
Iglesia de San Miguel	Segovia	Ayllón	Riaza	NO		41,41978	-3,37617
Iglesia parroquial de San Bartolomé	Segovia	Basardilla	Segovia	SI	12/05/1994	41,02693	-4,02667
Iglesia de San Andrés	Segovia	Chatún	Tierra de Pinares	NO		41,29191	-4,34740
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Segovia	Cozuelos de Fuentidueña	Villa de Fuentidueña	NO		41,39130	-4,09806
Iglesia de Invencción de la Cruz	Segovia	Cuevas de Provanco	Sepúlveda	NO		41,54178	-3,96110
Iglesia de Nuestra Señora del Ejido	Segovia	Fuentemizarra	Riaza	NO		41,45790	-3,55842
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Segovia	Hoyuelos	Segovia	NO		41,00553	-4,46839
Iglesia de Santa María Cerca	Segovia	Madrona	Segovia	NO		40,89792	-4,17119
Iglesia de la Magdalena	Segovia	Moraleja de Cuellar	Tierra de Pinares	NO		41,41342	-4,19532
Iglesia de San Juan Bautista	Segovia	Orejana	Sepúlveda	SI	02/03/2000	41,15787	-3,76335
Iglesia de San Martín	Segovia	Sacramenia	Tierra de Pinares	NO		41,49419	-3,96088
Iglesia de San Justo	Segovia	Sepúlveda	Sepúlveda	SI	03/06/1931	41,29849	-3,74973
Iglesia de San Juan Bautista	Segovia	Torrecilla del Pinar	Tierra de Pinares	NO		41,37460	-4,03837
Iglesia de El Salvador	Valladolid	Adalia	Montes Torozos	NO		41,64890	-5,12109
Iglesia San Juan Bautista	Valladolid	Cabreros del Monte	Montes Torozos	NO		41,84758	-5,26827

Iglesia de la Inmaculada Concepción	Valladolid	Castromonte	Montes Torozos	NO		41,77340	-5,04056
Iglesia parroquial de San Juan Degollado	Valladolid	Cervilego de la Cruz	Tierras de Medina	NO		41,18661	-4,94955
Iglesia San Martín	Valladolid	Curiel de Duero	Campo de Peñafiel	NO		41,64270	-4,09853
Iglesia de Santa María	Valladolid	Curiel de Duero	Campo de Peñafiel	NO		41,63987	-4,09930
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción	Valladolid	Lomoviejo	Tierra de Pinares	NO		41,14920	-4,91777
Iglesia de Nuestra Señora de la Asunción (del Castillo)	Valladolid	Muriel de Zapardiel	Tierra de Pinares	SI	13/11/1983	41,12180	-4,84216
Iglesia de San Juan Bautista	Valladolid	Rodilana	Tierras de Medina	SI	13/10/2013	41,37134	-4,87754
Iglesia de Santa María	Valladolid	Torrelobatón	Tordesillas	NO		41,64946	-5,02520
Iglesia parroquial de San Juan Bautista	Zamora	Casaseca de las Chanas	Tierra del Vino	SI	04/06/1982	41,43755	-5,67516
Iglesia de San Nicolás	Zamora	Castroverde de Campos	Tierra de Campos	NO		41,97011	-5,31513
Iglesia de la Virgen de la Asunción	Zamora	Morales del Vino	Tierra del Vino	NO		41,44632	-5,73070
Iglesia de San Salvador de los Caballeros	Zamora	Toro	Alfoz de Toro	SI	26/07/2012	41,52157	-5,39702
Iglesia de Santa María de Arbás	Zamora	Toro	Alfoz de Toro	NO		41,52308	-5,39956
Iglesia del Santo Sepulcro	Zamora	Toro	Alfoz de Toro	SI	08/04/2009	41,52149	-5,39399
Iglesia de Santa María la Antigua	Zamora	Villalpando	Tierra de Campos	SI	23/10/2008	41,86479	-5,41491
Iglesia de Santa María del Castillo	Zamora	Villamayor de Campos	Tierra de Campos	NO		41,89665	-5,36104
Iglesia de San Leonardo	Zamora	Zamora	Tierra del Pan	SI	16/07/1998	41,50212	-5,74469
Iglesia San Juan Bautista	Zamora	Zamora	Tierra del Pan	SI	27/06/1961	41,50330	-5,74704

Tabla 16. Listado de edificios localizados en la investigación. Fuente: elaboración propia

Es un resultado interesante, pues ubicando todos los bienes sobre un mapa se puede observar que todos se localizan en la zona sur de la comunidad de Castilla y León (Zamora, Valladolid, Salamanca, Ávila y Segovia), produciéndose una mayor concentración en la zona oeste de la provincia de Salamanca en la comarca de Tierras de Peñaranda y en la zona norte de la provincia de Ávila en la comarca de la Moraña. Mientras que en la zona norte (León, Palencia, Burgos y Soria) no se ha localizado ninguno.

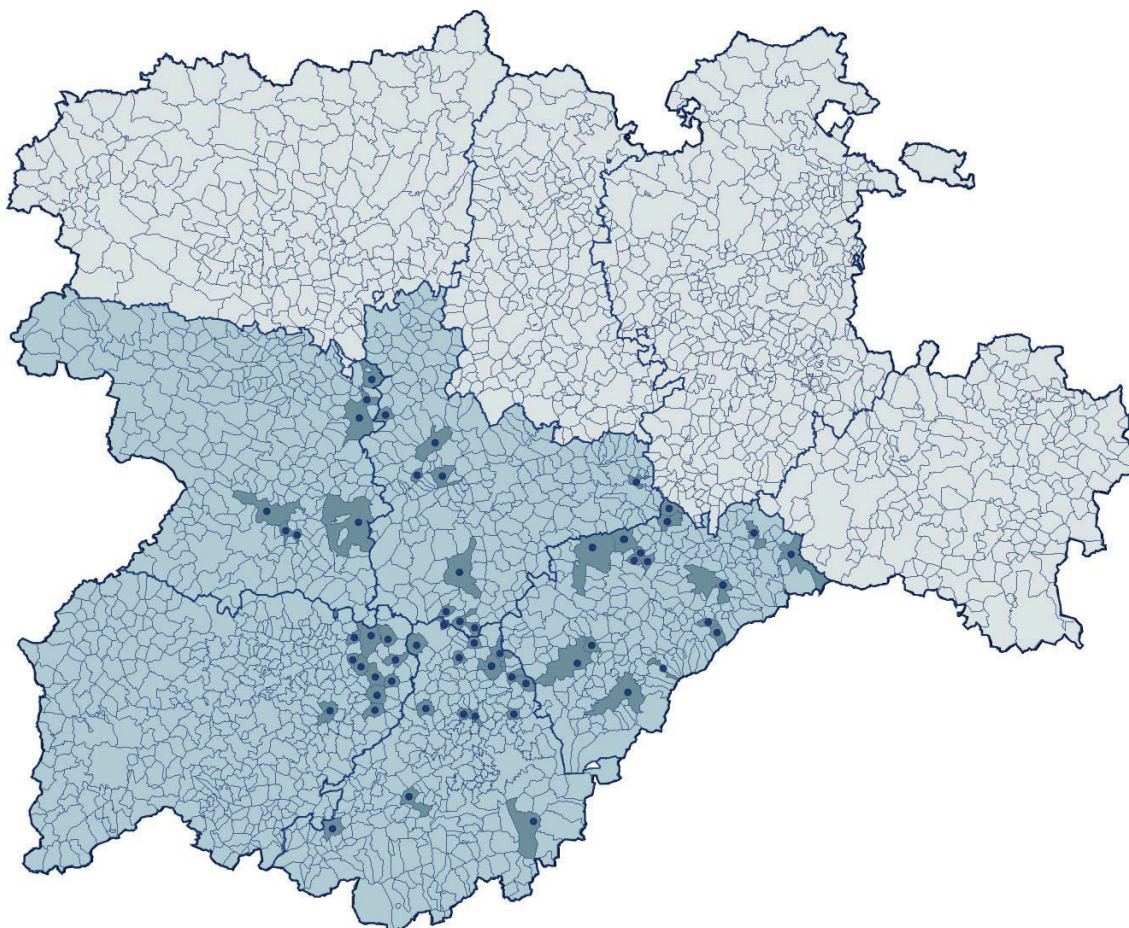


Figura 153. Mapa de Castilla y León con las ubicaciones de los edificios localizados. Fuente: elaboración propia

De todos los bienes localizados el caso de estudio se centra en la iglesia del Santo Sepulcro de Toro (Zamora), declarada como Bien de Interés Cultural el 8 de abril de 2009. La elección de esta iglesia de entre todo el listado viene motivada porque en el interior en la zona de uno de los arcos formeros se pueden apreciar trazas de los antiguos arcos que separaban la nave central de la nave lateral. Esto apoyaría una de las hipótesis planteadas para la construcción de este tipo de arcos. La hipótesis está planteada en dos contextos:

- La primera situación es cuando existen la nave central y la lateral separadas por columnas y arcos, en esta se plantea la rotura del muro eliminando las columnas y creando un gran arco formero para crear amplitud y ganar visión. En este caso se apearía todo el muro, se ejecutaría el arco formero y posteriormente se iría eliminando el sobrante poco a poco hasta dejar despejado todo el espacio del intradós del arco.
- La segunda situación es cuando la iglesia se amplía con una nueva nave, en este caso se realiza la traza del arco empotrándolo en el muro usándolo como cimbra, y una vez ejecutado por ambas caras se elimina el muro existente en el intradós del arco.

La toma de datos y procesado fue realizada en el último cuatrimestre del año 2015.

El convento del Santo Sepulcro, fue el principal y gran Priorato de la orden de Caballeros del Santo Sepulcro, para los reinos de Castilla, León, Navarra y Portugal, hasta que a finales del s. XV se incorporó a la Orden de San Juan de Jerusalén Caballeros de Malta. En la actualidad, del Monasterio, solo se conserva la iglesia.

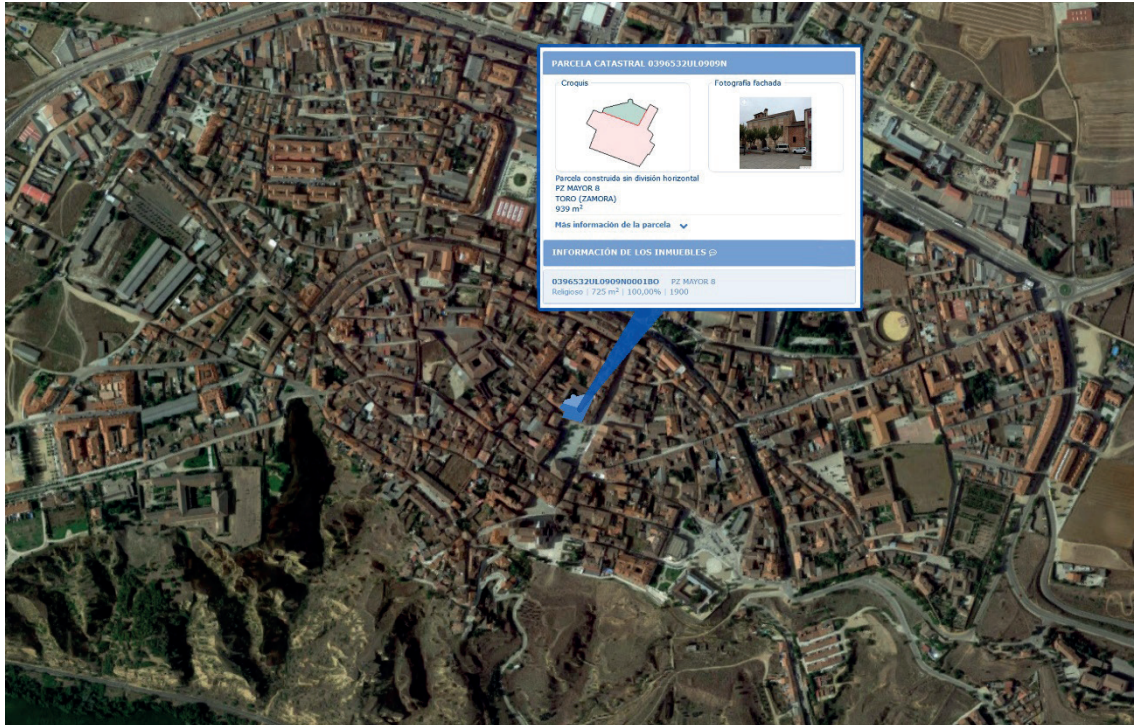


Figura 154. Ubicación de la iglesia dentro del núcleo urbano. Fuente: Google Maps y sede catastro

La iglesia del Santo Sepulcro se encuentra ubicada en el lado norte de la Plaza Mayor de Toro. El inicio de la construcción del edificio data del s. XII. Se trata de una arquitectura románico-mudéjar, de planta rectangular formada por tres naves rematadas con capillas semicirculares absidiales. A los pies de la nave central nos encontramos con un coro alto y con la torre. De la iglesia primitiva se conserva la torre desmochada, las fachadas occidental y septentrional, la cabecera con los tres ábsides y uno de los arcos formeros (el que separa la nave central de la nave del evangelio). Todo lo demás fue reformado entre los s. XVI y XVII. El interior de las naves se encuentra cubiertas por una estructura de madera de par y nudillo. El techo del coro bajo esta realizado con un alfarje de casetones de madera.



Figura 155. Fotografías del interior y exterior de la iglesia del Santo Sepulcro. Fuente: elaboración propia

2. Planificación previa del trabajo

Antes de acudir al edificio se realizó una planificación del trabajo a partir de una planta e imágenes localizadas a través de internet.

El objetivo del levantamiento tridimensional era conseguir toda la documentación posible del interior de la iglesia para poder analizar las dimensiones y forma de los arcos formeros. Para ello se planteó realizar una toma de datos con el escáner láser del interior del edificio que proporcionara un modelo métrico. El posicionamiento de los escaneos se distribuyó entre las tres naves de la iglesia.

Además, se realizó una colección de fotografías de todo el interior para tener también los datos radiométricos mediante la generación de un modelo fotogramétrico. De igual manera se realizó una colección de fotografías del exterior para tener documentada la fachada que da a la Plaza Mayor.

A continuación, se muestra una tabla con el equipo y programas utilizados en el trabajo:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner láser Faro Focus 3D S 120
	Rótula nodal ninja (panorámica esférica)
	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
Programas	Faro Scene
	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom
	PTGui
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 17. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

3. Toma de datos

A finales del mes de septiembre de 2015 se realizó la vista a la iglesia del Santo Sepulcro para efectuar la toma de datos. Lo primero fue realizar un recorrido por todo el edificio para observar los espacios y hacer un replanteo *in situ* de la forma de ejecutar la toma de datos. Esta estaba dividida en dos fases, una primera en la que se realizaron los escaneos del interior del templo. Y una segunda en la que se realizaron las colecciones de fotografías para la generación de un modelo fotogramétrico y de detalles del edificio.

Dadas las características geométricas del edificio no fue necesario colocar referencias artificiales (dianas) para utilizar en el alineamiento de los escaneos. Se optó por la utilización de referencias naturales de la propia geometría del templo.

La configuración de los escaneos se realizó marcando los siguientes parámetros para el interior:

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Indoor ...10 m
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	3x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:04:35
Tamaño de escaneo	10246 x 4268
Resolución mm/10 m	6.136
Millones de puntos escaneo	44,6
Color escaneado	Si

Tabla 18. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia

Gracias a la espacialidad del interior generada por este tipo de arcos formeros en los que no existen columnas, fue posible reducir bastante el número de posicionamientos del escáner. Para el interior se realizaron ocho escaneos repartidos uno en cada una de las cabeceras, dos en la nave central, dos en la nave de la epístola y uno en la nave del evangelio. Cada escaneo tenía una densidad de aproximadamente 45 millones de puntos, por lo que la nube de puntos de todo el interior tenía aproximadamente 368 millones de puntos.

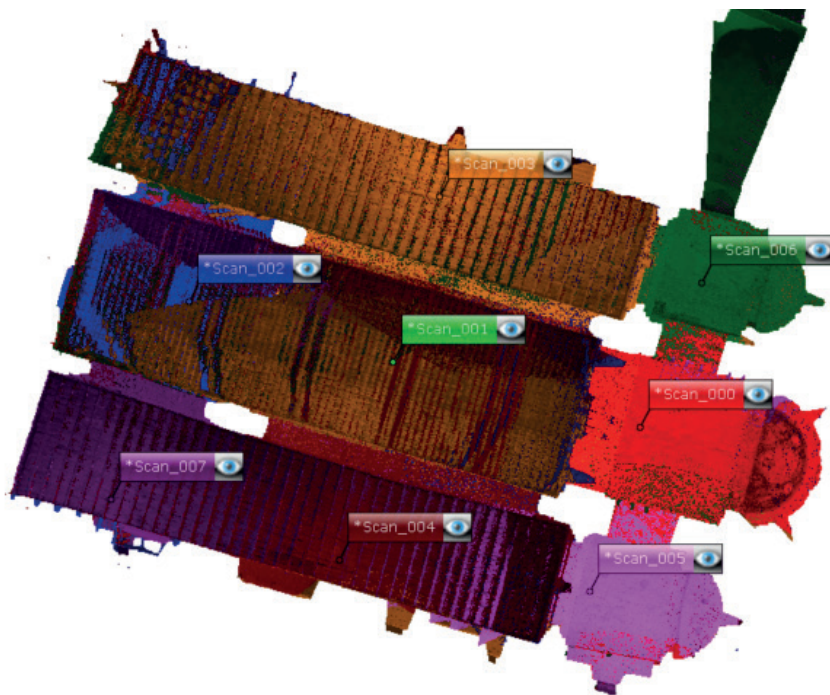


Figura 156. Posiciones de los escaneos en el interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia

El siguiente paso fue la captura de las colecciones de fotografías, para ello se utilizó una focal de 14mm para conseguir unas imágenes con un gran ángulo de visión. En el interior fue necesario

utilizar trípode para evitar que las fotografías salieran movidas, ya que había poca luz. La cámara se configuró con un ISO 100 para no tener ruido en las imágenes, una apertura de 3.0 y una velocidad de 2". En el interior se realizaron un total de 221 fotografías.

Para el exterior como había bastante luz, a pesar de ser un día nublado, no fue necesario utilizar el trípode. La cámara se configuró con una ISO de 100, una apertura de 3.0 y una velocidad de 1/100. En el exterior se realizaron un total de 64 fotografías para documentar solo una fachada y media y una cara de la torre, ya que el resto del edificio se encuentra rodeado por edificaciones residenciales.

4. Procesado de los datos

El procesado de los datos se dividió en dos etapas. La primera es el registro de los datos de escaneo en el software Faro Scene y la segunda corresponde a la generación de la fotogrametría mediante el software Agisoft Metashape.

En el software Faro Scene se creó un proyecto en el que se importaron los ocho escaneos realizados. Antes de realizar el registro se aplicaron los filtros *Stray* para eliminar los puntos extraviados, el filtro de distancia para eliminar todos los puntos capturados a más de 35 metros desde el escáner y el filtro de puntos oscuros para eliminar los puntos con demasiado ruido. A mayores se realizó el coloreado automático de los escaneos a partir de las fotografías capturadas por el escáner láser durante el proceso de la toma de datos.

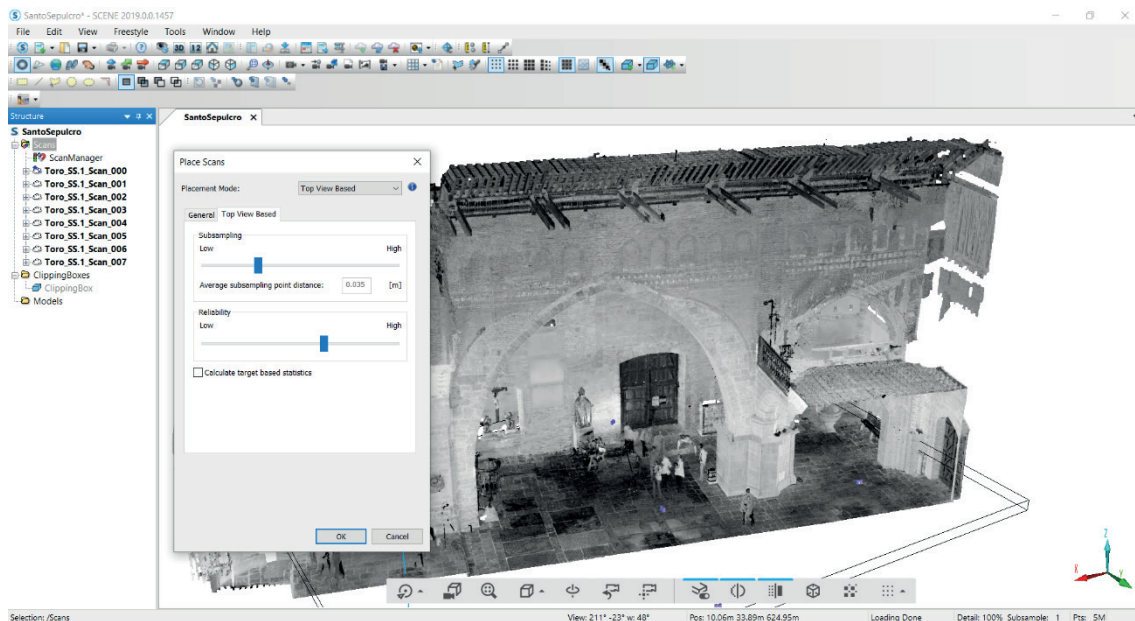


Figura 157. Parámetros de configuración para el registro basado en planta. Fuente: elaboración propia

Una vez realizado este proceso se procedió al alineamiento de las nubes de puntos mediante el cálculo automático de referencias entre ellos. El primer registro realizado fue el basado en vista superior, en el que se hace una colocación rápida de los escaneos. Para esto es necesario haber activado en la toma de datos el sensor del inclinómetro. Los parámetros utilizados fueron una distancia de 0.035 m para el submuestreo de puntos y un valor de un 60 para la fiabilidad.

La alineación fue favorable a falta de realizar un ajuste fino. El siguiente paso fue aplicar un registro basado en *Cloud to Cloud* en el que se utilizaron todos los puntos para ajustar el alineamiento. Los parámetros utilizados fueron una distancia de submuestreo de 0.025, un máximo de 30 interacciones y una distancia máxima de búsqueda de 10 metros.

Los resultados obtenidos en el registro fueron muy positivos ya que el error medio de distancia del punto de escaneo no superó los 2 mm en ninguno de los escaneos.

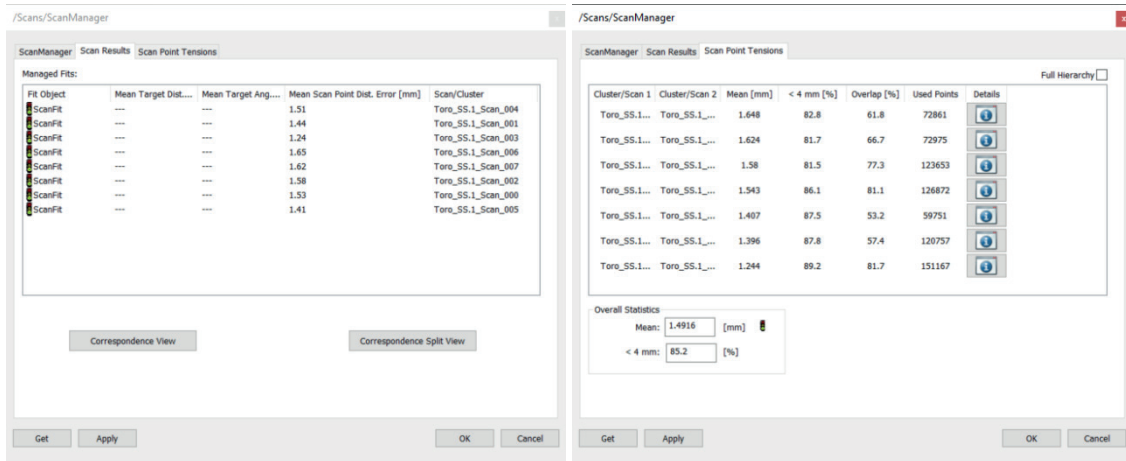


Figura 158. Resultados de la alineación de los escaneos y tensiones de los puntos de escaneo. Fuente: elaboración propia

Con todos los escaneos alineados, el siguiente paso fue la elaboración de una sola nube de todo el conjunto también conocida como nube de proyecto. Para generar esta nube hay que homogeneizar la cantidad de puntos, ya que en las zonas próximas al escáner la densidad es muy alta y según te vas alejando la densidad va siendo menor. Se estableció una separación entre puntos de 5 mm. Los escaneos por separado y la nube del conjunto se exportaron en formato E57 para en caso de ser necesario poder utilizarlos en programas externos.

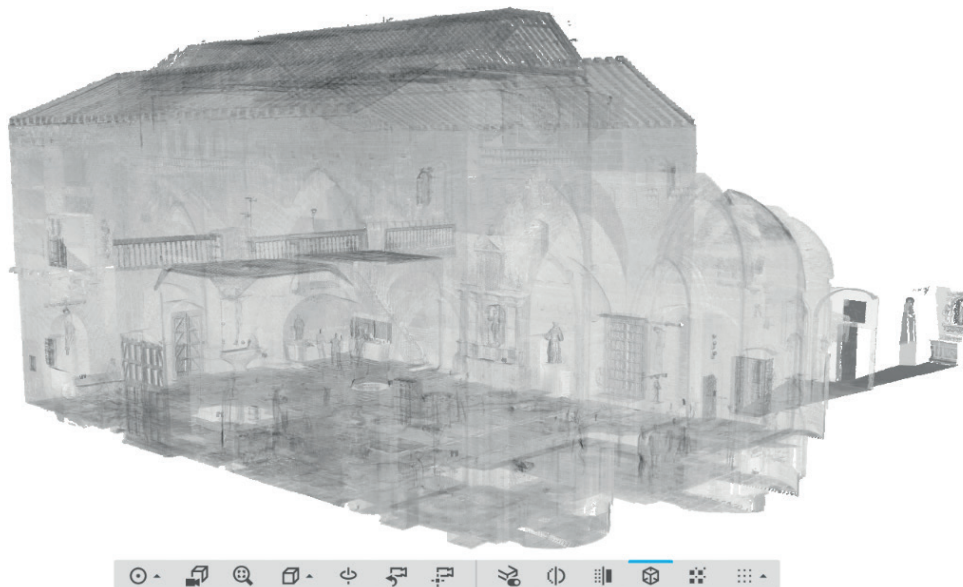


Figura 159. Nube de puntos completa del proyecto. Fuente: elaboración propia

En la siguiente etapa desde el programa Agisoft Metashape se realizó un modelo fotogramétrico utilizando la colección de fotografías. Todos estos archivos se cargaron dentro de un bloque y se alinearon para obtener su posición y orientación, además de crear los puntos de paso de la nube dispersa. Se introdujeron marcadores para poder poner a escala el modelo. La posición de esos marcadores se extrajo de la nube de puntos de Faro Scene. El siguiente paso fue el filtrado gradual de puntos para eliminar los que daban un error mayor y a partir de ahí realizar el procesado para obtener la nube densa. A continuación, se realizó el mallado de triángulos y el texturizado.

Con el modelo 3d realizado, ya se pudo proceder a la exportación de la malla de triángulos con color y la nube de puntos densa para poder utilizarlas en programas externos y obtener la documentación necesaria.

5. Resultados

Con los modelos 3d obtenidos tanto con el escáner láser como con la fotogrametría se realizó la extracción de documentación

Por un lado, se generaron planimetrías mediante la generación de ortofotos de las nubes de puntos de la planta, alzados y secciones.



Figura 160. Ortoalzado de la fachada Sur. Fuente: elaboración propia



Figura 161. Ortoalzado de la fachada Oeste

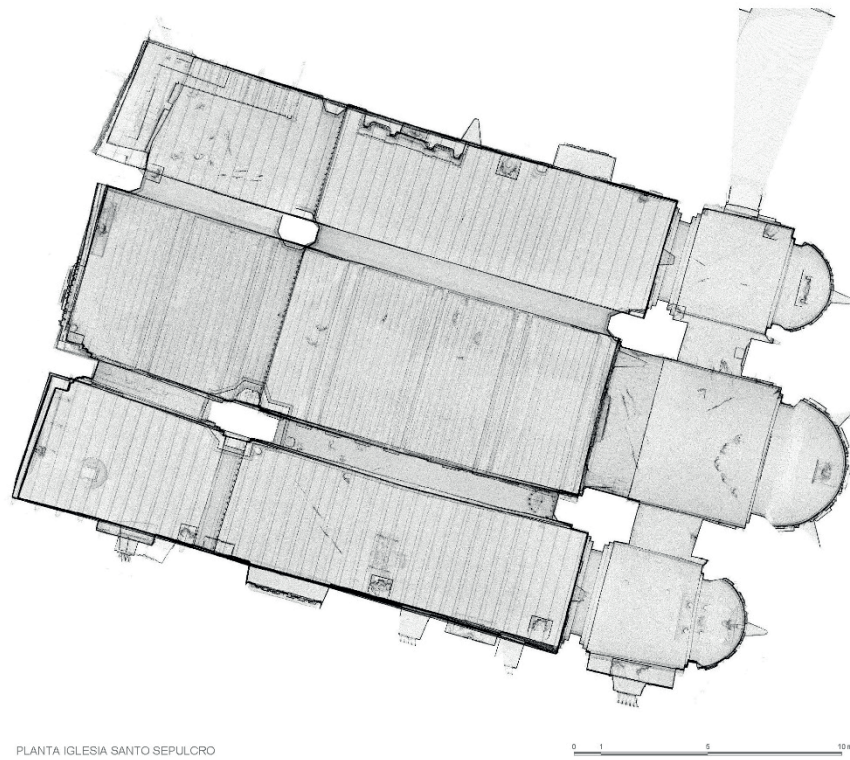


Figura 162. Planta obtenida a partir de la nube de puntos del escáner láser

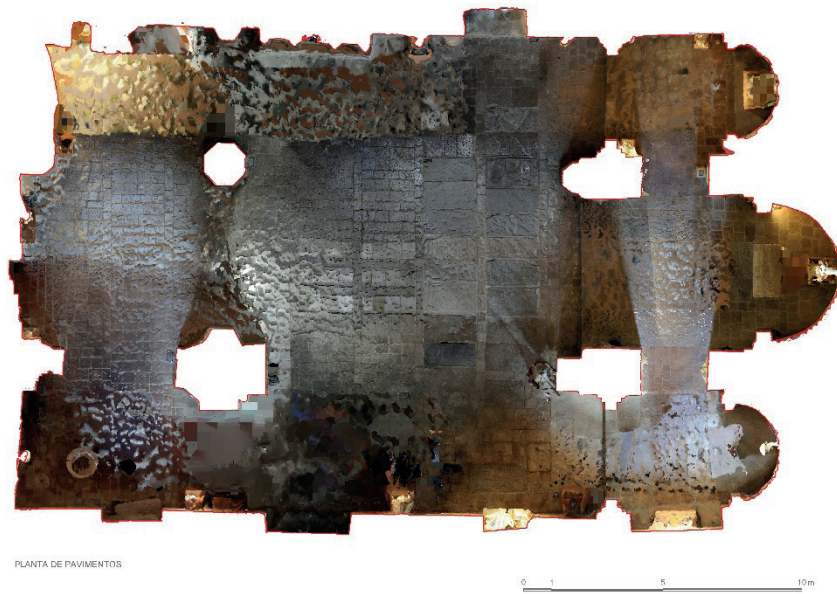


Figura 163. Planta de pavimentos generada a partir del modelo de fotogrametría

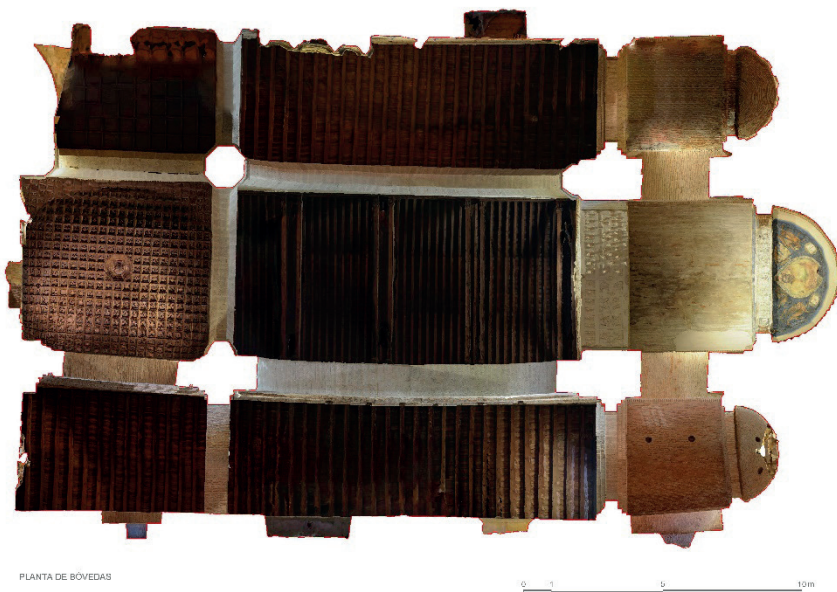


Figura 164. Planta de techos generada a partir del modelo de fotogrametría

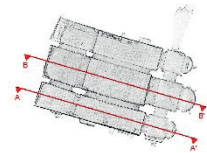


Figura 165. Secciones longitudinales generadas a partir del modelo de fotogrametría

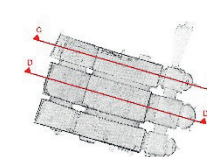


Figura 166. Secciones longitudinales generadas a partir del modelo de fotogrametría

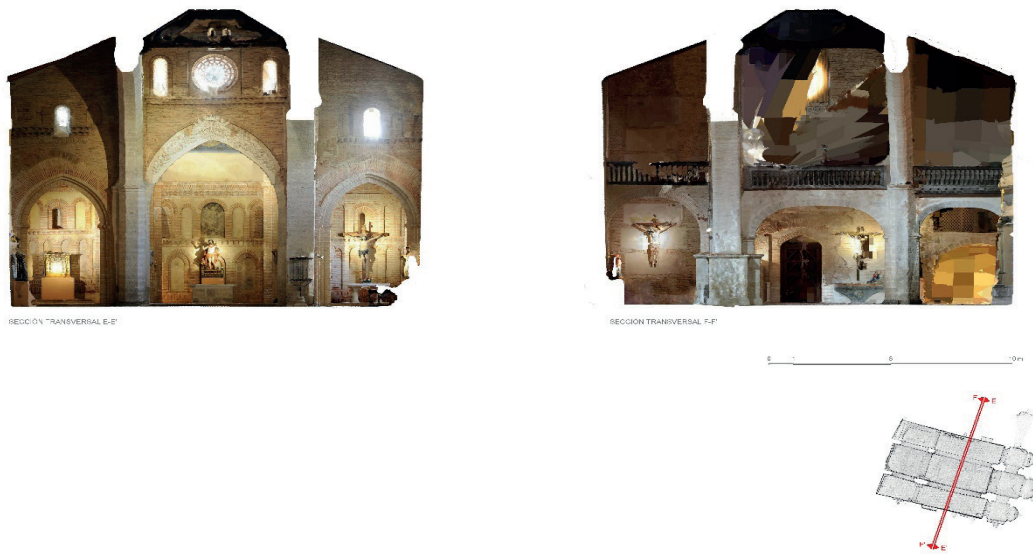


Figura 167. Secciones transversales generadas a partir del modelo de fotogrametría

Con las ortofotos de los alzados interiores se realizó un análisis de las curvaturas de los arcos para determinar los centros y las luces que cubrían. En uno de los lados es un arco de medio punto y en el otro un arco apuntado.

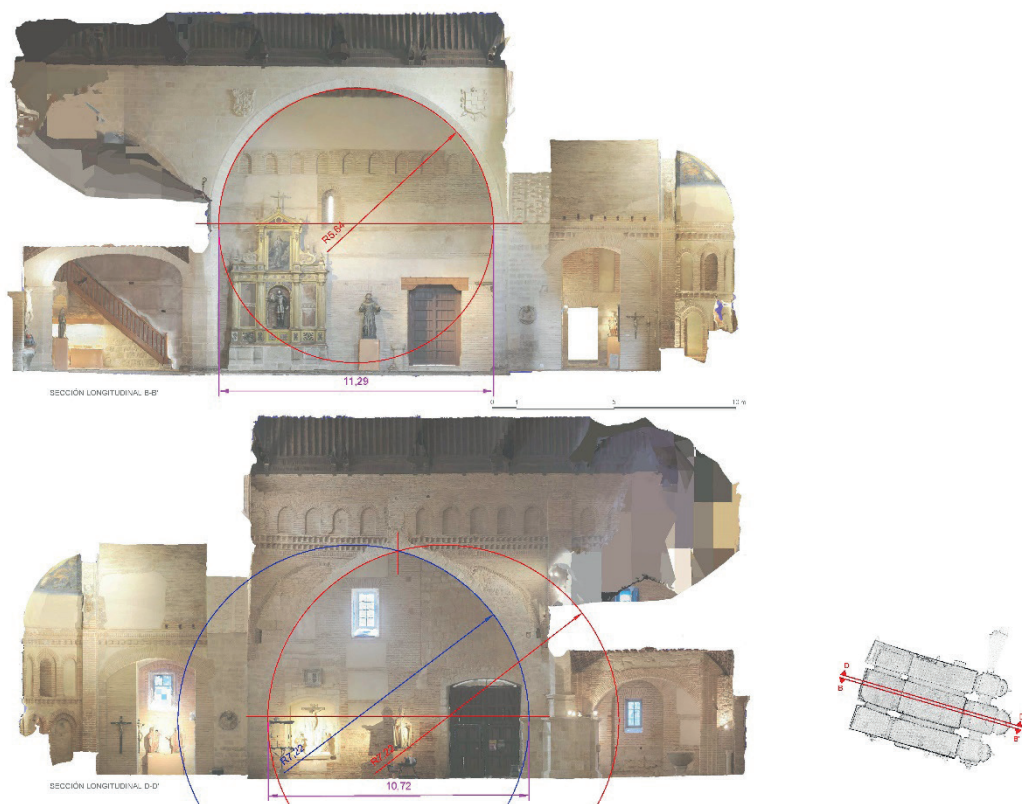


Figura 168. Gráfico de curvaturas de los arcos formeros y distancia que cubren. Análisis realizado a partir de las ortofotos generadas del modelo fotogramétrico

También se extrajeron una serie de ortofotos a color del modelo de triángulos del modelo fotogramétrico que fueron utilizadas para el análisis del paramento que coincide con uno de los arcos y el establecimiento de una hipótesis de cómo pudo ser ese muro antes de realizar la ejecución del arco.



Figura 169. Ortofoto del estado actual del muro que separa la nave central de la nave de la epístola

En el muro se podían observar las trazas de los arcos que separaban la nave central de la nave de la epístola. A partir de esas trazas se replanteo la hipótesis de cómo pudo ser esa división antes de ejecutar el arco formero. Geométricamente esos arcos tendrían una apariencia similar al arco del coro alto. Y las pilastras estarían construidas con ladrillo y tendrían varios niveles de escalonamiento.



Figura 170. Hipótesis de cómo fue el muro de separación entre la nave central y la nave de la epístola antes de la ejecución del gran arco formero

El modelo de triángulos fue exportado en formato OBJ para poder subirlo al visualizador online Sketchfab para poder ser consultado de forma externa.



Figura 171. Escanear el código QR con el dispositivo móvil para poder visualizar el modelo tridimensional del interior de la iglesia del Santo Sepulcro. Enlace a modelo 3d: <https://skfb.ly/o7SKP>

El proceso seguido se orientó a tener un modelo 3d de la iglesia del Santo Sepulcro para:

- generar documentación planimétrica
- análisis de la curvatura de los arcos formeros
- plantear hipótesis de la construcción de los arcos formeros
- crear un archivo 3d como registro del estado actual y como fuente de datos para la consulta de mediciones
- difusión del modelo mediante herramientas web

Para alcanzar este objetivo los pasos realizados fueron:

1. Realización de escaneados en el interior con el escáner Faro Focus 3D.
2. Montaje y registro de los escaneos en un único modelo de nube de puntos (importación, filtrado de puntos, coloreado de puntos y alineado de puntos).
3. Exportación de documentación planimétrica.
4. Exportación de nube de puntos de todo el conjunto en formato E57 y LAZ.
5. Realización de colección de fotografías interiores y exteriores para fotogrametría.
6. Revelado digital de las fotografías para mejorar iluminación y color.
7. Procesado de imágenes en Agisoft Metashape para obtención de modelo 3d
8. Creación de modelo 3d y nube de puntos optimizados para su difusión web.

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

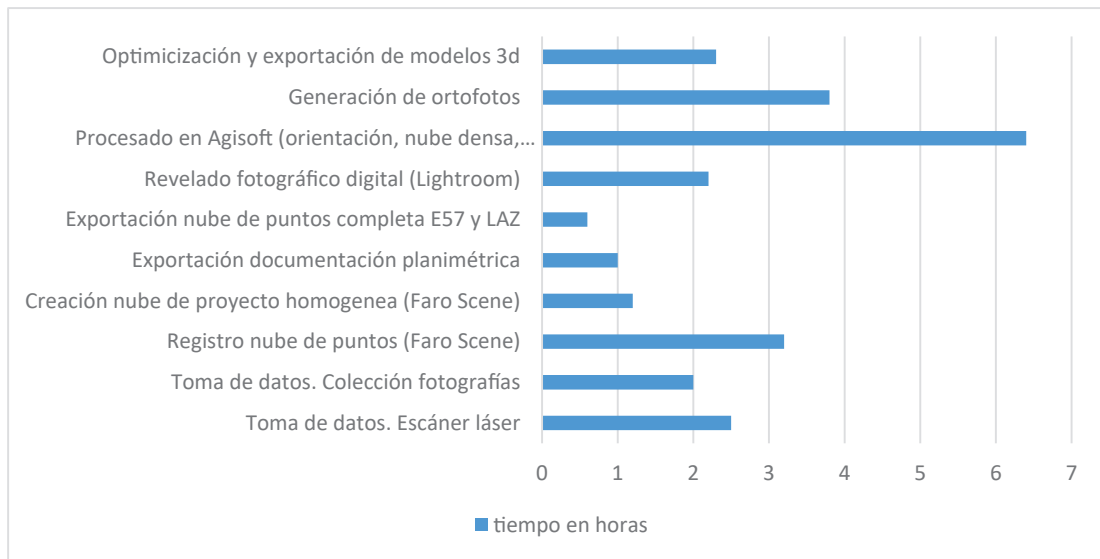


Tabla 19. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

CASO 2

**DIGITALIZACIÓN 3D PARA COPIA DE
SEGURIDAD O BACKUP**

NUESTRO PADRE JESÚS NAZARENO

VALLADOLID



Este es un trabajo realizado en el año 2015 en colaboración con el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica que consistió en la realización de un trabajo de digitalización 3d mediante escáner láser y fotogrametría de la talla policromada de Nuestro padre Jesús Nazareno. El objetivo de esta documentación era tener un modelo 3d con una gran precisión geométrica como copia de seguridad por si ocurrirá algún percance con la talla. Además, se realizó una colección de fotografías para generar otro modelo tridimensional para tener el color de la policromía.

1. Antecedentes

La talla pertenece a la cofradía Penitencial de Nuestro Padre Jesús Nazareno que tiene su sede en la iglesia Penitencial de Jesús, situada en la c/ Jesús junto a la Plaza Mayor de Valladolid. La talla está ubicada en una pequeña hornacina localizada a media altura de la zona del retablo de la capilla mayor. A esta hornacina se accede por la parte de atrás desde un pequeño camarín al que se sube por unas escaleras ubicadas a ambos lados del retablo mayor.

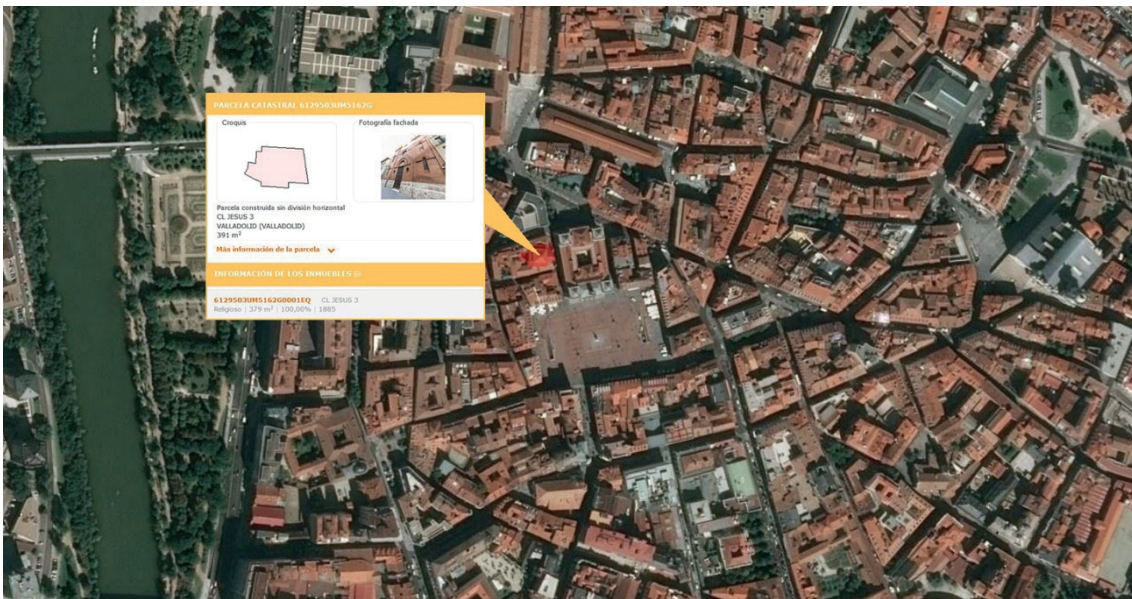


Figura 172. Ubicación de la iglesia Penitencial de Jesús dentro del casco histórico de Valladolid. Fuente: Google Maps y Sede Catastro

Según Jesús Burrieza Sánchez resulta complicado enunciar una cronología y autoría aceptada para esta imagen de devoción.

El primer titular de la cofradía pudo ser el actual “Nazareno” del paso “Camino del Calvario” que alumbra la Cofradía del Santo Cristo del Despojo., vinculado en su cabeza y sus manos a Pedro de la Cuadra hacia 1600, aunque el cuerpo pudo ser realizado posteriormente en 1620. La hipótesis es que este escultor tallase en madera las partes vitales, para una imagen de vestir, en los primeros momentos de la cofradía y que, tras la generalización de los pasos en madera, fuesen encajadas en un cuerpo realizado por un discípulo de Gregorio Fernández. Pero cuando esta cofradía buscó su independencia del convento de San Agustín, en el cual había nacido, y tuvieron

que entregar sus imágenes procesionales a los frailes, fue menester encargar una nueva talla del “Nazareno” en 1676 siguiendo el modelo del anterior, que es ésta que contemplamos.

Aparece, pues, Cristo con la cruz a cuestas, camino del Calvario, derribado por el peso de la misma, con una rodilla en tierra y con el brazo y la mano que desean apaciguar la caída. La autoría de esta talla se encuentra actualmente relacionada con los Rozas aunque tampoco se ha descartado a Juan Antonio de la Peña, hipótesis muy valorada pues en aquellos años este cofrade-escultor había realizado algunas importantes tallas. Sabemos que ésta del Nazareno salía vestida en los primeros años del siglo XVIII con una túnica morada, costumbre que continuó hasta hace ochenta años. La túnica de madera contiene pliegues muy quebrados, con estofado realizado en el año 1927 por Mariano García Maestro.

La iglesia inició su construcción aproximadamente hacia el año 1665. Tiene forma de cruz latina, consta de una sola nave. El crucero está rematado con una cúpula apoyada sobre pechinas. Solo tiene una fachada a calle, el resto son medianeros con edificio adyacentes. La fachada principal consta de un cuerpo central y dos laterales rematados con espadañas donde se alojan las campanas. El camarín donde se ubica la talla fue construido a finales del s. XVIII.



Figura 173. Fotografía esférica realizada en el centro de la iglesia. Fuente: elaboración propia

2. Planificación previa del trabajo

Previamente a la realización del trabajo se realizó una planificación de las diferentes fases que se llevarían a cabo para el proceso de documentación y los equipos a utilizar.

En una primera fase se realizaría el escaneado de la talla para obtener un modelo geométrico con precisión milimétrica. Para ello se utilizó un escáner de brazo que aseguraba obtener esa resolución de milímetro. En una segunda fase se realizaría una colección de fotografías para la generación de un modelo tridimensional con color. La tercera fase sería el procesado, la creación del modelo tridimensional y la extracción de información básica.

Con el escáner láser Faro Focus 3D se realizó un escaneo del interior de la iglesia y el hueco en el retablo donde la talla está colocada durante todo el año.

A continuación, se muestra una tabla con el equipo y programas utilizados en el trabajo:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner Scanworks Perceptron V5 con brazo Romer Infinity (talla policromada)
	Escáner láser Faro Focus 3D S 120 (iglesia)
	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
Programas	Faro Scene
	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom
	PTGui
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 20. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

3. Toma de datos

La toma de datos se dividió en dos partes: la primera enfocada a la digitalización con escáner láser y la segunda a la digitalización con fotogrametría.

La documentación de la talla se llevó a cabo en el camarín de la iglesia, bajando la imagen de su posición habitual en el retablo mayor y colocándola sobre una mesa especialmente diseñada para la ocasión.

Primero se hizo la toma de datos con escáner. Para el escaneado de la pieza se recurrió a un escáner Scanworks Perceptron V5 con brazo Romer Infinity. Es un escáner de corto alcance que solo captura geometría, pero con una gran precisión métrica. El brazo Romer es un brazo articulado que permite el movimiento en 7 ejes y su longitud permite trabajar hasta una distancia de 1,6 m desde su posicionamiento.

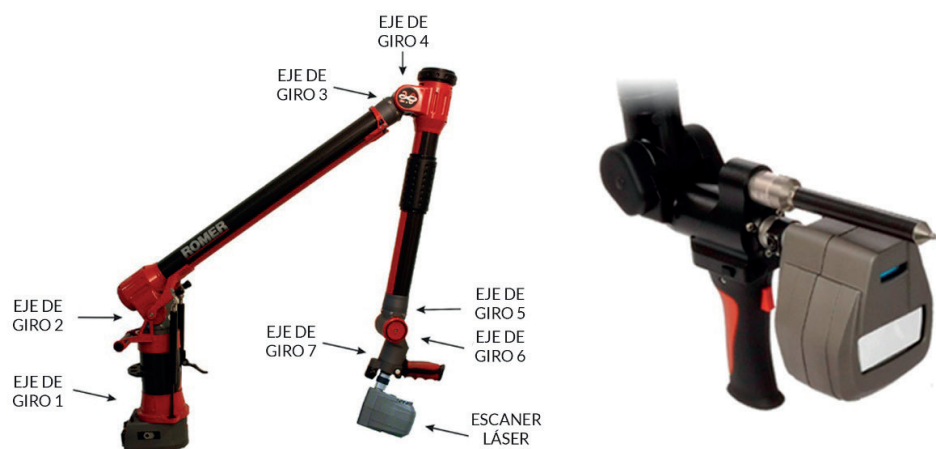


Figura 174. Ejes de movimiento del brazo Romer Infinity (izq) y cabezal escáner láser Scanworks Perceptron V5 (dcha). Fuente: elaboración propia

Para poder trabajar de forma cómoda, se ubicó la mesa con la imagen en el centro de la sala para que de esta manera que se pudieran girar los 360º completos alrededor de un eje vertical, haciendo posible el escaneo de toda la superficie de la talla.

ESPECIFICACIONES DEL SENSOR SCANWORKS PERCEPTRON V5	
Densidad de perfil	7640 puntos/línea
Rango de escaneo	458400 puntos/segundo
Resolución media punto a punto	0.0137 mm
Stand-off	100 mm
Profundidad de campo	110 mm
Ancho de campo cercano	93 mm
Ancho de campo lejano	140 mm
Precisión de la medición	0.0240 mm

Tabla 21. Especificaciones escáner Scanworks Perceptron V5. Fuente: <https://hitech.netlify.app>
[Consultado: 07/03/2017]



Figura 175. Colocación de la talla y el equipo de trabajo en la zona del camarín. Fuente: elaboración propia

Esta preparación previa es muy importante ya que la talla tiene que estar lo más accesible posible en todo momento, pues el escáner se coloca fijo en posiciones estratégicas sobre un trípode de acero que, debido a su peso, aproximadamente 100 kg, se evita tener que moverlo muchas veces. A su vez existe una limitación de uso, que establece una distancia máxima de 160 cm de separación entre el objeto y el trípode (alcance máximo del brazo). La distancia de escaneo desde el cabezal del escáner hasta la talla es de un máximo de 12 cm, en caso de alejarnos o acercarnos el escáner emitirá un pitido para que mantengamos la distancia constante en todo momento.



Figura 176. Proceso de escaneado de la zona del rostro de la imagen. Fuente: elaboración propia

El proceso de escaneado se realiza conectado a un ordenador, lo que permite la comprobación in situ del resultado obtenido a través de la inspección visual, en tiempo real, que permite el programa que realiza el solape entre las diferentes capturas de puntos.

Esta visualización en tiempo real de los datos capturados permite inspeccionar los resultados durante la realización del trabajo, permitiendo desechar las capturas con problemas y poder repetir el escaneado de la zona afectada.



Figura 177. Comprobación de los resultados obtenidos durante el proceso de escaneo. Fuente: elaboración propia

Entre las desventajas está la dificultad de acceder a zonas angostas del objeto, dado que el volumen del cabezal del escáner y el hecho de que el escáner no captura el color, este debe ser aplicado sobre el modelo sólido que se genere desde el modelo de la nube de puntos, mediante la “proyección” de texturas (imagen color) obtenidas fotográficamente.

El proceso de escaneo resulta especialmente difícil en aquellas zonas donde los pliegues de la túnica del Nazareno limitan el acceso de los rayos láser que proporcionan la lectura de coordenadas necesarias para definir los puntos que generan el modelo (nube de puntos).



Figura 178. Proceso de escaneo de los pliegues de la túnica. Fuente: elaboración propia

Para la completa definición de la imagen y permitir el adecuado escaneo, se retiraron la cruz y la corona de espinas que completan la talla, pero también las manos que encajan en las bocamangas de la túnica mediante unos espigones de madera sujetos con un pasador metálico.

El desmontaje de las manos, además de realizarse por motivos operativos, se realizó por razones de seguridad, dada la fragilidad y situación expuesta de estas partes de la talla, especialmente la mano derecha, dispuesta a una altura y en una posición propensa a recibir golpes.



Figura 179. Proceso de retirada de las manos del Nazareno y escaneo independiente. Fuente: elaboración propia

El escaneo de las manos se realizó de forma independiente, haciendo un recubrimiento completo de la superficie de la palma de la mano como del reverso. Además, se realizó un escaneo de menor resolución de las manos colocadas en su posición original en la talla, con el fin de poder utilizar ese escaneo como referencia para la colocación en la posición espacial exacta del modelo de alta resolución.



Figura 180. *Proceso de escaneo de las manos en su ubicación en la talla . Fuente: elaboración propia*

Para poder digitalizar las manos, primero se colocó la mano en una superficie horizontal estable y se escaneo toda la superficie visible de la mano del lado de la palma. Después se volteó la mano y se escaneo la otra mitad. Para enlazar un escaneo con otro, se tomaron puntos de referencia entre ambos escaneos para poder realizar la fusión.

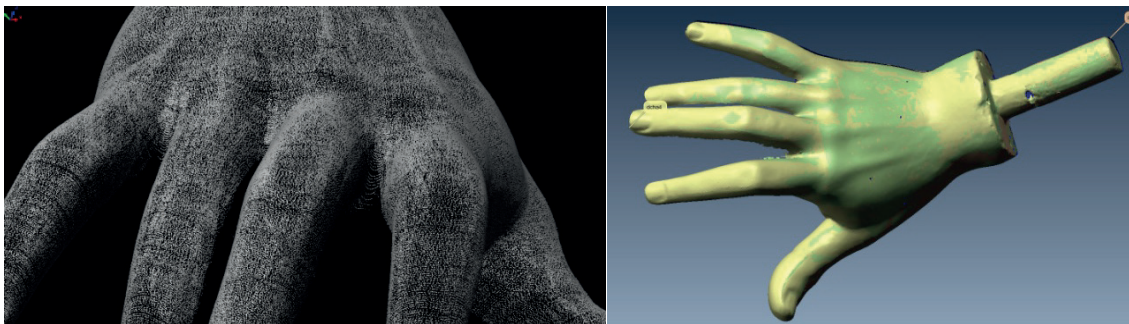


Figura 181. *Modelo en nube de puntos (izq) y modelo sólido de una de las manos (dcha)*

Al retirar las manos de su posición se pudo escanear el interior de las bocamangas de la túnica consiguiendo cerrar la malla en ese punto. Existieron algunos inconvenientes en el escaneo de esta zona debido a las dimensiones del cabezal del escáner unido a la profundidad y estrechez del hueco en el que se encajaban las manos.

De igual manera se procedió con el escaneo de la corona de espinas.

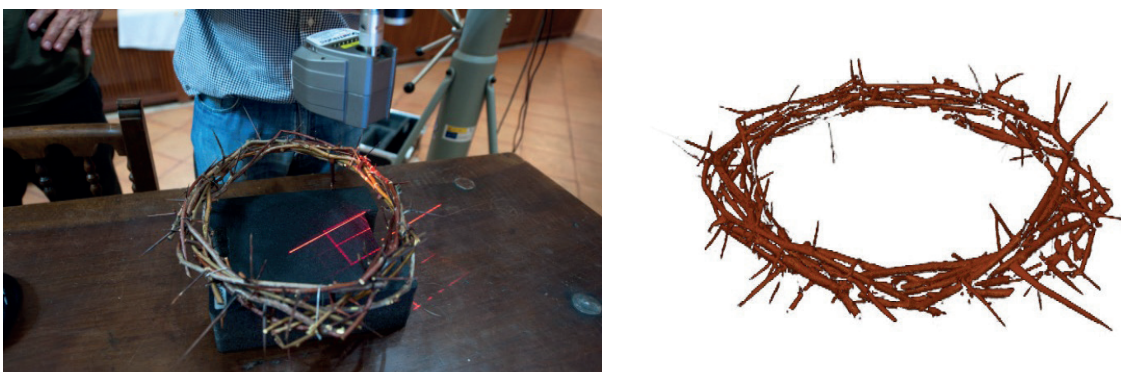


Figura 182. *Escaneo de la corona de espinas (izq) y modelo sólido de la corona (dcha)*

La última labor de escaneo sobre los elementos que componen la talla, se realizó sobre la cruz con la que procesiona. Para ello se recurrió a la utilización del escáner láser Faro Focus 3D, más rápido en la captura de puntos, pero de menor precisión en comparación con el escáner de brazo utilizado. Pero por la simplicidad de la geometría de la cruz, era adecuado para las resoluciones que se necesita en su definición. En la fase de registro y procesado se pudo observar que estos escaneos realizados a la cruz tenían problemas de geometría y mucho ruido. Esto fue debido a la superficie del material con el que estaba realizada la cruz, ya que tenía un acabado negro brillante (negro piano) lo que afectó a la reflexión del haz láser sobre la superficie generando respuestas erróneas.

Debido a esta situación se optó por extraer las medidas generales y realizar el modelado y texturizado de la cruz de forma manual con Autodesk 3ds Max.

Tras el trabajo de escaneado se procedió a la realización de las tomas fotográficas para el proceso de fotogrametría digital. Se realizaron pruebas de iluminación con objeto de conseguir una iluminación homogénea, evitando zonas de excesiva iluminación y zonas de excesiva sombra. Para ello se colocó una tela blanca forrando las paredes y se dispuso una pantalla de luz cenital protegida con un paraguas oscuro, para reducir los brillos de la superficie de la policromía debidos a la fuerte iluminación. A pesar de montar toda esta instalación siguieron generándose algunos reflejos.

En total se realizaron tres colecciones de fotografías, dos disparadas con tiempo de exposición y una disparada con flash. Ambas colecciones se realizaron en formato RAW para posteriormente realizar un revelado digital y poder mejorar las fotografías en caso de ser necesario.

La configuración de las fotografías fue la siguiente:

CONFIGURACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA	
Dimensiones fotografías	4256 x 2832 píxeles
Modelo de cámara	Nikon D700
Distancia focal	24 mm
Velocidad ISO	ISO-200
Apertura focal	f/11
Tiempo de exposición	2 seg

Tabla 22. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia

A partir de la fotogrametría se generó un modelo de malla con color de la talla, con un total de 1.200.000 caras.

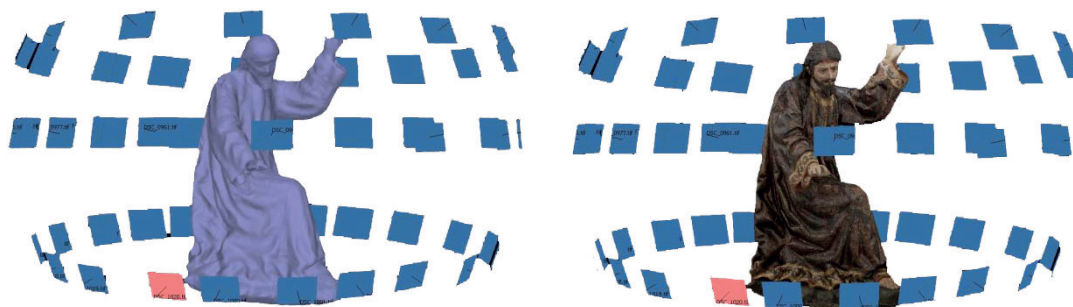


Figura 183. Modelo sólido y con textura obtenido a partir de la fotogrametría digital

De forma paralela con el escáner láser Faro Focus 3D se realizó un escaneo del interior de la iglesia y el hueco en el retablo donde la talla está colocada durante todo el año. Este escaneo se realizó únicamente para aprovechar y tener una información básica del templo para posteriormente generar una documentación planimétrica básica de la iglesia. Se realizó un único escaneo en el centro del templo, ya que esto no formaba parte de los objetivos del trabajo, sino que se hizo por tener documentado este espacio.

La configuración del escaneo se realizó marcando los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Indoor 10 m...
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º
	Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	3x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:07:32
Tamaño de escaneo	10246 x 4268
Millones de puntos del escaneo	44,6
Resolución mm/10 m	6.136
Color escaneado	Si

Tabla 23. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia



Figura 184. Toma de datos en el interior de la iglesia con el escáner faro Focus 3D Fuente: elaboración propia

4. Resultados

El modelo obtenido de malla de triángulos de la talla del Nazareno tenía una resolución de paso de malla de un punto cada milímetro, existiendo zonas de mucho detalle en los pliegues de la túnica, rostro o manos. Aunque existen algunas zonas de la túnica con pliegues muy profundos que quedaron en sombra (sin puntos) por la imposibilidad de llegar con el cabezal del escáner (zonas con una profundidad mayor de 10 cm). Estas zonas sin puntos no son superficies significativas, y en algunos casos esas zonas de sombras se pudieron completar con el modelo obtenido mediante fotogrametría digital o mediante la edición manual de la malla.



Figura 185. Modelo de malla de triángulos (izq) y modelo de nube de puntos del rostro y la mano (dcha)

El modelo resultante tenía una densidad de triángulos muy grande lo que obligó a optimizarlo para facilitar su visualización a través de la aplicación web Sketchfab.





Figura 186. Modelo sólido de la talla visualizado desde diferentes puntos de vista. Fuente: elaboración propia

Este modelo optimizado también se utilizó para realizar una experiencia en realidad aumentada (AR). En su momento se utilizó la aplicación Augmented, la cual permitía cargar el modelo 3d y relacionarlo con un target o marcador tipo código QR, el cual al escanearlo con la cámara del móvil la aplicación lo utilizaba como referencia para colocar el objeto y poder navegar en torno a él. Este tipo de relación entre el target y la aplicación de AR no era muy estable y en determinados momentos se rompía la conexión y el modelo desaparecía o se tornaba incontrolable, lo que obligaba a reiniciar la aplicación.

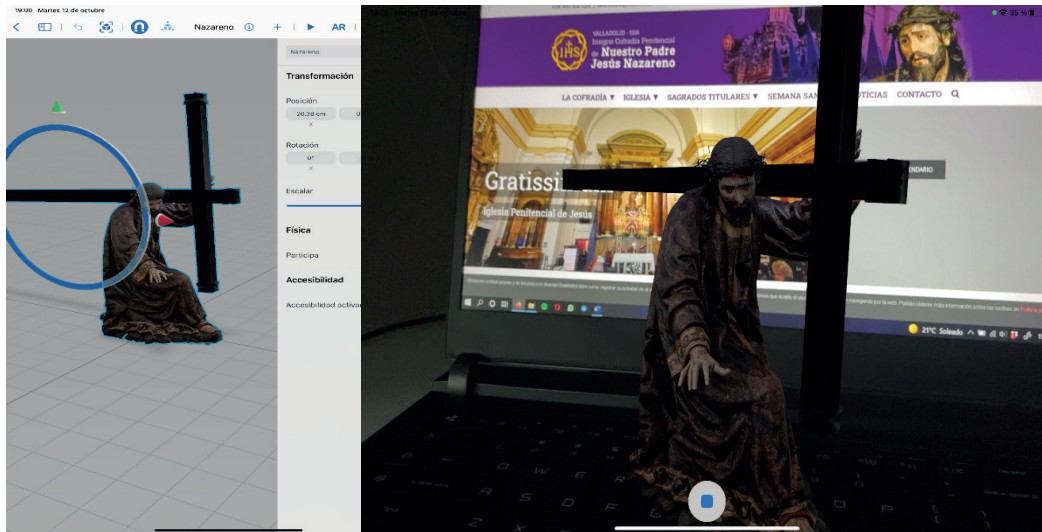


Figura 187. Imágenes de la aplicación Reality Composer y de la visualización AR del modelo del Nazareno. Fuente: elaboración propia

En el momento de escribir este texto se realizó una prueba con las nuevas tecnologías existentes, en este caso con la tecnología ArKit y la aplicación Reality Composer. La experiencia fue mucho mejor, ya que esta tecnología no se basa en el uso de marcadores, sino que realiza un escaneado del entorno, también llamado *tracking* o traqueo, donde se quiere visualizar el modelo tomando puntos de referencia de los que hará seguimiento en todo momento. Esto va a permitir que el modelo 3d esté más integrado en el entorno y que nos podamos desplazar alrededor de él sin perder

la referencia en ningún momento.

Del escaneo del templo se pudo obtener una planta y alzados generales de la iglesia. Se consiguió capturar la mayor parte de la geometría, pero existen sombras (zonas sin puntos) que se habrían reducido si se hubieran realizado otros tres escaneos como mínimo.

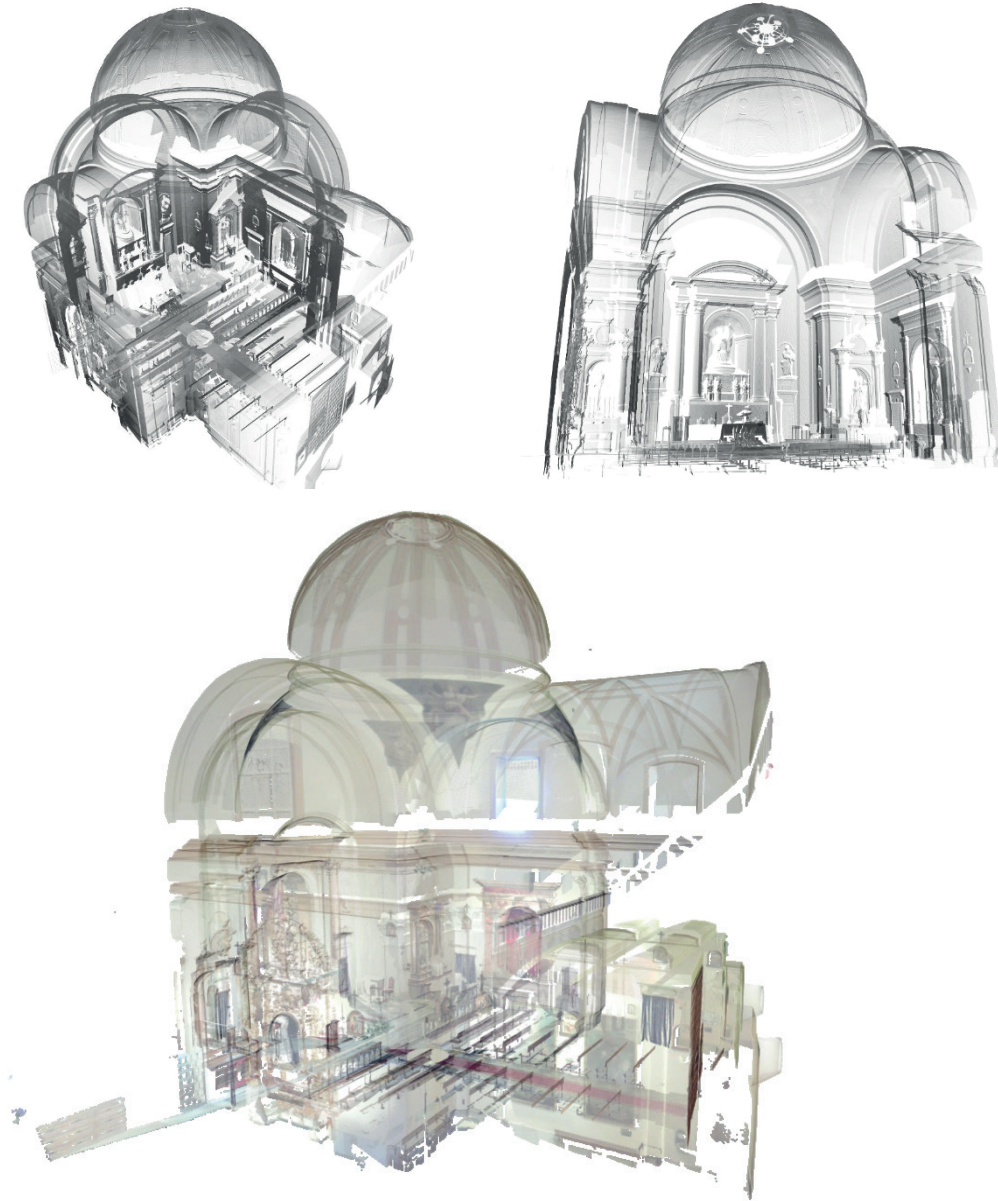


Figura 188. Modelo de nube de puntos del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia

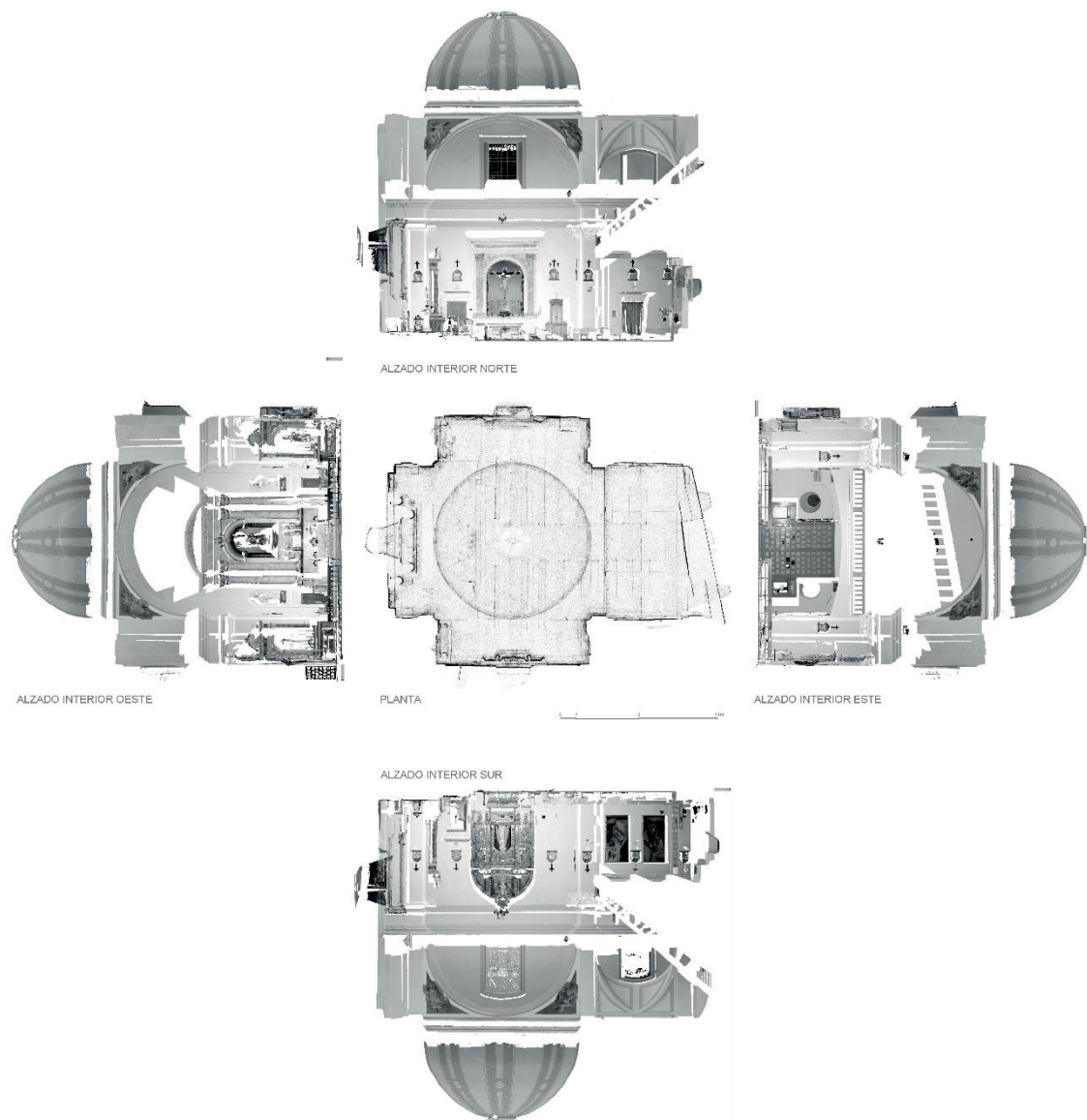


Figura 189. Planimetrías del interior de la iglesia obtenidas a partir de la nube de puntos. Fuente: elaboración propia

El proceso seguido en este trabajo estaba enfocado a obtener un modelo 3D de alta resolución de la talla, para su visualización, consulta de detalles e incluso, en caso de ser necesario, poder llegar a crear una réplica exacta.

Para alcanzar este objetivo los pasos a seguir se concretaron en:

1. Realización de tomas generales de la talla con el escáner Scanworks Perceptron V5.
2. Realización de tomas particulares de manos y corona, con el escáner mencionado.
3. Realización de tomas generales de la cruz con escáner Faro Focus 3D.
4. Montaje de un modelo combinando los escaneados anteriores.

5. Realización de fotografías de alta resolución para generar modelos por fotogrametría y crear texturas para, posteriormente, poder aplicarlas sobre el modelo 3D creado a partir de los datos del escáner.
6. Exportar los modelos con y sin textura en formatos STL y PLY para posteriormente, poder crear posibles réplicas de las tallas.
7. Creación de modelos 3D optimizados para su difusión en la web.
8. Creación de experiencia inmersiva del modelo generado.

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

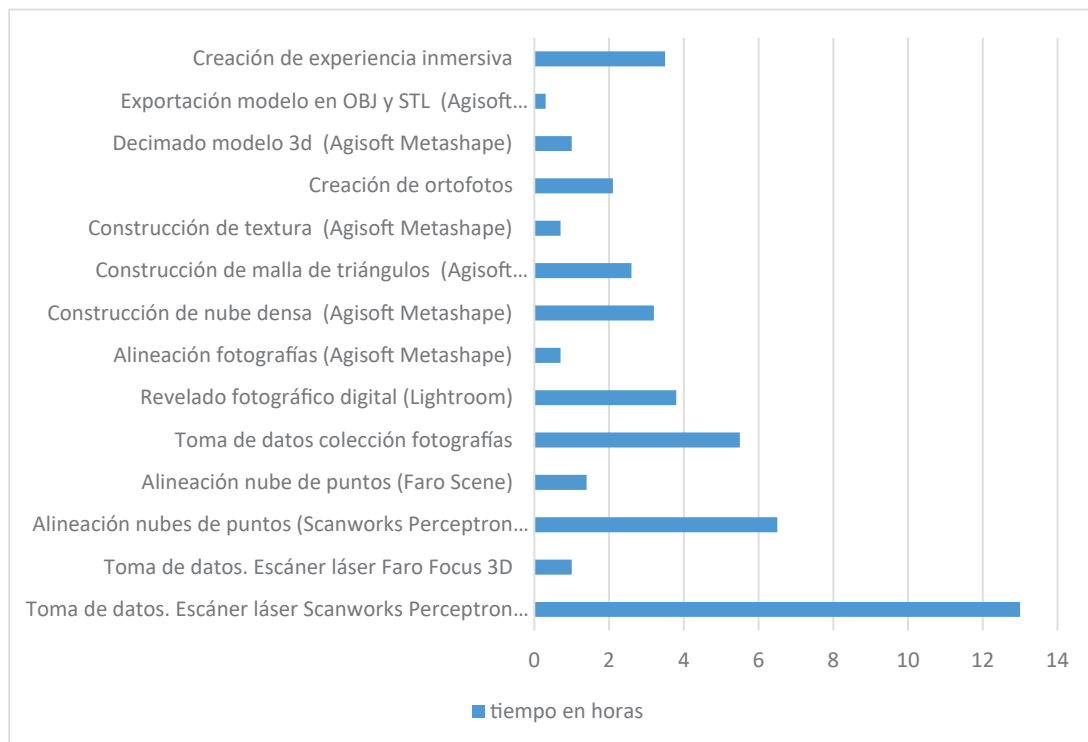


Tabla 24. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia



Figura 190. *Vista ortogonal en planta*

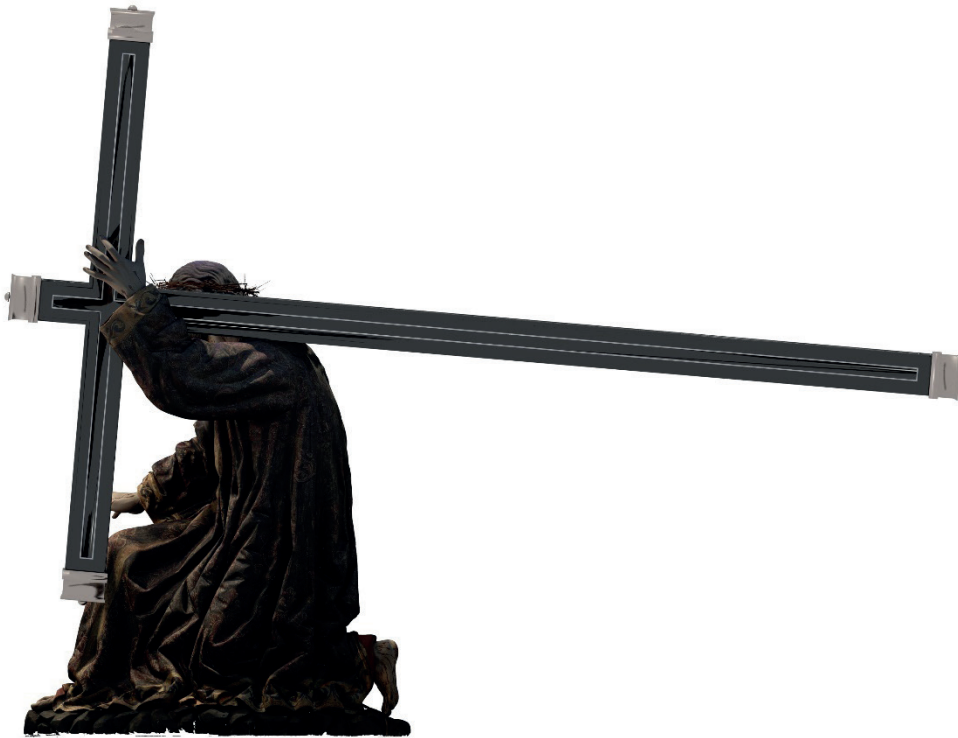


Figura 191. *Vista ortogonal en alzado lateral derecho*

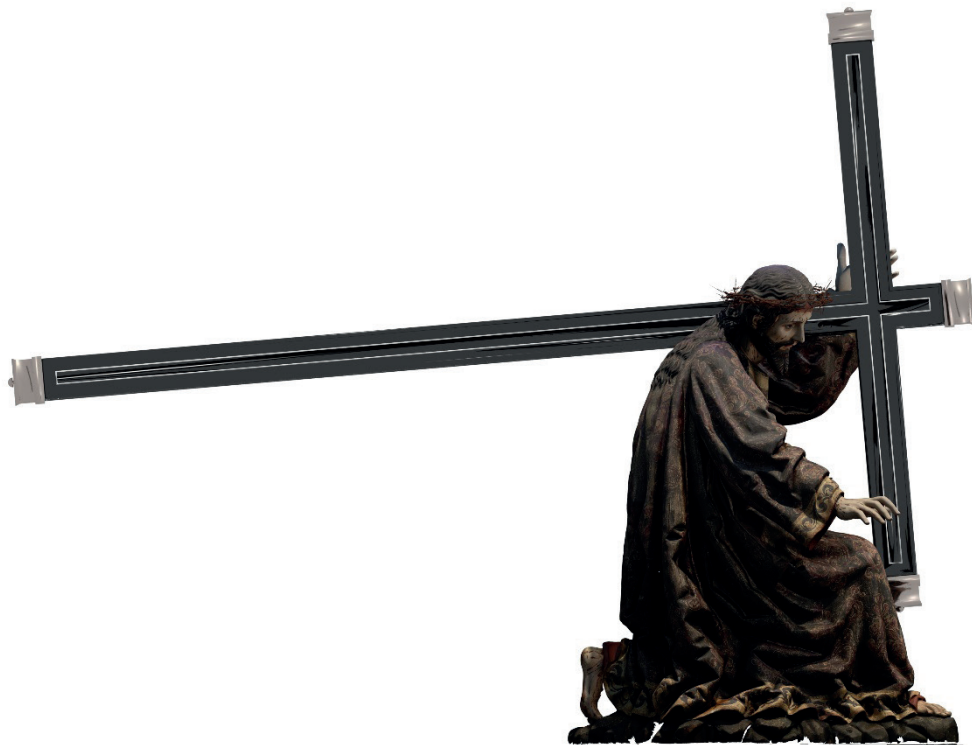


Figura 192. *Vista ortogonal en alzado lateral izquierdo*



Figura 193. *Vista ortogonal frontal y posterior*



Figura 194. *Imagen del modelo virtual resultante. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/zWFP>*

CASO 3

**DIGITALIZACIÓN 3D PARA REALIZACIÓN
DE RÉPLICA**

**CAPITELES ROMÁNICOS DEL MUSEO
ARQUEOLÓGICO NACIONAL DE MADRID**



Trabajo realizado entre los meses de febrero y abril de 2018 en colaboración con la empresa Geobit Consulting, cuyo encargo procedía de la Dirección General de Patrimonio de la Junta de Castilla y León.

El objetivo era realizar un modelo tridimensional exacto de cada capitel para poder reproducir dos réplicas, con autorización legal, para ser mostradas en la exposición Mons Dei, organizada por la Fundación Las Edades del Hombre en Aguilar de Campoo entre las fechas de mayo y noviembre de 2018. Posteriormente estas réplicas estarían expuestas en el centro expositivo ROM que tiene la Fundación Santa María la Real en el Monasterio de Aguilar de Campoo. Además, toda la documentación digital y modelos tridimensionales de estos capitales han sido depositados en los archivos de la Junta de Castilla y León como copias de seguridad por si ocurriera algún percance en los capiteles originales.

1. Antecedentes

El primero de ellos es un capitel sencillo con la Ascensión de Cristo y Apostolado, su cronología data hacia los años 1160 – 1170, tiene unas dimensiones de 47 x 61 x 47 cm y está realizado en piedra arenisca. Su procedencia es la cabecera de la Iglesia del monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo en Palencia.



Figura 195. Fotografía de la zona frontal del capitel sencillo con la Ascensión de Cristo y Apostolado. Fuente: elaboración propia

José Luis Hernández Garrido (2018) realiza la siguiente descripción de los motivos escultóricos que aparecen en el frente y laterales del capitel: *...en el frente aparece Cristo sedente en majestad dispuesto en el interior de una mandorla¹ decorada con hojas tripétalas trepanadas (interiormente aplica flores hexapétalas entre acuáticos meandros). La mandorla está sujeta por dos ángeles de delineados cabellos -rizado el izquierdo, peinado a cerquillo el derecho- y manos alargadas que surgen entre esquemáticos jirones de nubes, visten túnicas de cuello festonados y portan alas de cuidados plumones recordando los del ángel anunciando la resurrección de Cristo en el capitel nº 50201. Media docena de apóstoles se disponen agrupados en cada lateral de la cesta, sus cabezas forman grupos triangulares (los de las bases, genuflexos sobre ondas vegetales). El grueso barbados, portan libros abiertos, a excepción de San Juan imberbe, que exhibe una filacteria, y San Pedro, con su atributo tradicional. Sus manos repiten esquemáticos tubos de órgano y elementales pliegues en meandro, aunque parecen obra de un escultor menos dotado, pues carecen de la desenvoltura y vigor perceptible en los capiteles de las Marías ante el sepulcro y el Cristo Triunfante.*

Cristo barban, tocado con peinado a cerquillo y nimbado con disco crucífero. Con su mano izquierda sujeta un libro lujosamente encuadernado y cierre metálico -como en el apostolado de Santiago de Carrión- mientras bendice con la mano diestra. Viste túnica adornada con bandas festonadas y piezas ovals simulando lujosas pedrerías.

Los pocos elementos arquitectónicos supervivientes en la cabecera del monasterio de Aguilar, antes de ser sustituida por la gran capilla radial gótica, solo permiten reconocer dobles fustes anillados y algunas basas acordes con la tradición abulense, amén de un programa epigráfico -de ductus y compostura carrionesa- ceñido a las impostas del triunfal que reforzaría el carácter redencional de los capiteles trasladados al Museo Arqueológico Nacional tras la declaración monumental de tan insigne conjunto en 1866...

1 En el arte medieval, óvalo o marco en forma de almendra que rodeaba algunas imágenes religiosas.

Según la ficha de catálogo del MAN el capitel sencillo con la Ascensión de Cristo y Apostolado tenía los siguientes datos:

Inventario	50204
Clasificación Genérica	Elementos arquitectónicos
Objeto/Documento	Capitel
Autor/a	Taller: Segundo Maestro de la Iglesia
Conjunto	Museo Español de Antigüedades. Tomo I. Lámina 19; Negativo sobre placa de vidrio y FM; Ficha antigua 2ª Sección y FM
Materia/Soporte	Caliza
Técnica	Tallado
Dimensiones	Altura = 47 cm; Anchura = 61 cm; Profundidad = 33 cm
Descripción	Capitel historiado decorado en tres frentes. El central representa a Cristo inscrito en mandorla con libro en su mano izquierda, y levantando la derecha en actitud de bendición. La mandorla está decorada por el borde con palmetas y perforaciones de trépano, y sostenida por dos ángeles. En los laterales se representa al apostolado. A la izquierda con seis figuras, dos de ellas de cuerpo entero, San Pedro portando la llave, y otro apóstol con libro, mientras que a las otras cuatro sólo se les ve las cabezas. El frente derecho representa los otros seis apóstoles, tres de ellos de cuerpo entero: uno porta un rollo desplegado, otro un libro abierto, y el tercero señala la escena central con el dedo índice, mientras que a las otras tres sólo se les ve las cabezas.
Iconografía	Ascensión de Jesucristo; Apostolado
Datación	1101=1300 (siglos XII-XIII)
Contexto Cultural/Estilo	Románico
Lugar de Procedencia	Monasterio de Santa María la Real, Aguilar de Campoo (Aguilar (comarca), Palencia)
Lugar Específico/Yacimiento	Monasterio de Santa María la Real
Catalogador	Antigüedades Medievales

Tabla 25. Datos obtenidos del catálogo/inventario del Museo Arqueológico Nacional (Madrid). Fuente: <http://ceres.mcu.es> [Consultado: 09/06/2018]

El segundo de ellos es un capitel doble con las Marías ante el sepulcro de Cristo, aparición de Cristo a la Magdalena (*noli me tangere*) y duda de Santo Tomás, su cronología data hacia los años 1160 – 1170, tiene unas dimensiones de 46 x 69 x 48 cm y está realizado en piedra arenisca. Su procedencia es el arco triunfal de la Iglesia del monasterio de Santa María la Real de Aguilar de Campoo en Palencia.



Figura 196. Fotografía de la zona frontal del capitel doble con las Marías ante el sepulcro de Cristo, aparición de Cristo a la Magdalena (*noli me tangere*) y duda de Santo Tomás. Fuente: elaboración propia

José Luis Hernández Garrido realiza la siguiente descripción de los motivos escultóricos que aparecen en el frente y laterales del capitel: ... *en el frente, las Marías portadoras de ungüentarios esféricos, quedan estupefactas ante la presencia del Ángel que anuncia la resurrección del Salvador; a los pies de un sepulcro de bañera -dispuesto sobre columnillas- aparecen adormiladas dos parejas de soldados armados con cotas de malla, espadas cortas y escudos de lágrima. El frente está enmarcado por un triple coronamiento semicircular amenizado por cuatro molduras verticales. El lateral izquierdo acoge la aparición de Cristo a la Magdalena, arrodillada a los pies del redentor bajo un grácil arbolillo, y el derecho la duda de Santo Tomás. Las figuras de ambos laterales desbordan el marco superior, limitado a dados angulares, y apoyan sus pies sobre el collarino.*

Los pliegues del manto del Ángel, describiendo refinados tubos de órgano, y los efectos en espiral en el hombro diestro y su antebrazo, reaparecen en las tocas y mantos de las santas mujeres,

amén del sudario tensado por el Ángel, los mantos de Cristo, Tomás, la Magdalena y las rodillas de esta, advirtiendo recios vuelos doblados. Los rostros masculinos, con peinado a cerquillo y finos bigotes, aparece barbados y nimbados; los femeninos y el angélico adopta mejillas más carnosas, con cuencas oculares sin trepanar y delineados párpados. Las Marías ciñen ajustadas tocas y el ángel mechones rizados sujetos mediante una cinta y nimbo dorsal, luce cuello festonado y alza sus alas de cálamos meticulosamente despiezados...

Según la ficha de catálogo del MAN el capitel doble con las Marías ante el sepulcro de Cristo, aparición de Cristo a la Magdalena (*noli me tangere*) y duda de Santo Tomás tenía los siguientes datos:

INVENTARIO	50201
Clasificación Genérica	Elementos arquitectónicos
Objeto/Documento	Capitel
Autor/a	Taller: Primer Maestro de la Iglesia
Conjunto	Museo Español de Antigüedades. Tomo I. Lámina 19; Negativo sobre placa de vidrio y FM; Ficha antigua 2ª Sección y FM
Materia/Soporte	Arenisca
Técnica	Tallado
Dimensiones	Altura = 48 cm; Anchura = 70 cm; Profundidad = 42 cm
Descripción	Capitel historiado doble y adosado; en el frente principal se representan las Marías ante el sepulcro cerrado, dejando ver el sudario colgando; en la cabecera figura el ángel anunciando la Resurrección; bajo el sepulcro hay cuatro soldados dormidos. En los laterales del capitel se representan dos apariciones de Cristo, en el derecho a la Magdalena y en el izquierdo a Santo Tomás.
Iconografía	Marías en el sepulcro; Noli me tangere; Aparición de Jesucristo a Santo Tomás; Aparición de Jesucristo a María Magdalena
Datación	1101=1300 (s.XII - s.XIII)
Contexto Cultural/Estilo	Románico
Lugar de Procedencia	Monasterio de Santa María la Real, Aguilar de Campoo (Aguilar (comarca), Palencia)
Lugar Específico/Yacimiento	Monasterio de Santa María la Real
Catalogador	Antigüedades Medievales

Tabla 26. Datos obtenidos del catálogo/inventario del Museo Arqueológico Nacional (Madrid). Fuente: <http://ceres.mcu.es>

2. Planificación previa del trabajo

Una vez que se recibió la información de los objetos a documentar se procedió a la planificación del trabajo. Como la finalidad u objetivo principal de este trabajo era la reproducción de unas réplicas de estos capiteles se estudió la mejor metodología para documentarlos. Fueron varias las decisiones que marcaron la metodología a utilizar. Por un lado, al tratarse de objetos pétreos que carecen de policromía se desestimó la necesidad de hacer un modelo tridimensional con color o textura real, por lo que en realidad solo era necesario obtener un modelo tridimensional con una geometría bastante detallada. Normalmente la reproducción de réplicas se suele realizar mediante dispositivos reproducción aditiva, también conocidos como impresoras 3D, o mediante fresadoras de control numérico por computadora, también conocidas como CNC. En estas últimas el funcionamiento es a la inversa, en vez de añadir material lo que se hace es partir de un bloque entero (de madera, metal o piedra) y la fresadora a través de diferentes pasadas lo que va haciendo es ir eliminando material.

Una cosa importante a tener en cuenta, es que cuando se realiza una réplica esta no puede tener las dimensiones exactas del objeto original, tiene que tener una variación. Esto implicaba que no fuera necesario conseguir unas precisiones milimétricas en el modelo tridimensional final.

Todas estas circunstancias, como la forma, ubicación y distancias de trabajo con el objeto inclinaron la balanza a que la mejor técnica a aplicar era realizar los modelos tridimensionales mediante fotogrametría digital.

El instrumental utilizado para realizar este trabajo fue el siguiente:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 35 mm F1.8
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 50 mm F1.8
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
	Equipo de iluminación (focos LED + telón de fondo neutro)
	Tarjetas de calibración de color
	Flexómetro
Programas	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom

Tabla 27. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

Se realizó una colección de fotografías por cada capitel. Estas cubrieron toda la superficie sin que quedara ninguna zona sin documentar.

3. Toma de datos

A pesar de haber realizado una planificación previa del trabajo a la hora de realizar las tomas surgió un pequeño contratiempo cuando se llegó al Museo Arqueológico Nacional, ya que debido al peso de los capiteles y a la falta de personal en el museo en esos momentos, las piezas no se pudieron desplazar a otra estancia, por lo que se tuvo que realizar la digitalización en las propias salas del museo con la iluminación expositiva. Los capiteles estaban ubicados en la planta segunda del Museo Arqueológico Nacional, en la sala de Reinos Cristianos (s.VIII-XV). Los capiteles se encontraban expuestos de forma exenta y elevados del suelo, mediante un perfil de acero, a una altura aproximada de 150-170 cm.



Figura 197. Sala del Museo Nacional Arqueológico en donde se ubican los dos capiteles. Fuente: www.man.es [Consultado: 23/01/2020]

Normalmente cuando se realizan trabajos de digitalización de piezas de pequeño formato lo recomendable es poder trabajar en una sala con la pieza exenta y con una iluminación mínima y controlada. Para solucionar el problema de la luz se optó por la utilización de un equipo auxiliar de iluminación de estudio formado por dos focos de luz con difusores, de este modo se consiguió una iluminación homogénea por toda la superficie de los capiteles.

Las colecciones de fotografías se realizaron alrededor de los capiteles distribuidas en anillos a diferentes alturas. Para dar escala al modelo se utilizaron una serie targets o marcadores en los que se tomaron mediciones.

A pesar de tener iluminación las fotografías se realizaron con trípode para conseguir el mejor resultado. La configuración de las fotografías fue la siguiente:

CONFIGURACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA

Dimensiones fotografías	4256 x 2832 píxeles
Modelo de cámara	Nikon D700
Distancia focal	24 mm
Velocidad ISO	ISO-200
Apertura focal	f/11
Tiempo de exposición	0,77 seg

Tabla 28. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia

Para el primer capitel se realizó una colección de 270 fotografías y para el segundo capitel se realizó una colección de 229 fotografías. Ambas colecciones se realizaron en formato RAW para posteriormente realizar un revelado digital y poder mejorar las fotografías en caso de ser necesario.

A partir de la fotogrametría se generó un modelo de malla con color de cada uno de los capiteles. El modelo del capitel sencillo con la Ascensión de Cristo y Apostolado tenía aproximadamente 35.217.360 caras. El modelo optimizado para la visualización web tenía 1.100.00 caras.



Figura 198. Fotografía del capitel original (izq). Imagen del modelo tridimensional del capitel (dcha). Fuente: elaboración propia

Y el modelo del capitel doble con las Marías ante el sepulcro de Cristo, aparición de Cristo a la Magdalena (*noli me tangere*) y duda de Santo Tomás tenía aproximadamente 31.112.492 de caras. El modelo optimizado para la visualización web tenía 980.000 caras.



Figura 199. Fotografía del capitel original (izq). Imagen del modelo tridimensional del capitel (dcha). Fuente: elaboración propia

4. Resultados

El modelo obtenido de malla de triángulos de cada uno de los capiteles tenía una resolución de paso de malla de un punto cada dos milímetros, existiendo zonas de mucho detalle en las zonas donde se concentraban los detalles escultóricos, tanto en las zonas frontales como en las laterales.

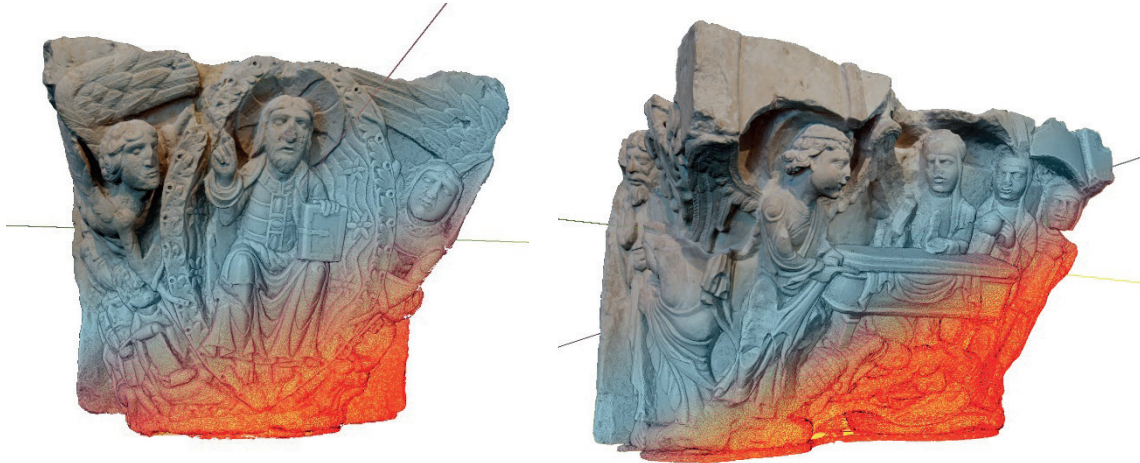


Figura 200. Composición de los capiteles en los que se puede ver el modelo de triángulos, el modelo sólido y el modelo de color. Fuente: elaboración propia

Este modelo optimizado también se utilizó para realizar una experiencia en realidad aumentada (AR), para ello se comprobó que el número de triángulos oscilaba entre los 100.000 y 180.000 triángulos. Este modelo optimizado en formato OBJ se reconvirtió en formato USDZ desde la aplicación web Vectary. La prueba se realizó con la tecnología ARKit y la aplicación Reality Composer. Esta tecnología no se basa en el uso de marcadores, sino que realiza un escaneado del entorno, también llamado tracking o traqueo, donde se quiere visualizar el modelo tomando puntos de referencia de los que hará seguimiento en todo momento. Esto va a permitir que el modelo 3d esté más integrado en el entorno y que nos podamos desplazar alrededor de él sin perder la referencia en ningún momento.

Los modelos obtenidos desde el proceso de fotogrametría digital estaban muy completos, aunque fue necesario realizar unos pequeños retoques para eliminar algunos triángulos erróneos en la zona posterior. Estos errores en la geometría fueron debidos a la dificultad para realizar la toma de datos de la cara trasera de los capiteles, ya que el espacio para poder trabajar era muy reducido. El espacio máximo entre los capiteles y la pared eran aproximadamente 50 - 60 cm.

El proceso seguido estaba orientado a obtener un modelo 3D de alta resolución de cada uno de los capiteles, para su visualización, consulta de detalles y sobre todo la realización de una réplica exacta. Para alcanzar este objetivo los pasos realizados se resumieron en:

1. Realización de fotografías generales para catálogo.
2. Realización de colecciones de fotografías de alta resolución, y en formato RAW, para la generación de modelos de fotogrametría y con textura desde Agisoft Metashape.
3. Revelado digital de fotografías

4. Procesado de imágenes en Agisoft Metashape para obtención de modelo 3d
5. Exportación de los modelos, con y sin textura, en formatos STL y OBJ para la creación de réplicas.
6. Creación de modelos optimizados para su visualización y difusión web.

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

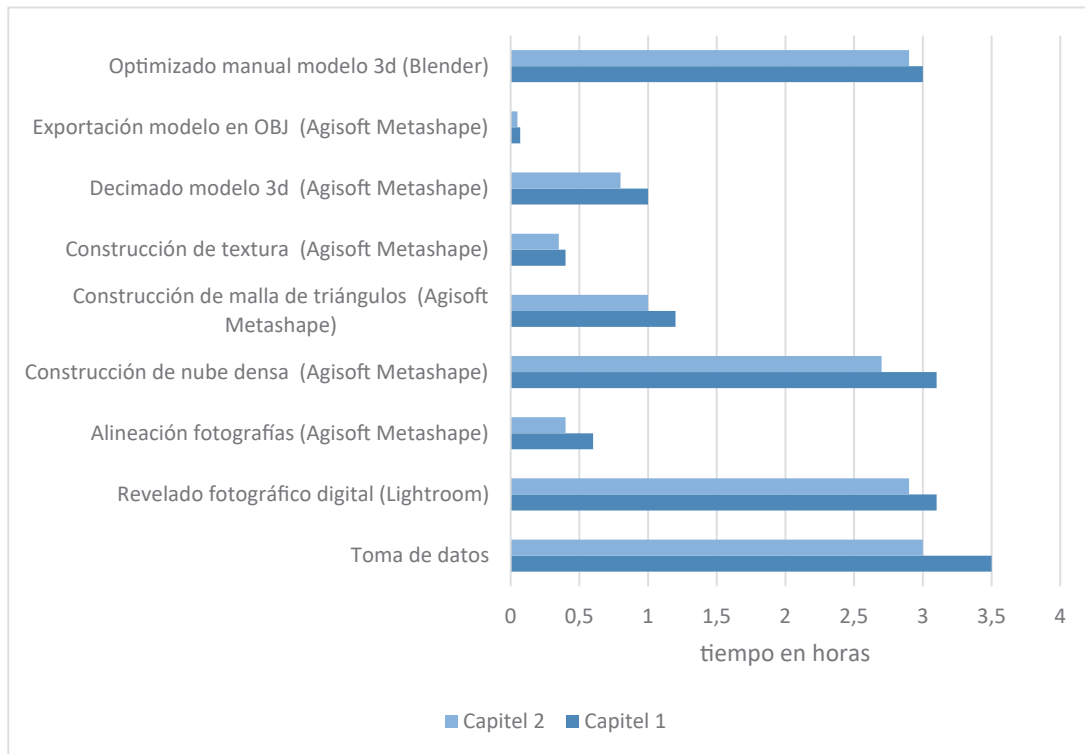


Tabla 29. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia



Figura 201. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde tú dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7SKQ>



Figura 202. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde tú dispositivo móvil. Enlace a modelo 3d: <https://skfb.ly/o7SKU>

CAPITEL SENCILLO CON LA ASCENSIÓN DE CRISTO Y APOSTOLADO



ALZADO LATERAL IZQUIERDO



ALZADO FRONTAL

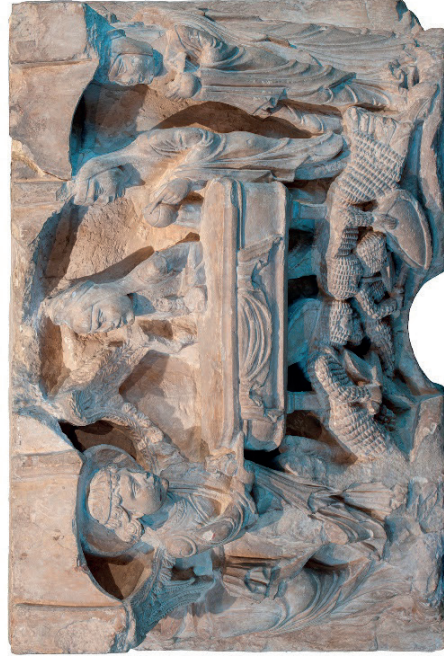


ALZADO LATERAL DERECHO

CAPITEL DOBLE CON LAS MARIÁS ANTE EL SEPULCRO DE CRISTO, APARICIÓN DE CRISTO
A LA MAGDALENA (NOLI ME TANGERE) Y DUDA DE SANTO TOMÁS



ALZADO LATERAL IZQUIERDO



ALZADO FRONTAL



ALZADO LATERAL DERECHO

CASO 4

**DIGITALIZACIÓN 3D PARA DEFINICIÓN DE
PROYECTO EXPOSITIVO**

INTERIOR DE LA CATEDRAL DE CÁDIZ



Trabajo realizado en 2017 en colaboración con el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de la Universidad de Valladolid por encargo de la Fundación de las Edades del Hombre y la diócesis de Cádiz y Ceuta. El trabajo consistió en la realización de la digitalización 3d mediante escáner láser del interior de la catedral de Cádiz. El objetivo de este trabajo de digitalización 3d era generar un modelo tridimensional y documentación planimétrica para que ambas instituciones pudieran diseñar la exposición *Traslatio Sedis* con motivo de la conmemoración del 750 aniversario del traslado de la sede episcopal de Medina Sidonia a Cádiz. El montaje de la exposición fue realizado por la empresa Artisplendore.

1. Antecedentes

La catedral de Cádiz llamada “Santa Cruz sobre el mar” o “Santa Cruz sobre las aguas”, también es conocida como la Catedral Nueva, en contraste a la catedral vieja, edificada en el s. XVI sobre la antigua catedral gótica mandada construir por Alfonso X El Sabio. Es la sede episcopal de la diócesis de Cádiz y Ceuta. Es un edificio de estilo barroco y neoclásico. Se empezó a construir en el año 1722 y tardó 116 años en finalizarse su construcción (1838).

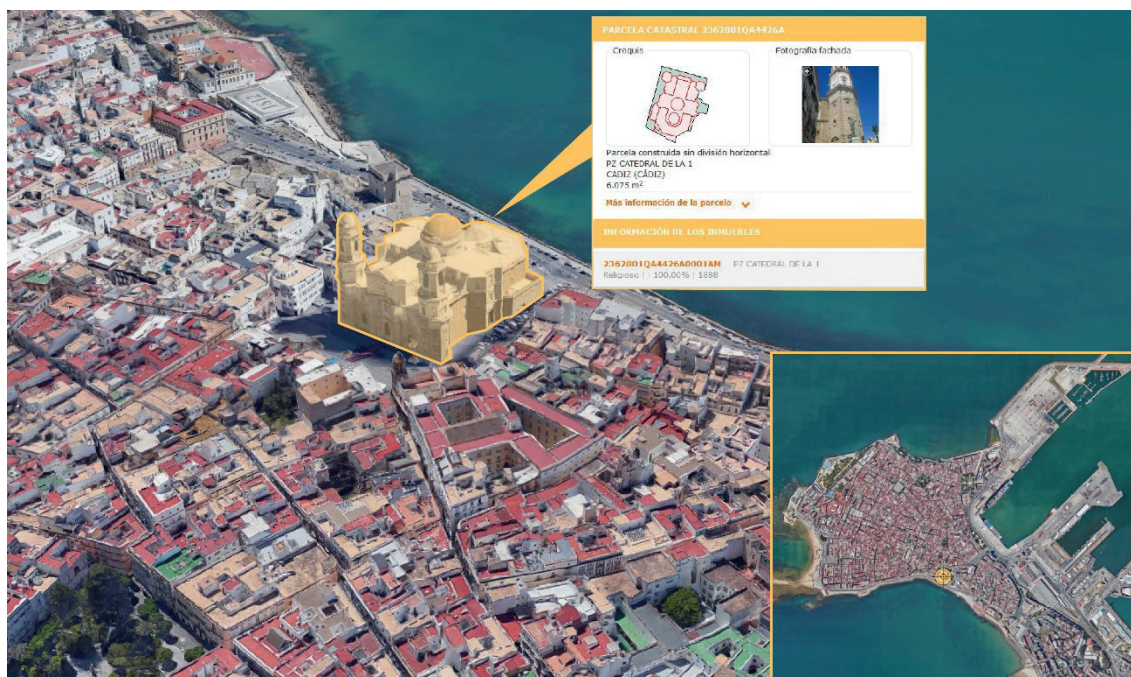


Figura 203. Fotografía aérea con la ubicación de la catedral dentro del núcleo urbano de Cádiz. Fuente: elaboración propia

Se encuentra situada en el centro histórico de Cádiz, casi a la orilla del mar, entre la Plaza de la Catedral, la calle Santísimo Cristo del Perdón y la Avenida Campo del Sur. El edificio es visible desde cualquier punto de la ciudad incluso desde el mar en la dirección de entrada de los barcos al puerto de Cádiz.

Vicente Acero fue el arquitecto que empezó el proyecto y la obra, pero solo estuvo hasta el año 1739. A partir de ese momento la obra pasó por varias manos, 1739 Gaspar Cayón, 1757 Torcuato Cayón, 1783 Miguel Olivares, 1790 Manuel Machuca y Vargas, hasta que en 1832 Juan Daura supervisó las obras hasta su finalización. Al ser un proyecto que pasó por muchas manos hizo que el edificio en su morfología sufriera los cambios de las modas y su construcción fuera de estilos muy diversos.

La fachada principal tiene tres pórticos con formas cóncavas y convexas y está rematado con un gran arco abocinado con frontón triangular. La portada está flanqueada a ambos lados por dos grandes torres de 57 metros de altura de planta octogonal con tres cuerpos. Los materiales empleados son diversos, por eso el doble color de la fachada, la parte inferior está construida con mármol y la parte superior con piedra caliza.



Figura 204. Fotografías del exterior de la catedral de Cádiz. Fuente: elaboración propia

El templo es de planta de cruz latina de tres naves, rematadas en la cabecera con una gran girola de forma pentagonal. El crucero está rematado por una cúpula apoyada sobre pechinas. Las naves están limitadas por grandes columnas de orden corintio elevadas sobre plintos². La cubierta en la mayor parte del edificio se soluciona con bóvedas vaídas, mostrando en muchas de ellas decoración escultórica en bajorrelieve.

² Moldura de base cuadrada, semejante al ábaco, que se halla bajo la basa de la columna o de la pilastra, sobre el pedestal. Cuando el pedestal es corrido se le llama estilóbato.

El altar mayor está formado por un gran templete exento de estilo neoclásico dedicado a la Inmaculada Concepción. Todo el perímetro del templo está rodeado de capillas dedicadas a varios santos.



Figura 205. Fotografías del interior de la catedral de Cádiz. Fuente: elaboración propia

A los pies del templo y ocupando la parte final de la nave central se encuentra el coro que contiene una gran sillería de madera y dos órganos.

Bajo el altar mayor se encuentra la cripta, de planta circular de la que surgen seis espacios o capillas, está situada bajo el nivel de mar. Se accede a ella desde dos escaleras situadas a ambos lados de la capilla mayor desde las naves laterales. En ella se encuentran enterrados Manuel de Falla o José María Pemán y muchos de los obispos de la diócesis. Esta cripta destaca por la bóveda plana del espacio central.

2. Planificación previa del trabajo

Previamente al trabajo se realizó una planificación de la metodología a llevar cabo en el proceso de documentación del interior de la catedral y los equipos a utilizar. Como el objetivo era la generación de documentación planimétrica para diseñar un proyecto expositivo, solo era necesario recopilar datos referentes a la geometría por lo que se descartó la captura de información radiométrica o de color.

Partiendo de esta premisa se estableció la necesidad de realizar una única fase de escaneado de todos los espacios interiores para obtener un modelo con precisión milimétrica. Para ello se utilizó el escáner Faro Focus 3D de diferencia de fase y medio alcance.

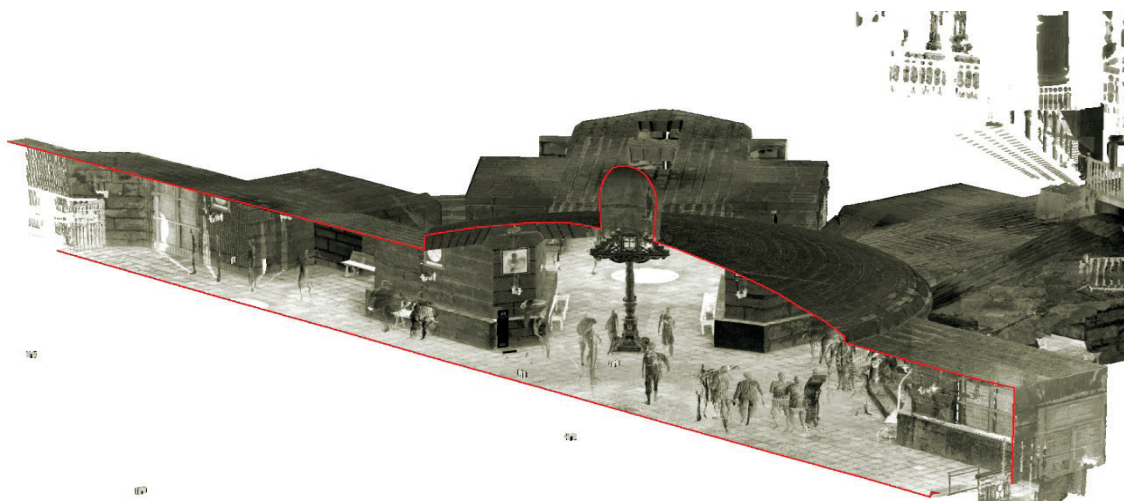


Figura 206. Sección realizada a la nube de puntos por el eje central de la cripta. Fuente: elaboración propia

Además del escaneado al final sí que se realizaría una colección de fotografías generales de detalle, ya que además de la documentación planimétrica bidimensional había que entregar un modelo tridimensional en formato CAD, solo levantado a una altura de 3 metros, para que se pudiera modelar todo el mobiliario del proyecto expositivo.

A continuación, se muestra una tabla con el equipo y programas utilizados en el trabajo:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner láser Faro Focus 3D S 120
	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
Programas	Faro Scene
	Adobe Lightroom
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 30. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

3. Toma de datos

A finales de septiembre de 2017 se realiza la visita la catedral de Cádiz para realizar la toma de datos. Esta toma de datos solo se pudo realizar durante el tiempo en que la catedral estaba abierta al público, por lo que había mucha gente cuando se realizaron los escaneos. Esto implicaría un tiempo mayor en el tratamiento de las nubes de puntos durante el procesado. Se hizo un recorrido previo por el edificio para valorar la posición de los escaneos. Al final, y debido a la gran amplitud de los espacios se optó por colocar el escáner en el eje de las naves laterales y la nave

central consiguiendo capturar la mayor zona posible. También se optó por no colocar referencias artificiales (esferas/dianas) y utilizar las referencias naturales de la geometría propia del edificio. Cuando son trabajos de escaneo en interiores este tipo de referencias funcionan muy bien, ya que es mucha la geometría capturada que ayuda en el proceso de registro.

La configuración de los escaneos se realizó marcando los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Indoor 10 m...
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º
	Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	2x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:02:51
Tamaño de escaneo	10246 x 4268
Millones de puntos del escaneo	44,6
Resolución mm/10 m	6.136
Color escaneado	No

Tabla 31. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia

En total se realizaron 29 escaneos, 19 en la catedral (4 en la nave del evangelio, 3 en la nave central, 5 en la nave de la epístola, 5 en la girola y 2 en la sacristía) y 10 en la cripta.



Figura 207. Distribución de los escaneos realizados en el interior de la cripta. Fuente: elaboración propia



Figura 208. Distribución de los escaneos realizados en el interior de la catedral. Fuente: elaboración propia

4. Procesado de los datos

Para el registro de los escaneos se utilizó el programa Faro Scene, creando un proyecto en el que se importaron todos los escaneos separándolos en dos clúster, uno para los escaneos de la catedral y otro clúster para los escaneos de la cripta.

Al previsualizar los escaneos se pudo comprobar que había surgido un imprevisto no detectado durante la toma de datos. A partir de la cornisa interior, en la vista plana de los escaneos, se visualizaba un efecto extraño de una especie de distorsión o efecto moiré.

Debido al tiempo que se tardó en construir la catedral, muchas partes del templo quedaron expuestas a las inclemencias del tiempo. Esa circunstancia sumada a la situación del edificio junto al mar, han provocado una enfermedad en la piedra que hace que esta se vaya desmoronando poco a poco. Por este motivo las bóvedas del templo están cubiertas por redes colocadas a la altura de la cornisa interior que evitan que los cascotes caigan al suelo.



Figura 209. En las vistas planas de los escaneos se visualiza un efecto extraño a partir de la línea de cornisa interior. El problema fue debido a que a partir de ese punto había colocadas varias mallas, una de ellas de fibra de vidrio

A simple vista parecía que había dos redes de cable propileno con diferentes tamaños de paso de malla para evitar la caída de cascotes, pero en realidad había una tercera más densa que no se veía. Esa malla estaba realizada en fibra de vidrio, y provocó que el láser no realizara bien la medición reflejando a partir de esa cota datos erróneos que no se correspondían con la geometría de esa zona.

Este motivo hizo que los datos a partir de ese punto hubiera que descartarlos. Al final no fue un problema para el objetivo del trabajo, ya que solo interesaban los datos hasta una altura de 3 metros desde el suelo. El inconveniente es que la nube de puntos, que quedó como registro del estado actual de la catedral en ese momento, está incompleto ya que no capturó ninguna información de la zona de las bóvedas.

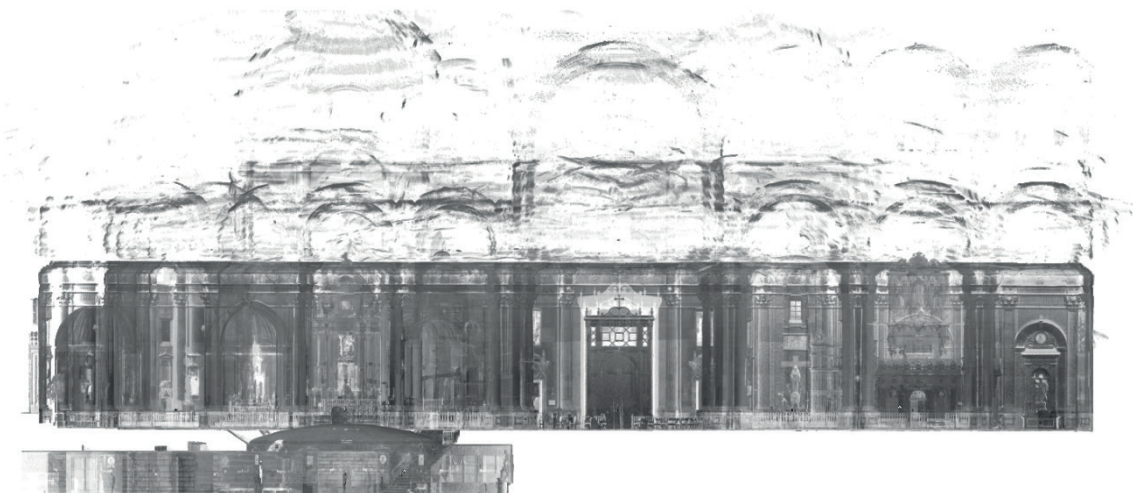


Figura 210. En esta imagen de la nube de puntos se puede observar que los datos capturados a partir de la línea de cornisa, no son correctos. No tiene la densidad que el resto y se ven errores. Fuente: elaboración propia

Antes de realizar el registro se aplicaron los filtros *Stray* para eliminar los puntos extraviados, el filtro de distancia para eliminar todos los puntos capturados a más de 35 m desde el escáner y el filtro de puntos oscuros para eliminar los puntos con demasiado ruido. Además, y de forma

manual, se eliminaron todos los puntos por encima de la cornisa.

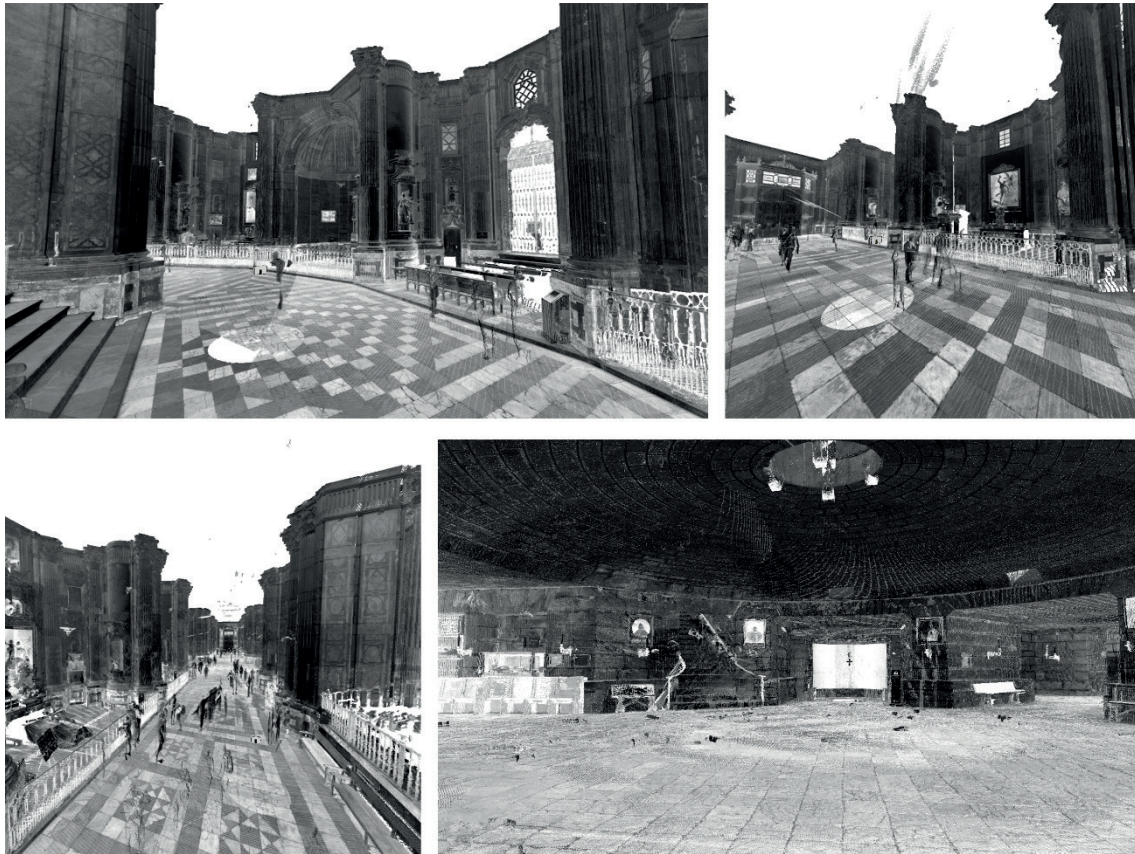


Figura 211. Vistas generadas a partir de la nube de puntos. Fuente: elaboración propia

Una vez realizado este proceso se procedió al alineamiento de las nubes de puntos mediante el cálculo automático de referencias entre ellos. El primer registro realizado fue el basado en vista superior, en el que se hace una colocación rápida de los escaneos. Los parámetros utilizados fueron una distancia de 0.040 m para el submuestreo de puntos y un valor de un 60 para la fiabilidad.

La alineación fue favorable a falta de realizar un ajuste fino. El siguiente paso fue aplicar un registro basado en *Cloud to Cloud* en el que se utilizan todos los puntos para ajustar el alineamiento. Los parámetros utilizados fueron una distancia de submuestreo de 0.025, un máximo de 150 interacciones y una distancia máxima de búsqueda de 1 m.

Los resultados obtenidos en el registro fueron muy buenos ya que el error medio de distancia del punto de escaneo no superó los 4,5 mm en ninguno de los escaneos.

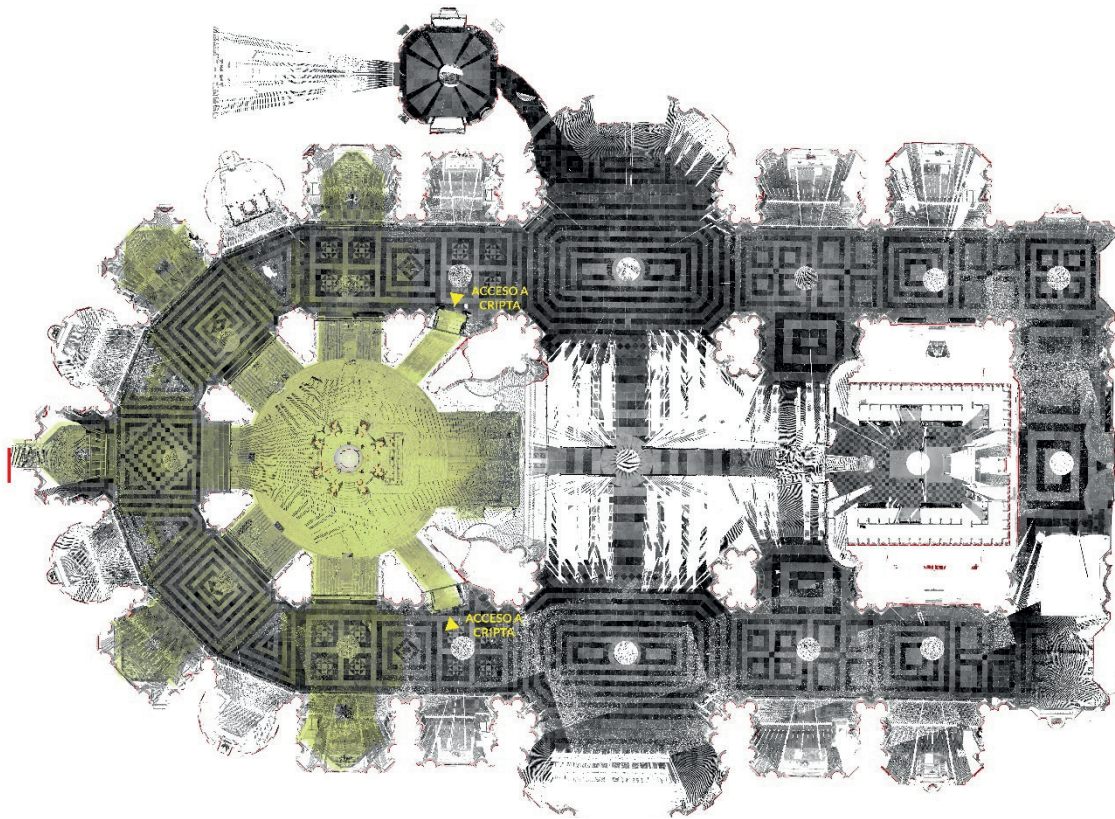


Figura 212. Ortofoto de la planta generada a partir de la nube de puntos, donde aparece superpuesta la planta de la catedral y la planta de la cripta. Fuente: elaboración propia

5. Resultados

El modelo completo de nube de puntos tenía zonas con muchísima densidad (zonas próximas a los estacionamientos), y estaba compuesto por aproximadamente 1.193,4 millones de puntos. Esta nube fue reprocesada en una única nube de proyecto para que la distribución de puntos fuera homogénea en todo el modelo. El paso de malla se estableció en un punto cada 4 mm. La nube de puntos optimizada tenía un peso de 2,7 Gb y 353.721.268 puntos.

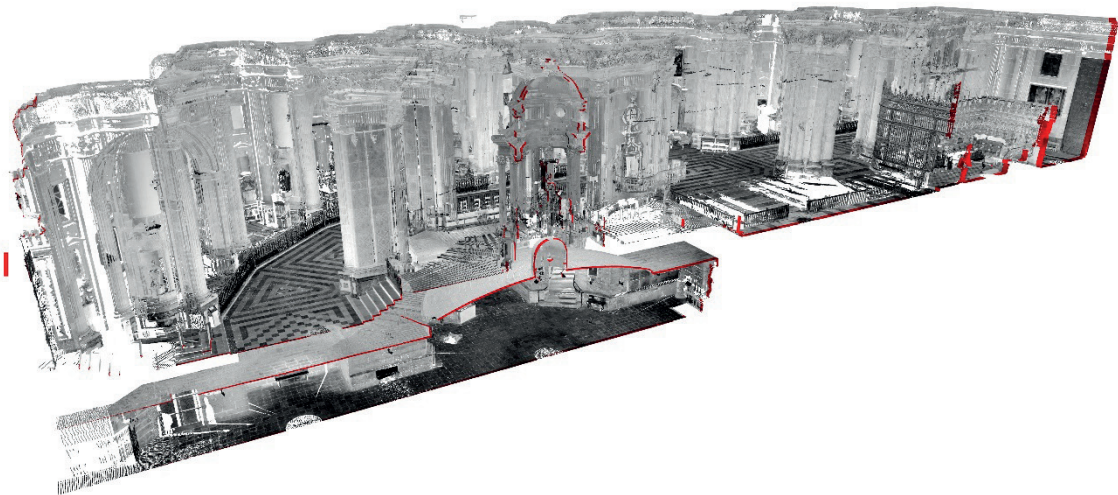


Figura 213. Vista de la sección longitudinal realizada por el eje de la nave central de la catedral. Fuente: elaboración propia

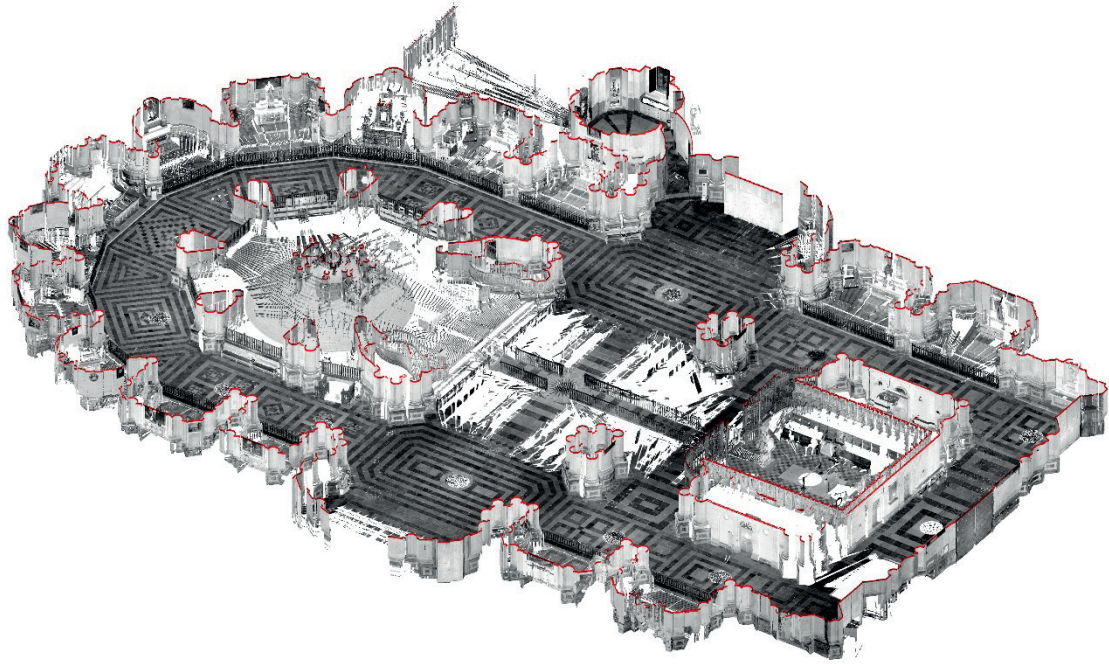


Figura 214. Vista en perspectiva de la distribución en planta de la catedral. Fuente: elaboración propia

A partir de esta nube de puntos se realizó la extracción de la documentación planimétrica.

El modelo de nube de puntos fue exportado en formato E57, para poder visualizar, manipular y realizar consultas en otros programas de manejo de nubes de puntos.

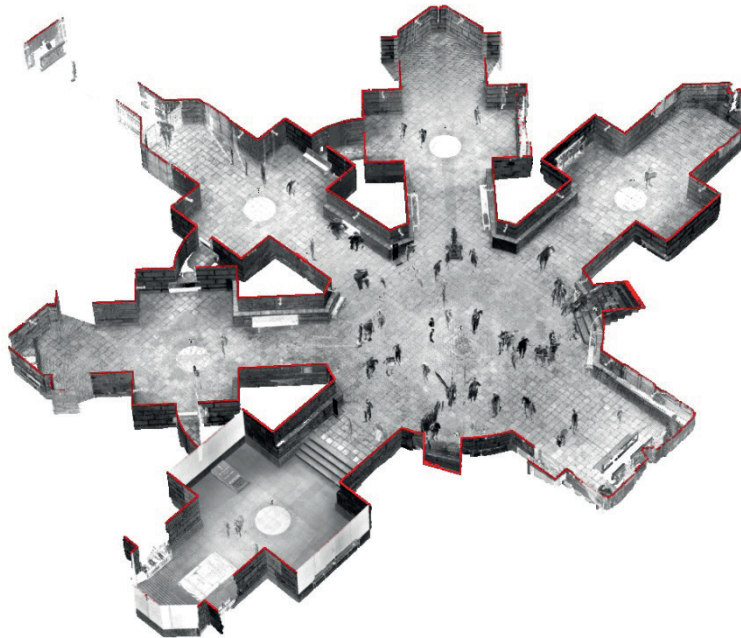


Figura 215. Vista en perspectiva de la distribución en planta de la cripta. Fuente: elaboración propia

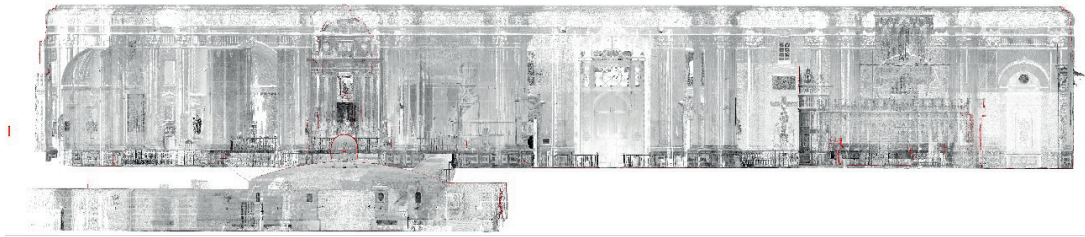


Figura 216. Sección longitudinal por la nave central mirando hacia el Este. Fuente: elaboración propia

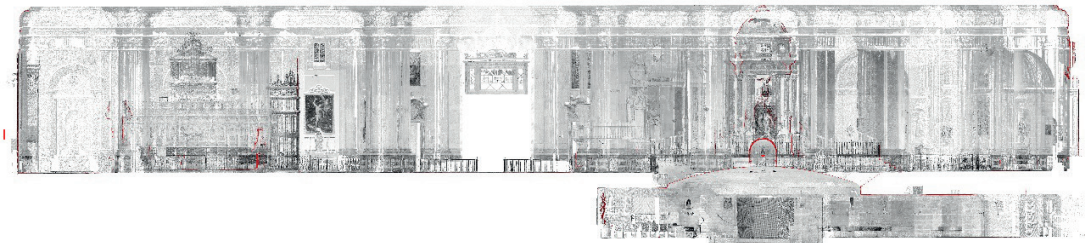


Figura 217. Sección longitudinal por la nave central mirando hacia el Oeste. Fuente: elaboración propia

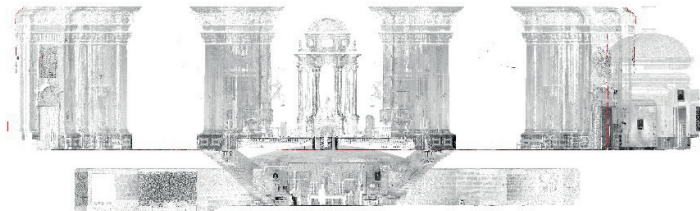


Figura 218. Sección transversal por la capilla mayor mirando hacia el Sur (cabecera). Fuente: elaboración propia

A partir de la documentación planimétrica se generó un modelo de CAD de todo el edificio y levantado con una altura de 3 metros que utilizarían para diseñar y elaborar el proyecto expositivo.

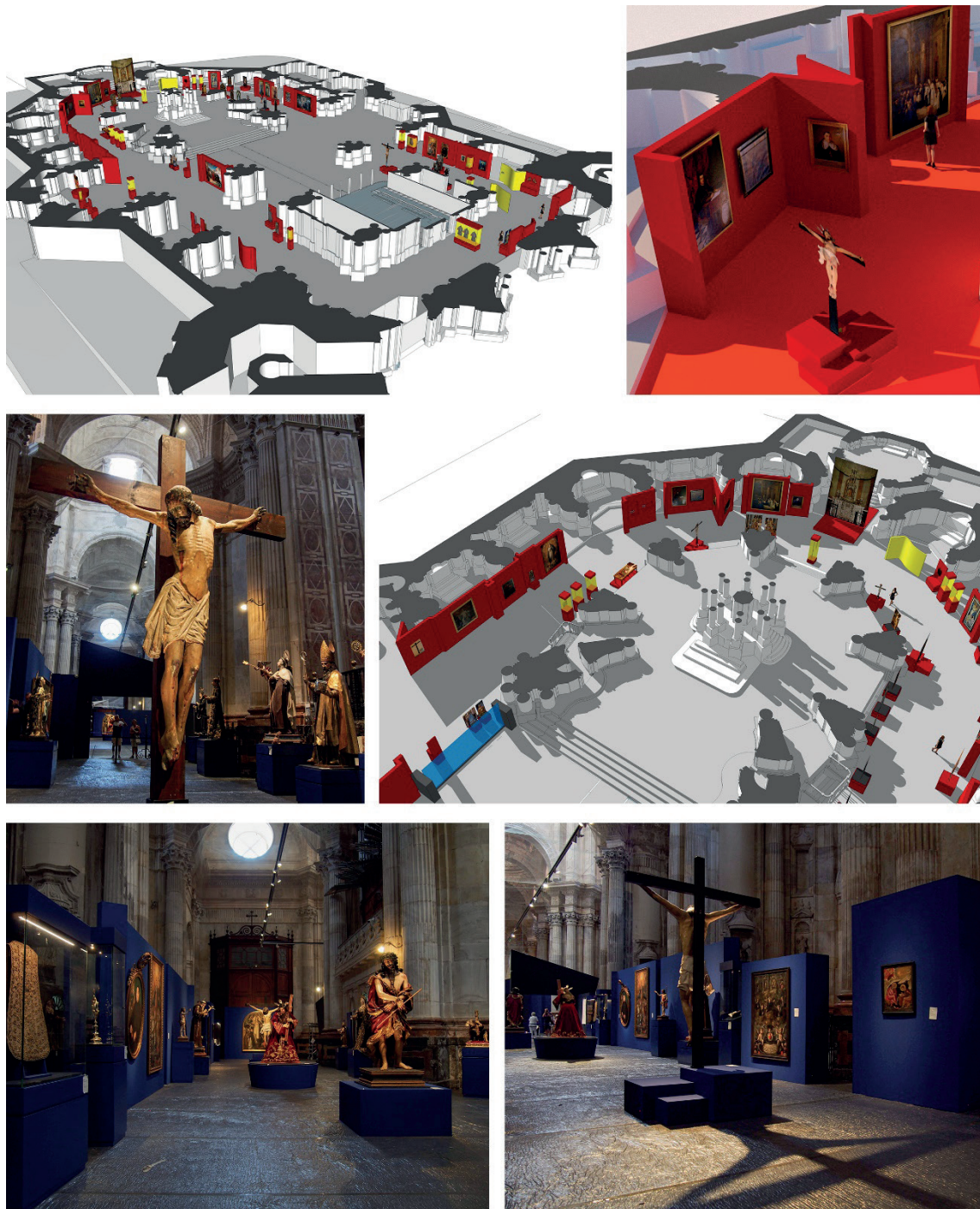


Figura 219. Fotografías del modelo CAD con el proyecto expositivo y fotografías del montaje de la exposición

El proceso seguido se orientó a tener un modelo 3d de la catedral de Cádiz para:

- generar documentación planimétrica y modelo 3d para la realización de proyecto expositivo
- crear un archivo 3d como registro del estado actual de la catedral de Cádiz y como fuente de datos para la consulta de mediciones
- difusión del modelo mediante herramientas web

Para alcanzar este objetivo los pasos realizados fueron:

1. Realización de escaneados en el interior de la catedral de Cádiz y de la cripta con el escáner Faro Focus 3D.
2. Montaje y registro de los escaneos en un único modelo de nube de puntos (importación, filtrado de puntos, coloreado de puntos y alineado de puntos).
3. Exportación de documentación planimétrica.
4. Modelado CAD de la catedral hasta una altura de 3 metros
5. Exportación de nube de puntos de todo el conjunto en formato E57 y LAZ.
6. Realización de colección de fotografías de detalle para usar como referencias en el modelado 3d.
7. Revelado digital de las fotografías para mejorar iluminación y color.
8. Creación de modelo 3d y nube de puntos optimizados para su difusión web.

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

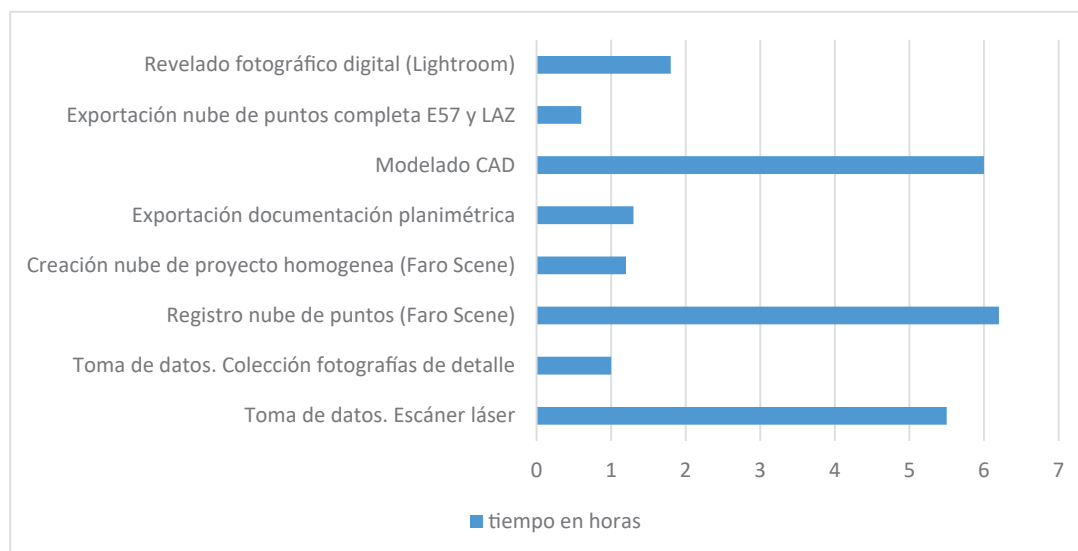


Tabla 32. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

CASO 5

DIGITALIZACIÓN 3D DE UNA RUINA PARA ESTABLECER UNA HIPÓTESIS

**EL CONVENTO DE LOS VALLES EN
TORRESANDINO, BURGOS**



Trabajo de realizado en el año 2015 con mis directores de tesis Jesús Ignacio San José Alonso y José Ignacio Sánchez Rivera. Surgió como propuesta de proyecto de levantamiento por parte de ellos a raíz de una noticia de prensa que informaba del expolio producido en el año 2013 de varios arcos de la nave de la iglesia lo cual había acelerado el estado de ruina del edificio al derrumbarse una parte de la iglesia. Por lo que el objetivo de este trabajo era la documentación de un bien que estaba a punto de desaparecer, y con el escaneado digital se conseguiría crear un modelo 3d del estado actual de ese edificio que se podría consultar para ver cualquier medida o estado de los elementos existentes.

1. Antecedentes

Las ruinas del convento carmelita de Nuestra Señora de los Valles se localizan en el sur de la provincia de Burgos dentro del término de Torresandino y próximo a Villodela. Se levanta en las laderas del valle, al norte del río Esgueva. La aparición de unas fuentes de agua en esa zona fue lo que permitió el asentamiento de población.



Figura 220. Ubicación del convento en relación l núcleo urbano de Torresandino. Fuente: elaboración propia

Fundado en el S. XIII y reedificado en el S. XIV, actualmente se encuentra en ruinas, motivo por el cual ha sido incluido en la Lista Roja de patrimonio en peligro de la asociación para la defensa del patrimonio Hispania Nostra³.

Los primeros documentos que lo mencionan se remontan al año 1302, momento en el que ya hay una comunidad religiosa asentada, cuya fundación debió ser al menos unos años antes. La parte más antigua del edificio es una capilla lateral excavada en la roca, cuyo origen es una cavidad natural, y que pudo ser un asentamiento eremítico a partir de la Reconquista de esta zona, en el siglo X, o incluso antes, siendo el germen de la posterior comunidad religiosa.

3 https://listarojapatrimonio.org/ficha/monasterio_de_nuestra_senora_de_los_valles

Fue reedificado a finales del siglo XIV bajo el patronazgo de Diego de Avellaneda, siendo ocupado por Carmelitas Calzados. Fernando IV El Emplazado, Rey de Castilla y León (1285-1312), concedió privilegios y decretos reales a favor de este convento el año 1302.

La iglesia data del siglo XV, aunque se observan restos de trazas románicas en sus muros. Durante los siglos XV y XVI vive su mayor apogeo económico, con numerosas donaciones de señores de la zona que lo convierten en uno de los monasterios más importantes. La crisis económica y demográfica del siglo XVII les afectó, aunque siguieron contando con el apoyo de algunos señores importantes, y la explotación agrícola de sus tierras siguió en auge. Ya en los siglos XVIII y XIX se recuperan económicamente, siendo el momento en el que se acometen numerosas remodelaciones en las diversas dependencias del Convento y sus propiedades. Llegó a albergar al menos 23 frailes carmelitas, además de criados y otros trabajadores.

En 1810, con la llegada de los franceses, los frailes son expulsados por real decreto de José I. En 1815 retornan al convento, donde permanecerán hasta su abandono definitivo en 1835, con la desamortización de Mendizábal, pasando la edificación a manos privadas desde ese momento. Se utilizó desde ese momento como aprisco para el ganado y como cantera, reutilizando los sillares labrados en otras construcciones de las poblaciones vecinas, lo que ha llevado en gran parte al estado de ruina total en que se encuentra en la actualidad.

En la web de Hispania Nostra hacen esta descripción del edificio indicando las diferentes fechas en las que se fueron ampliando las estancias del convento:

Figura 221. *Fotografía panorámica del Monasterio de Santa María de los Valles y su entorno. Fuente: elaboración propia*



La iglesia de estilo gótico, se construyó en tres fases. Inicialmente constaba de nave principal de planta rectangular, con la torre y coro a sus pies. Después se hizo la puerta en el Sureste y se amplió con nueva nave, para lo cual se abrió un arco en la pared de la nave principal. La puerta fue tapiada entre 1764 y 1766, pasando a ser la pared Oeste de la nueva sacristía y quedando los contrafuertes dentro de la misma.

En el año 1582 se hizo el cuarto del Convento que corre desde la torre a la celda prioral y una cruz de piedra con gradas que estaba en el camino de Torresandino. El puente de piedra que está en medio de Las Encerradas, se hizo en 1649. En junio de 1651 se hizo el refectorio con púlpito. En el año 1655 se hizo la obra de la Capilla del Cristo de los Trabajos, con altar de piedra y cerrada por hermosa reja, ocupando una cueva contigua a la de Ntra. Sra. de los Valles. El año 1720 se hizo una de las bodegas que estaba bajo el refectorio y un sitio para las cubas que luego se cerró al desmoronarse el techo. En abril de 1736 se hicieron las paneras, la hospedería a la puerta de los carros y las caballerizas bajo dicha hospedería. En 1763 se hizo la casa de los pastores en el corral de las ovejas, así como una arqueta en la fuente de la Virgen para desalar los pescados en agua corriente. Entre 1764 y 1766 se hizo la pescadería, donde se lograba la pureza del pescado bien desalado y se conservaba el vino fresco. También se hizo el arco de piedra que sale a la fuente y se entabló la celda prioral. Contiguo a ésta se encontraban las habitaciones de los frailes, en la parte superior del claustro. En la planta inferior se encontraba dicho claustro que comunicaba a través de unas puertas con la huerta, descendiendo unas escaleras de piedra. A lo largo del muro que daba a la huerta, había una especie de pasadizo subterráneo abovedado que recogía las filtraciones de agua, a modo de aljibe, posiblemente como reserva acuífera y para dar riego a la huerta. Entre abril de 1777 y mayo de 1781, se hizo un lagar con viga y piedra pilón; asimismo se arregló la pared



de Poniente, bodega y ventanas, se blanqueó el refectorio, celda prioral y balcón de la misma. Hacia 1792 se reformaron la mayor parte de los tejados y se cubrió la parte de atrás del convento. El 21 de abril de 1801 se hizo el corral de ovejas, puertas nuevas para el convento y para el establo de bueyes. En 1807 se compuso el palomar y se levantó el colmenar, se retejó todo el convento, se hicieron cristales para las ventanas de la celda prioral y vidrios para el refectorio y hospedería. En 1815 se realizaron numerosas reparaciones en la fábrica del Convento.

En muchos casos cuando se consulta documentación bibliográfica relacionada con un edificio, se suele encontrar textos y descripciones de los espacios del edificio, pero raramente documentación planimétrica que defina la geometría y las estancias de forma exacta. Por este motivo es muy importante hacer este tipo de levantamientos arquitectónicos, porque además de aportar archivos 3d con el estado actual de esos edificios, además aporta documentación nueva y exacta de la forma del edificio.

Este proceso de levantamiento consistió en documentar el edificio mediante herramientas de digitalización tridimensional, para obtener un modelo 3d del conjunto. Este modelo nos permitió tener un registro del estado actual del edificio, y además pudimos obtener la documentación planimétrica (planta, alzados y secciones) que definía todos los elementos del monasterio en el momento de realizar dicha documentación.

Otra de las ventajas de estos modelos digitales es su función como herramienta de diagnóstico, ya que al ser modelos de una gran precisión métrica nos permite localizar problemas o deformaciones en el edificio que visualmente en algunos casos son imposibles de detectar.

2. Planificación previa del trabajo

Consistió en realizar una búsqueda de información del monasterio para tener una base sobre la historia del edificio como primer contacto y saber las dimensiones aproximadas del edificio y las estancias que aún estaban en pie.

Esta búsqueda de información permitió saber que la documentación existente era muy escasa, tanto desde el punto de vista de documentos escritos como de documentos gráficos.

Una vez localizada la documentación existente, se procedió a realizar una planificación del trabajo, en la que se decidió las herramientas a utilizar en la toma de datos, los escaneos necesarios para tener un modelo 3d completo y la documentación gráfica que se elaboraría.

El trabajo se dividió en dos fases. La primera de ellas consistiría en el escaneado láser de todo el edificio. Dadas las características del edificio y el tiempo que se tenía para la toma de datos, se optó por utilizar un escáner láser tridimensional de la marca Faro, concretamente el Focus3D. Este aparato tiene la ventaja de ser muy compacto y de peso reducido, lo que facilita su desplazamiento por el edificio durante el proceso de captura de datos, además de ser muy rápido en la captura de información. El escáner tiene la característica de que puede girar 360° sobre su eje,

lo que le permite capturar todos los objetos que están a su alrededor. El escáner capturara datos métricos, con el láser, y datos radiométricos (fotografías para aplicar el color sobre los datos métricos) gracias a la cámara que lleva incorporada en su interior.

La segunda fase consistiría en la realización de una colección de fotografías, en formato RAW, del interior y exterior de la iglesia. Ya que eran los paramentos más importantes y originales del antiguo convento. El resto de construcciones murarias habían sufrido varias intervenciones ya que estaban siendo utilizadas como apriscos para el ganado.

A continuación, se muestra una tabla con el equipo y programas utilizados en el trabajo:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner láser Faro Focus 3D S 120
	Cámara fotográfica Olympus E-PL5
	Objetivo Olympus M.Zuiko ED 7-14 mm F2.8
	Objetivo Olympus M.Zuiko ED 24-42 mm F3.5-5.6
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
Programas	Faro Scene
	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 33. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

3. Toma de datos

La toma de datos se realizó el 8 de mayo de 2015. Lo primero que se hizo fue recorrer el edificio para realizar una inspección visual, del conjunto y su entorno, para valorar la posición idónea de los escaneos y replantear la estrategia del trabajo, ya que en el momento de la visita el estado del edificio era completamente diferente al estimado. En el año 2008 mis tutores habían realizado una visita al edificio, y las diferencias con la actualidad eran muy notables, debido al deterioro producido por el estado de abandono del edificio por falta de mantenimiento, el uso como corral para ganado, los deterioros provocados por la climatología o los diferentes expolios sufridos durante los últimos años.





Figura 222. Fotografías que muestran el estado de ruina del Monasterio de Santa María de los Valles en el momento de realizar la visita en mayo de 2015. Fuente: elaboración propia

Durante la inspección visual se fueron realizando fotografías de detalle y tomando notas o realizando croquis⁴ de determinados elementos.



Figura 223. Fotografía y croquis del proceso de inspección visual previa al trabajo. Fuente: Jesús I. San José

La toma de datos se dividió en dos partes: por un lado, la documentación mediante el uso del escáner láser tridimensional tanto del interior y exterior de la iglesia y estancias anexas, como de todo el entorno del monasterio; y por otro lado con fotogrametría, usando fotografías digitales del interior y exterior de la iglesia. Ambos métodos permiten obtener un modelo tridimensional con gran precisión métrica. La diferencia entre uno y otro radica en la calidad radiométrica, siendo la obtenida mediante el proceso de fotogrametría mucho mejor que el conseguido con el escáner láser. La buena calidad radiométrica nos va a permitir visualizar mucho mejor los cambios de textura en la piedra producidos por diferentes patologías, como por ejemplo los cambios de tonalidad derivados por humedades o aparición de hongos.

⁴ Dibujo realizado sin elementos de medición, pero bien proporcionados que muestra detalles o notas importantes tomados in situ



Figura 224. Fotografía del escáner durante el proceso de captura de datos. Fuente: elaboración propia

El proceso de documentación con el escáner láser se fundamenta en su colocación en diferentes puntos estratégicos, consiguiendo cubrir todos los espacios que definen la geometría del edificio creando un modelo lo más completo posible.

Estos posicionamientos del escáner tienen que estar bien planteados, para que en el momento del procesado de los datos el alineamiento entre las diferentes nubes se pueda realizar sin ningún problema. La condición fundamental es que, para poder unir dos escaneos entre sí, tienen que existir zonas comunes que faciliten el proceso de unión. Otra opción para realizar estas uniones es utilizar objetos externos al edificio llamados 'targets', estos pueden ser marcadores en forma de diana o esferas de radio conocido.

La posición idónea del escáner, se determinó con la inspección visual realizada al edificio. Por ejemplo, en la iglesia se posicionó el escáner coincidiendo aproximadamente con los centros de las bóvedas, siempre y cuando el estado del terreno lo permitiera, ya que, debido al hundimiento de varios arcos de la nave central, provocados por el expolio llevado a cabo en el año 2013 de los sillares más grandes de la zona inferior de varias columnas, hizo que la estructura colapsara inundando toda la zona de piedras. Éstas dificultaron el movimiento con seguridad por el interior del templo.

En cada posición de escaneo, se coloca el escáner láser y este procede a realizar la captura de todos los objetos que se encuentran alrededor del mismo, ya que se trata de un aparato de medición esférica capaz de medir todo lo que hay en torno a él dentro de una esfera de 120 metros de radio. En esta esfera virtual, el escáner es capaz de tomar datos en 300° respecto al eje de giro horizontal y 360° en el eje de giro vertical.

Para el proceso de captura de datos con el escáner láser entre el exterior y el interior, y para conseguir una cobertura completa del edificio de aproximadamente el 92%, se realizaron un total de 22 escaneos con una media de 30 millones de puntos cada uno. El modelo completo del monasterio tenía aproximadamente 768 millones de puntos, cada uno de ellos con sus coordenadas de posición XYZ y de color RGB. El tiempo aproximado por cada escaneo fue de unos 9-11 minutos.

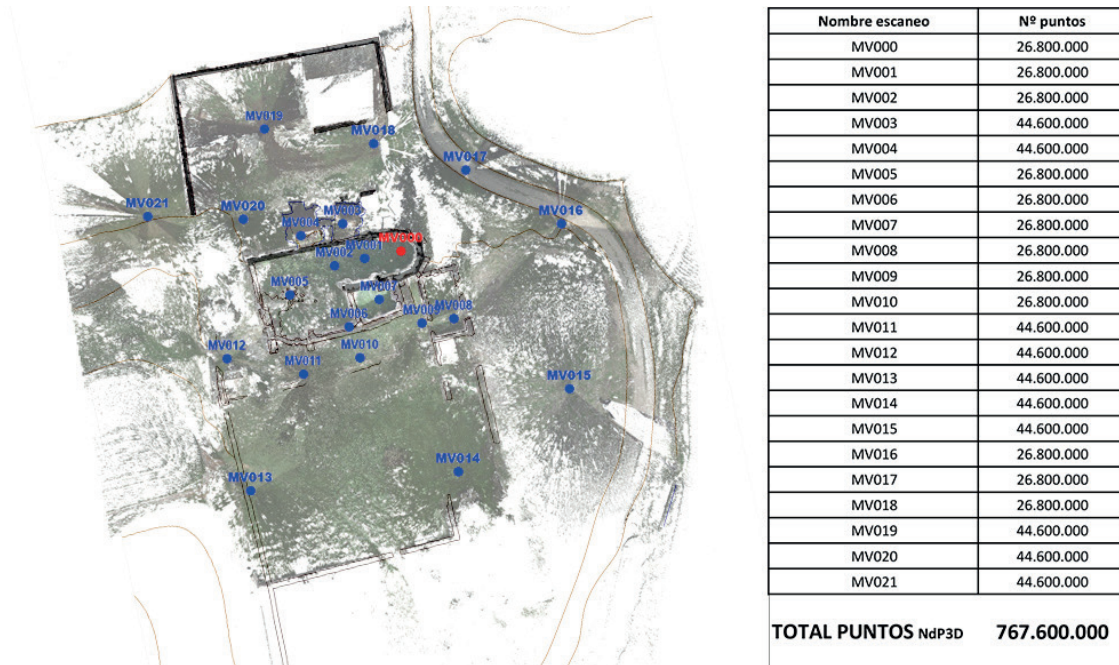


Figura 225. Planta del monasterio con la posición de los escaneos y tabla con los datos de los números de puntos de cada uno de ellos. Fuente: elaboración propia

La configuración de los escaneos realizados tenía los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Outdoor 20 m ...
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º
	Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	3x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:10:28
Tamaño de escaneo	10240 x 5120
Millones de puntos del escaneo	43,4
Resolución mm/10 m	6.136
Color escaneado	SI

Tabla 34. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia

Además, se realizaron varias colecciones de fotografías para la generación de modelos a partir de fotogrametría digital para obtener fotoalzados de los paramentos interiores y exteriores de la iglesia. Se realizaron un total de 215 fotografías. Las fotografías fueron realizadas en formato RAW para poder realizar el revelado digital y poder mejorar las fotografías en caso de ser necesario.

La configuración de las fotografías fue la siguiente:

CONFIGURACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA	
Dimensiones fotografías	3456 x 4608 píxeles
Modelo de cámara	Olympus E-PL5
Distancia focal	14 mm
Velocidad ISO	ISO-200
Apertura focal	f/10
Tiempo de exposición	1/250

Tabla 35. *Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia*

4. Procesado de datos

El procesado de datos se realizó en dos etapas. La primera estaba relacionada con el registro de los datos de escaneo con el software Faro Scene y la segunda con la generación de la fotogrametría mediante el software Agisoft Metashape.

En la toma de datos no se utilizaron referencias artificiales (esferas o dianas) ya que la morfología de los muros permitía detectar fácilmente puntos característicos para utilizarlos como referencias naturales para la unión entre escaneos.

En el software Faro Scene se creó un proyecto en el que se importaron todos los escaneos. Estos se organizaron en varios clúster (carpetas de escaneo). Por un lado, los escaneos del interior de la iglesia, y por otro los escaneos del exterior de la iglesia.



Figura 226. *Modelo completo de nube de puntos como resultado del registro de todos los escaneos. Fuente: elaboración propia*

Antes de realizar el registro se aplicaron los filtros *Stray* para eliminar puntos extraviados, el filtro de distancia para eliminar todos los puntos capturados a más de 45 m desde las posiciones del escáner y el filtro de puntos oscuros para eliminar los puntos con demasiado ruido. A mayores se realizó el coloreado automático de los escaneos a partir de las fotografías capturadas por el escáner láser durante el proceso de la toma de datos.

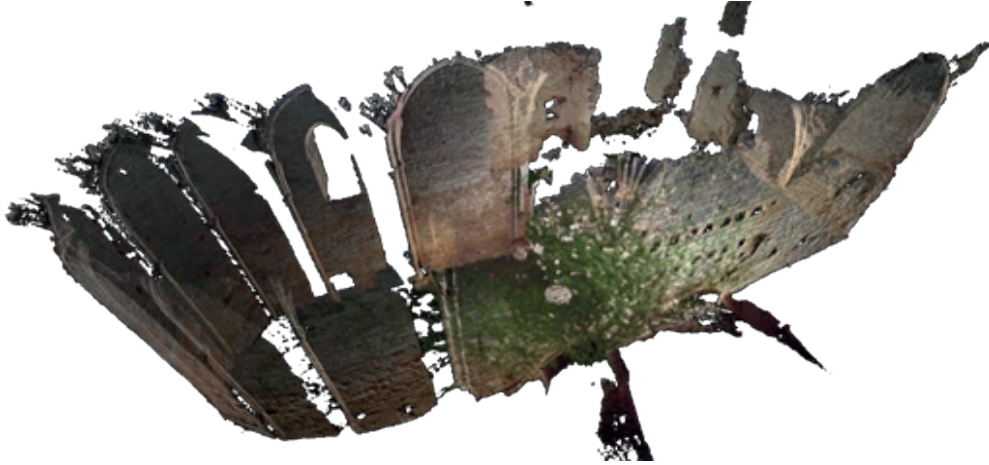


Figura 227. Nube de puntos coloreada con la imagen esférica capturada por la cámara interna del escáner

A continuación, se procedió al registro de las nubes de puntos mediante el cálculo automático de referencias entre ellos. El primer registro realizado fue el basado en vista superior. Los parámetros utilizados fueron una distancia de 0,045 m para el submuestreo y un valor de 65 para la fiabilidad.

La alineación fue favorable, consiguiendo alinear todos los escaneos a falta de realizar un ajuste fino. El siguiente paso fue aplicar un registro de puntos basado en *Cloud to Cloud* en el que se utilizan todos los puntos para ajustar el alineamiento. Los parámetros utilizados fueron una distancia de submuestreo de 0,090 (se recomiendan valores altos cuando se trata de escaneos de exteriores), un máximo de 300 interacciones y una distancia máxima de búsqueda de 1 m.

Los resultados en el registro fueron favorables, ya que el error medio de distancia de escaneo no superó los 6 mm de error. Este valor podría haber sido más bajo, pero al existir vegetación, en las zonas de suelo, no fue posible bajarlo más. La nube completa con todos los escaneos tenía una densidad de 767,6 millones de puntos.

Debido al tamaño y densidad de la nube de puntos, se realizó una optimización de la nube homogeneizando el paso de malla a 1 punto cada 5 mm, consiguiendo así tener una nube de 173.612.386 puntos, más manejable para poder trabajar con ella.

En Agisoft Metashape se realizó un modelo fotogramétrico con las fotografías terrestres. Estas se cargaron dentro del programa en dos bloques diferentes, interior y exterior. Cada uno de estos bloques se alinearon, calcularon las nubes de paso, se filtraron puntos para eliminar los de mayor error y se introdujeron marcadores o referencias externas. Con estos datos ya se pudo realizar un alineamiento de los dos bloques para unificarlo todo en uno solo.

A partir de aquí se calculó la nube densa, el mallado de triángulos y el texturizado. El modelo a color de las ruinas de la iglesia obtenido por fotogrametría tenía un total de 4.001.860 caras.

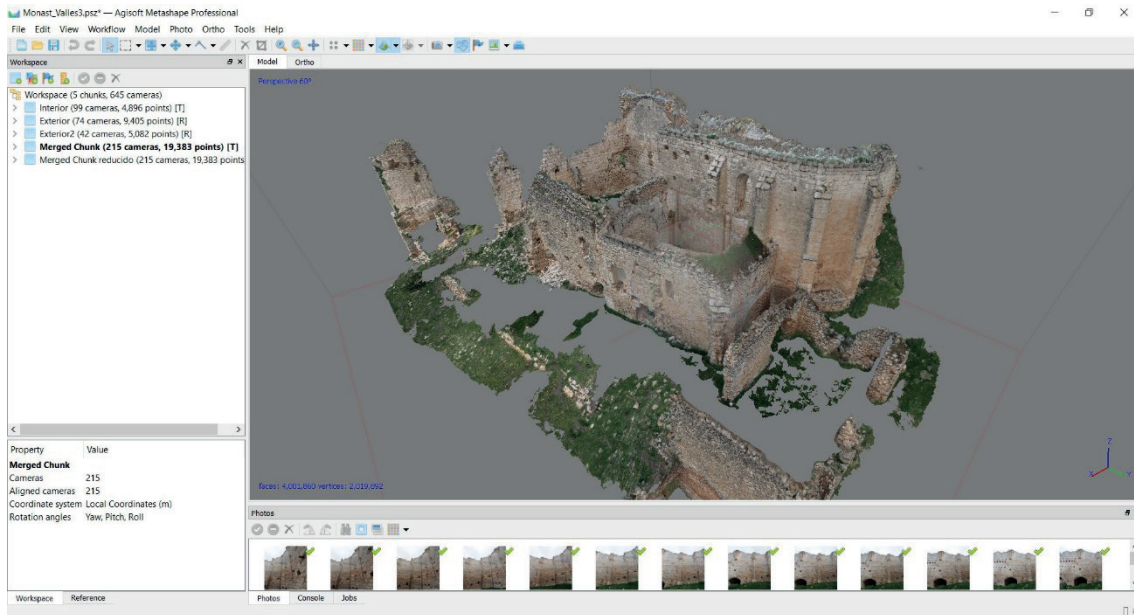


Figura 228. Modelo obtenido mediante la fotogrametría. Fuente_ elaboración propia

5. Resultados

El modelo de nube de puntos fue exportado en formato E57, para poderlo visualizar, manipular y realizar consultas en otros programas de manejo de nubes de puntos. Desde la nube de puntos se generó una nueva documentación planimétrica que hasta ese momento no existía. Esta documentación sirvió para plasmar con gran precisión el estado actual de todo el edificio. Este modelo virtual va a facilitar el poder estudiar milimétricamente el edificio ya que podemos crear perfiles en cualquiera de los planos de corte: el plano vertical eje X (secciones longitudinales), el plano vertical eje Y (secciones transversales) o el plano horizontal eje Z (plantas).

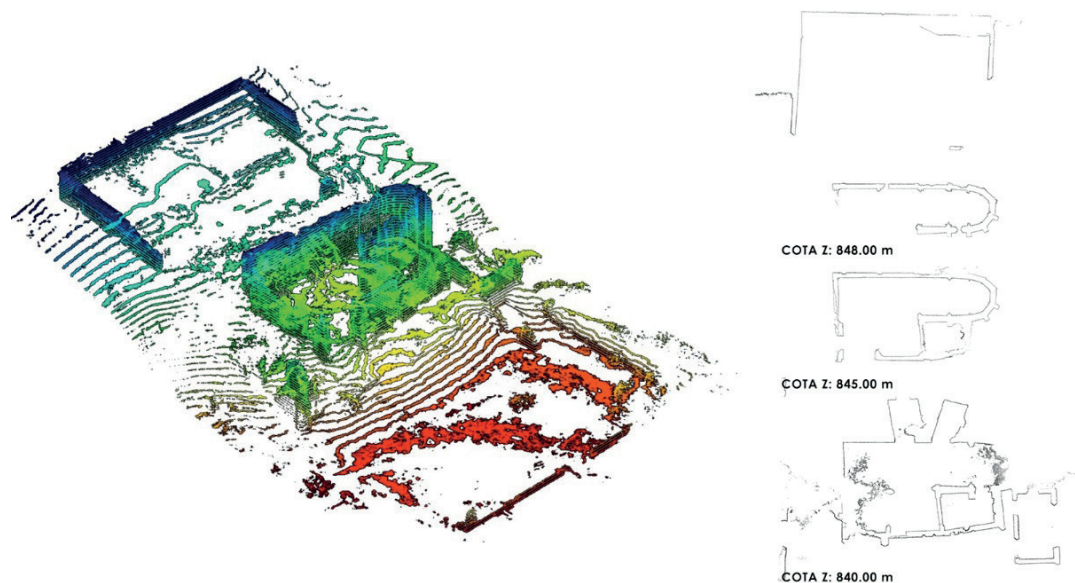


Figura 229. Conjunto de perfiles generados a partir de la nube de puntos en el eje Z cada 50 cm. (dcha) Plantas del monasterio, a diferentes cotas, extraídas de los perfiles generados a lo largo del eje Z. Fuente: elaboración propia

Todo este proceso de extracción de perfiles para la generación de documentación planimétrica, a partir del modelo digital, se realizó con el programa UvaCAD® creado por el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de la Universidad de Valladolid.

Del modelo obtenido por fotogrametría se realizaron ortofotos de todos los paramentos de la iglesia que facilitaron el poder realizar una lectura y analizar las patologías.



Figura 230. Alzado norte del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia



Figura 231. Alzado sur del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia



Figura 232. Alzado este (altar) y alzado oeste (coro) del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia



Figura 233. Alzado sur del exterior del conjunto monástico. Fuente: elaboración propia

Se generaron alzados del interior del templo y alzados exteriores del conjunto monástico, todos ellos con una precisión equivalente a unos 3 mm por píxel. Esto quiere decir, que los alzados se podían reproducir en papel en formato grande sin perder resolución.



Figura 234. El nivel de detalle de los alzados generados permite detectar cualquier desperfecto o patología que exista sobre la superficie. Fuente: elaboración propia

Este modelo digital también nos va a funcionar como herramienta de diagnóstico, al igual que ocurre con una radiografía en la medicina, ya que estos perfiles nos van a facilitar determinar las deformaciones que existen en los diferentes elementos y en qué puntos se producen.

Gracias a esto se puede determinar el desplome exacto que están sufriendo por ejemplo los muros norte y sur de la iglesia.

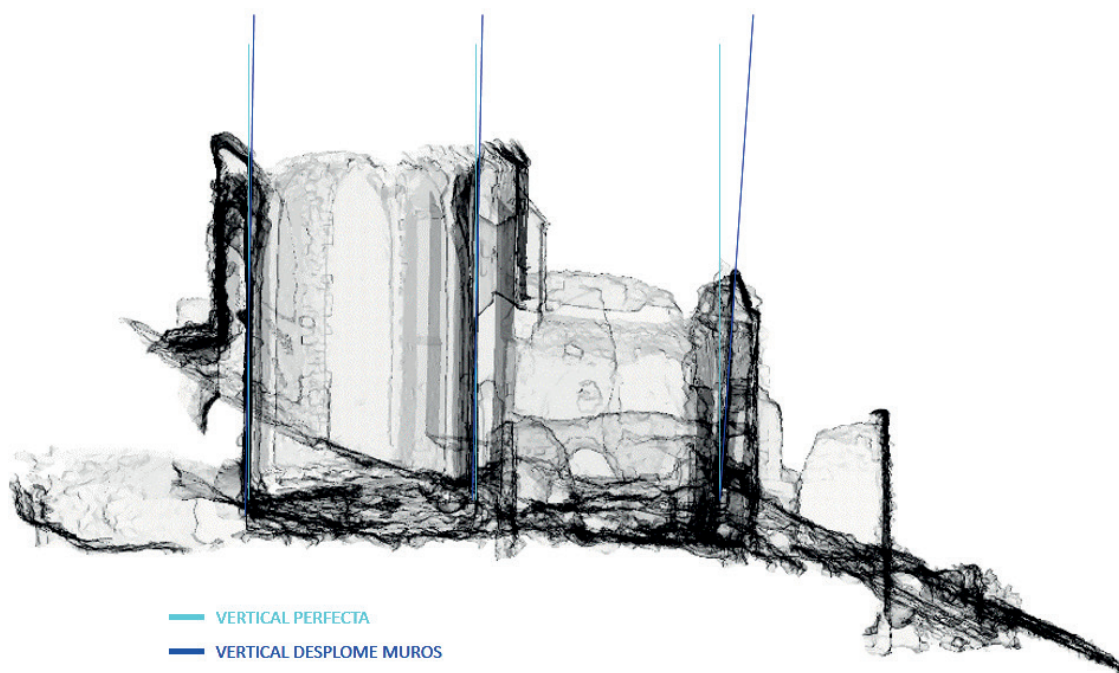


Figura 235. Diagnóstico de los desplomes que sufren los muros norte y sur de la iglesia. Fuente: elaboración propia

El modelo obtenido nos permitió analizar cada una de las partes del convento para entender el funcionamiento; establecer diagnósticos del estado de cada uno de los paramentos que aún quedaban en pie, así como las deformaciones de las pequeñas capillas-cueva excavadas en la piedra caliza; y plantear una hipótesis de la composición formal que tuvo el monasterio en su época de esplendor. La hipótesis fue modelada con herramientas CAD a partir de la información obtenida con el trabajo de levantamiento.

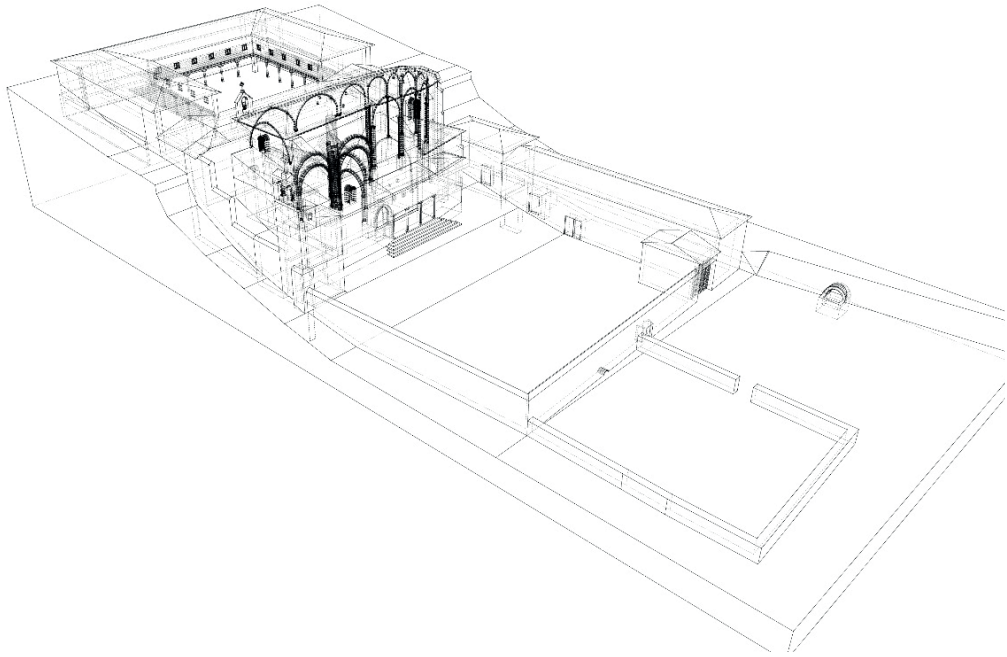


Figura 236. Modelo CAD creado con la hipótesis del estado original del convento. Fuente: elaboración propia

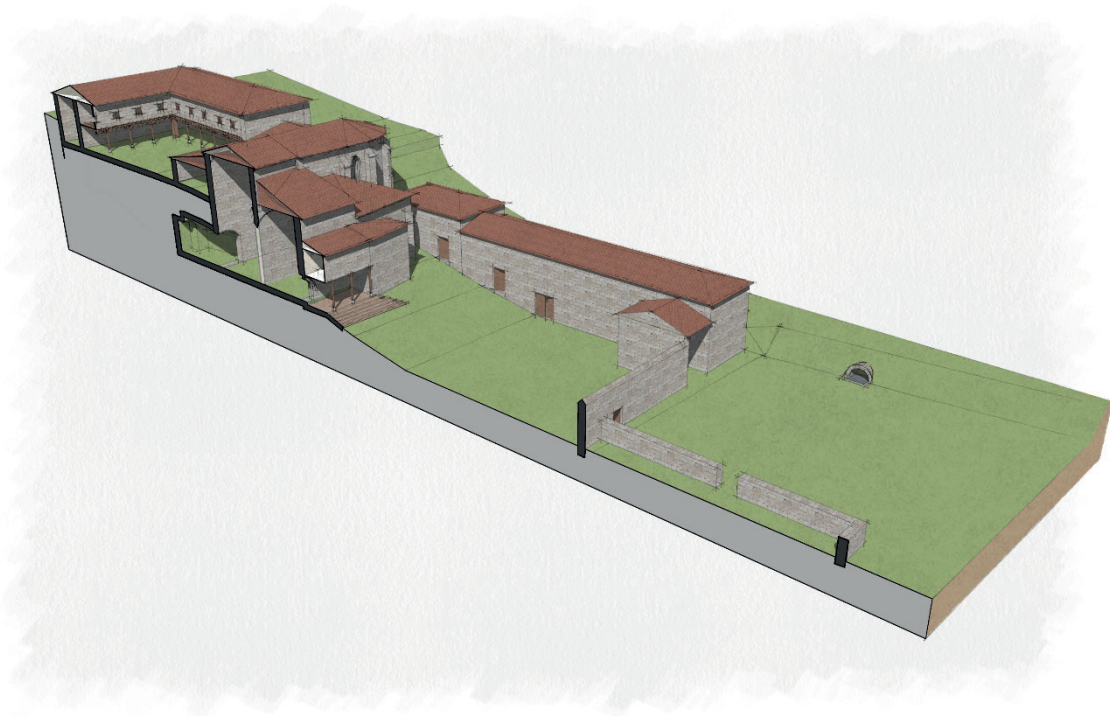


Figura 237. Sección realizada al modelo de la hipótesis. Fuente: elaboración propia

Con el modelo CAD de la hipótesis de cómo fue el convento en sus orígenes, se trató de realizar una experiencia para realidad virtual. Para ello se utilizó el programa Twinmotion. Este es un programa de visualización realista en tiempo real, que nos permitió importar el modelo y aplicarle efectos de luz, materiales, objetos de vegetación, etc. Con todo este escenario virtual diseñado y mediante la conexión de unas gafas de visión de realidad virtual, se puede navegar libremente por el modelo e incluso manipular acciones en tiempo real como la iluminación o las estaciones.

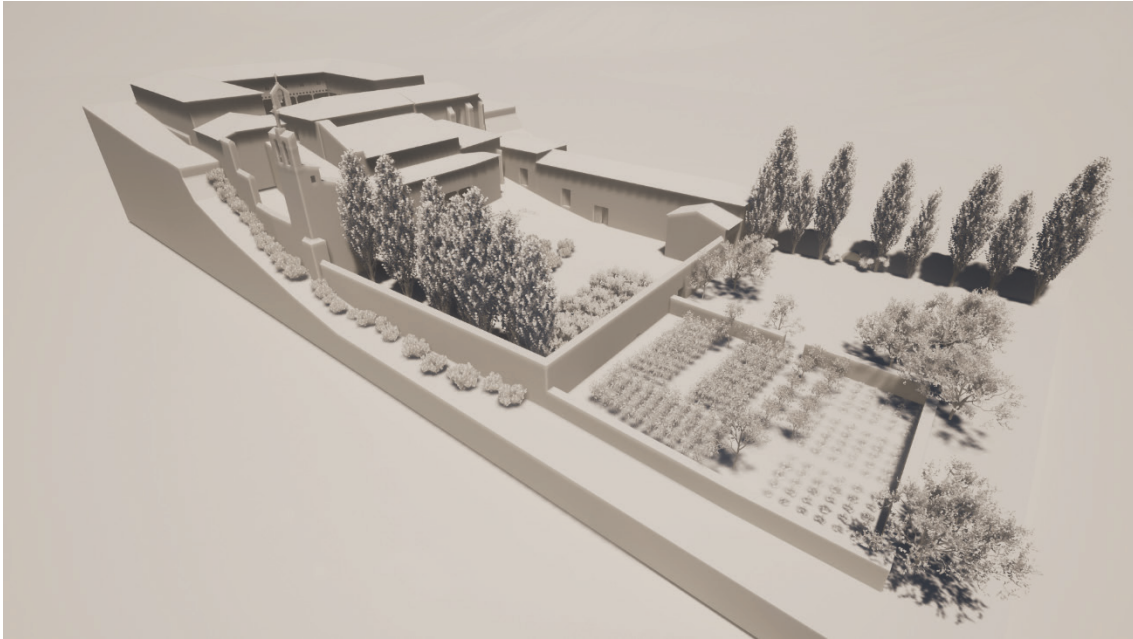


Figura 238. *Vistas del modelo de la hipótesis con incorporación de objetos de vegetación e iluminación*

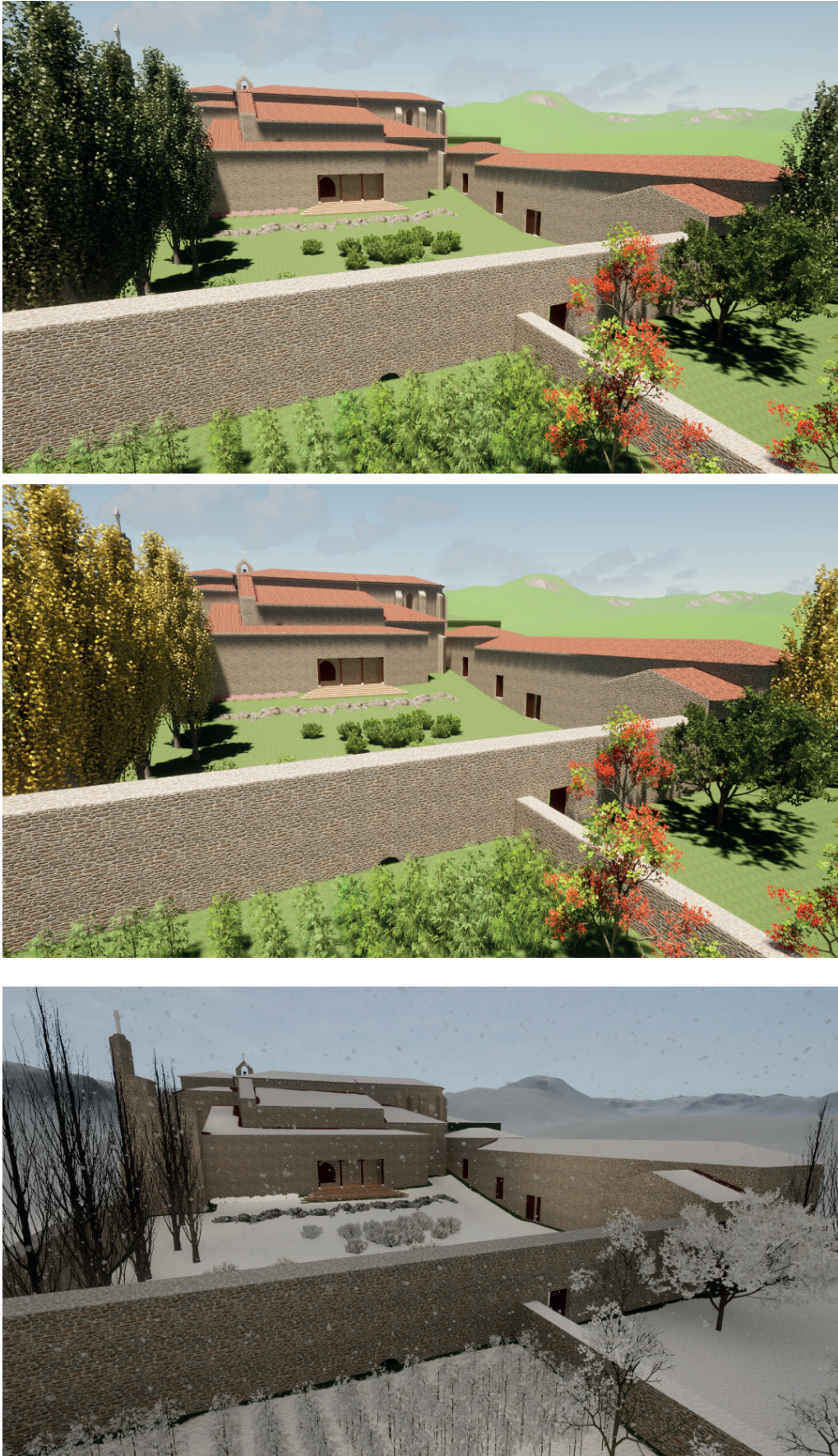


Figura 239. Simulación de modificación de las estaciones desde el programa Twinmotion

El proceso seguido se enfocó para tener un modelo del convento para:

- generar documentación planimétrica para su posterior estudio y análisis
- crear un archivo 3d como registro del estado actual y como fuente de datos para la consulta de mediciones
- establecer una hipótesis de cómo fue originariamente el convento
- difusión del modelo mediante herramientas web

Para alcanzar este objetivo los pasos realizados fueron:

1. Realización de escaneados del exterior e interior de la iglesia con el escáner láser Faro Focus 3D.
2. Montaje y registro de los escaneos en un único modelo de nube de puntos (importación, filtrado de puntos, coloreado de puntos y alineado de puntos).
3. Exportación de documentación planimétrica.
4. Exportación de nube de puntos de todo el conjunto en formato E57 y LAZ.
5. Realización de colección de fotografías terrestres para la generación de un modelo 3d mediante fotogrametría digital.
6. Revelado digital de las fotografías para mejorar iluminación y color.
7. Procesado de fotografías en Agisoft Metashape (alineación, creación de nube de puntos densa, creación de malla y texturizado).
8. Creación y exportación de ortofotos de los paramentos de la iglesia
9. Exportación del modelo 3d en formato OBJ
10. Creación de modelo 3d y nube de puntos optimizados para su difusión web.
11. Creación de un modelo 3d CAD de la hipótesis del convento original
12. Preparación y visualización del modelo con herramientas de realidad virtual

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

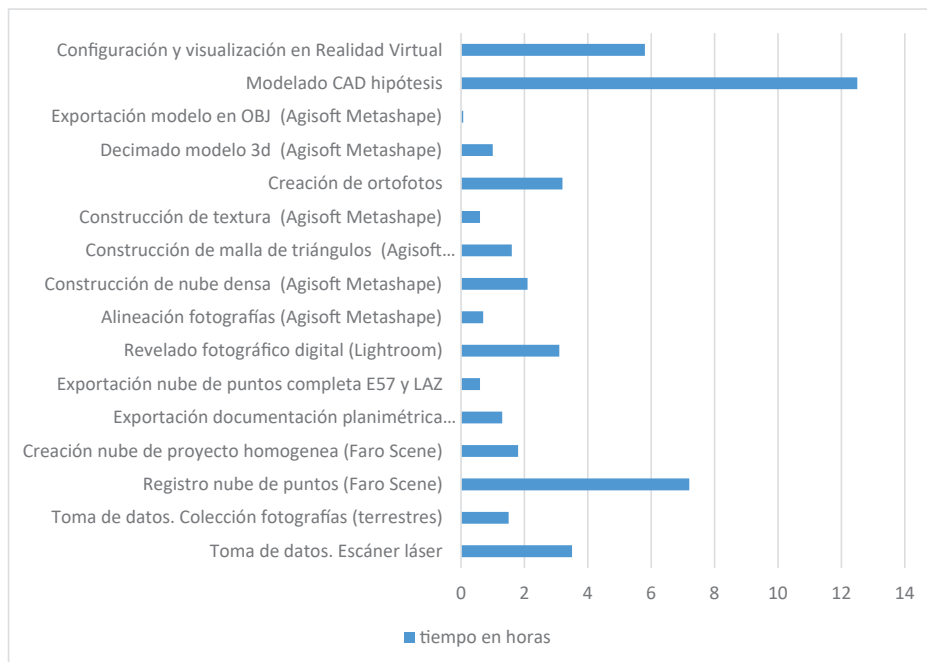


Tabla 36. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia



Figura 240. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7SK1>

CASO 6

**DIGITALIZACIÓN 3D DE UN NÚCLEO
URBANO PARA SU ESTUDIO Y ANÁLISIS**

LA CALZADA DE BÉJAR, SALAMANCA



Trabajo realizado en el año 2019 en colaboración con el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de la Universidad de Valladolid por encargo de la Dirección General de Patrimonio de la Junta de Castilla y León. El trabajo consistió en la realización de la digitalización 3d mediante escáner láser y fotogrametría de la zona del núcleo urbano por donde transcurre la Vía de la Plata. El objetivo de esta documentación 3d sería ser la base para que un grupo multidisciplinar de arqueólogos, geógrafos, historiadores y arquitectos analizaran los datos y desarrollaran un estudio histórico, geográfico, cartográfico, urbanístico, tipológico y constructivo sobre el núcleo urbano, su entorno y cómo la Vía de la Plata había afectado a su evolución en el tiempo.



Figura 241. Vista aérea del núcleo de Calzada de Béjar. Fuente: elaboración propia

1. Antecedentes

La Calzada de Béjar se localiza en el extremo sur oriental de la provincia de Salamanca, en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, entre la cuenca de Sangusín y las cumbres de la Sierra de Béjar. Forma parte de la comarca de Sierra de Béjar y pertenece al partido judicial de Béjar. Por ella pasa la calzada romana que se conoce como Vía de la Plata que debe su origen a un conjunto de calzadas romanas que unían el suroeste con el noroeste peninsular. Alas afueras del núcleo urbano aún se puede observar el enlosado de piedra original de esta calzada romana. De igual manera, a unos 500 metros al este del núcleo urbano y en la zona alta de una ladera se conserva un viejo fortín romano que servía para controlar la ruta.



Figura 242. Imagen aérea del fortín romano. Fuente: Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica

En su tramo central la calzada romana presenta la denominación técnica actual de *Iter Ab Emerita Asturicam*⁵ (Roldán Hervás, 1971); unía dos poblaciones romanas de gran importancia: Emerita Augusta (Mérida), capital de la provincia romana de Lusitania, y Asturica Augusta (Astorga).

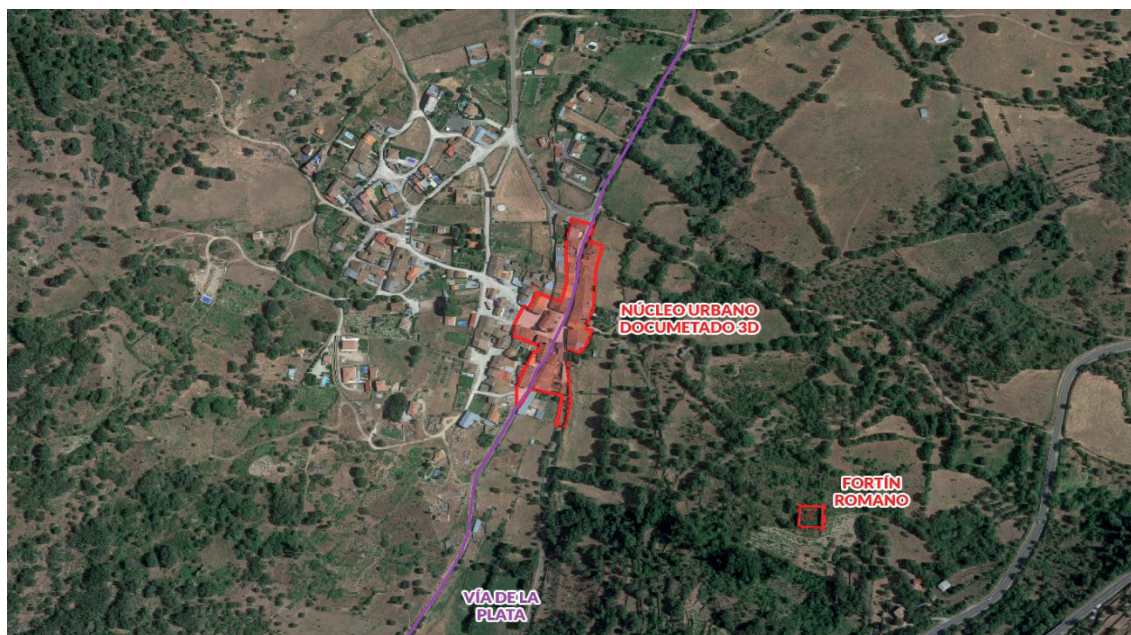


Figura 243. Imagen aérea del núcleo urbano de Calzada de Béjar. Fuente: Google Maps. Imagen modificada para este documento

5 MANUEL ROLDÁN HERVÁS, J. (1971). *Iter ab Emerita Asturicam. El camino de la plata*. Ediciones Universidad de Salamanca.

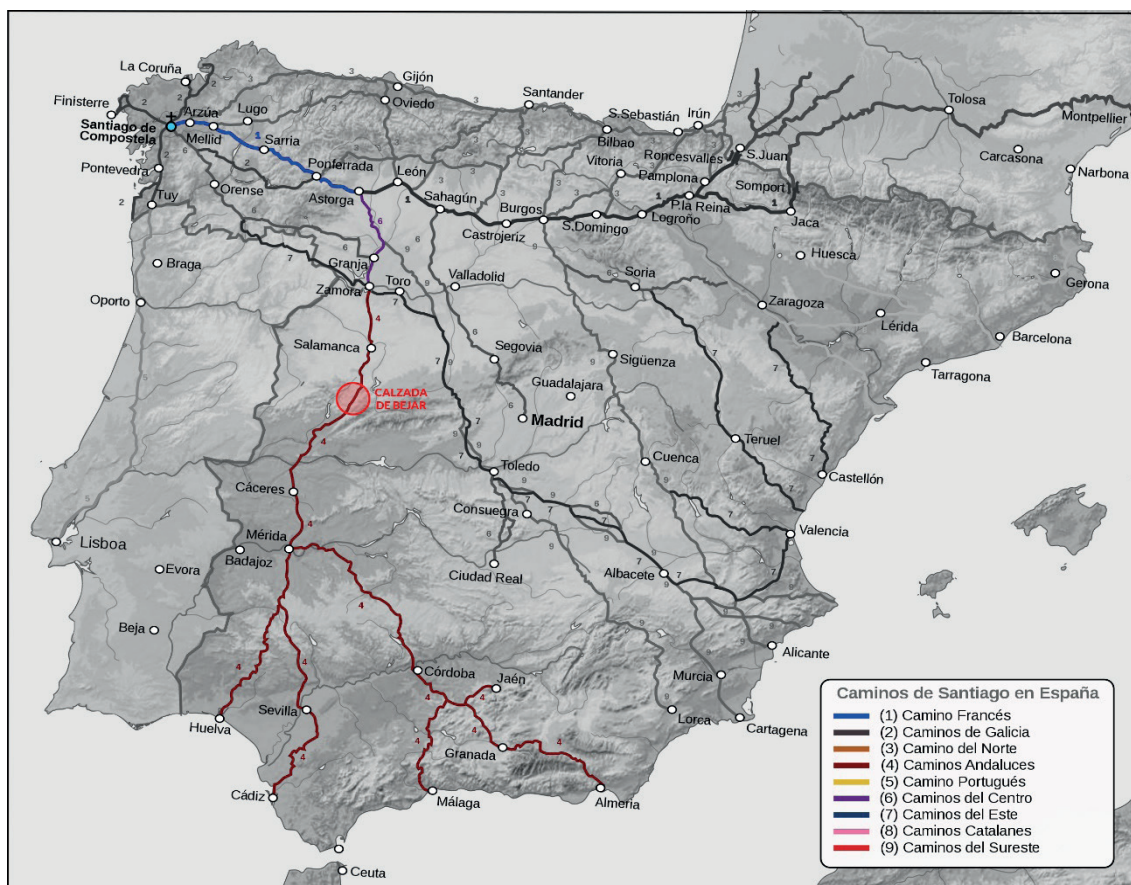


Figura 244. Mapa de los diferentes Caminos de Santiago y ubicación del núcleo urbano de Calzada de Béjar. Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Camino_de_Santiago_Espa%C3%B1a_\(por_grupos\).svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Camino_de_Santiago_Espa%C3%B1a_(por_grupos).svg). Imagen modificada para este documento.

El término municipal muestra una orografía ondulada, con altitudes que oscilan entre 680 y 945 m. Cuenta con una extensión de 9,47 km². Las aguas se dividen entre las cuencas de los ríos Sangusín y el Cuerpo de Hombre, ambas pertenecientes a la subcuenca del río Alagón, afluente del río Tajo. Por el norte del término discurre el Arroyo de la Negrilla que vierte sus aguas al río Sangusín y por el sur el Arroyo de la Pedrera, el cual las cede al Río Cuerpo de Hombre.

Desde el siglo XII y XIII, la localidad de La Calzada de Béjar permaneció dentro de la Comunidad de Villa y Tierra de Béjar, que pertenecía al reino de Castilla.

El 5 de enero de 1209 fue segregada por Alfonso VIII, con el acuerdo del Concejo de Ávila, una parte de su término jurisdiccional para dotar con ella al nuevo Concejo de Béjar, señalándose el límite que iba a separar los territorios de ambos Concejos desde el río Tormes hasta Becedas.

La nueva Comunidad, enclavada entre el reino de León y las Comunidades de Ávila y Plasencia, extendía su territorio por parte de las actuales provincias de Salamanca, Ávila y Cáceres.

Eclesiásticamente, la Comunidad de Villa y Tierra de Béjar también fue separada de la diócesis de Ávila e integrada en la de Plasencia.

La Calzada de Béjar, entonces simplemente Calzada, al estar ubicado al oeste de la Vía de la Plata formaba parte del Reino de León y de la Diócesis de Coria, hecho que se prolongó como mínimo hasta el siglo XIX, ya que aparece aún como localidad del obispado cauriense en el Diccionario de Madoz en el siglo XIX. Entonces la calle ubicada al este de la Vía de la Plata se denominaba Casas

de la Calzada y, teóricamente dependía en lo eclesiástico de Plasencia aunque al carecer de iglesia propia su parroquia a todos los efectos era la de La Calzada, y por tanto la Diócesis de Coria.

2. Planificación previa del trabajo

Previamente a la toma de datos se realizó una planificación de las diferentes fases del trabajo que se llevaría a cabo para el proceso de documentación y los equipos a utilizar.

El trabajo se iba a centrar en las calles principales del núcleo urbano, que además coinciden con la Vía de la Plata. Estas calles serían la calle Baños (también denominada Calzada Romana), la plaza de la Asunción, la calle de los Molinos y la calle Salas Pombo (también denominada calle Vía de la Plata).

El trabajo se dividiría en diferentes fases. La primera de ellas consistió en el escaneado del trazado urbano de las calles antes mencionadas y de las fachadas de las viviendas para obtener un modelo geométrico y a color con una precisión centimétrica.

En una segunda fase se realizaría una colección de fotografías aéreas mediante dron y terrestres para tener un modelo a color más completo con todas las cubiertas de las viviendas que vuelcan a estas calles.

Una tercera fase fue la realización de todas las fotografías esféricas para poder realizar una visita virtual de la zona documentada en el trabajo de levantamiento.

Una tercera fase fue el procesado de todos los datos para la creación de un modelo tridimensional de todo el conjunto y la extracción de documentación básica para los posteriores estudios que se realizarían por el equipo multidisciplinar.

A continuación, se muestra una tabla con el equipo y programas utilizados en el trabajo:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner láser Faro Focus 3D S 120
	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
	Olympus PEN-E-PL5
	Objetivo Olympus M.Zuiko ED 14-42mm F3.5-5.6
	Olympus Air A01
	Objetivo Olympus BCL-1580 15 mm F8.0
	Objetivo Olympus M.Zuiko ED 12 mm F2.0
	Mi Sphere Camera (cámara 360)
	DJI Phantom 4 Pro
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
	Pértiga telescópica para cámara
Programas	Faro Scene
	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom
	Kolor Panotour
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 37. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

3. Toma de datos

La toma de datos se realizó durante dos días y medio y se dividió en varias partes: la primera enfocada a la digitalización con escáner láser, la segunda enfocada a la digitalización mediante fotografía y la tercera a la realización de fotografías esféricas para la realización de una visita virtual.



Figura 245. Toma de datos con el escáner Faro Focus 3D. Fuente: elaboración propia

Para la toma de datos con escáner se recurrió a un escáner láser Faro Focus 3D. Es un escáner de medio alcance de diferencia de fase. La configuración de los escaneos realizados para la documentación de las fachadas de las viviendas y las calles tenían los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Outdoor 20 m ...
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	2x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:06:20
Tamaño de escaneo	10240 x 5120
Millones de puntos del escaneo	43,4
Resolución mm/10 m	6.136
Color escaneado	SI

Tabla 38. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia

Esta configuración también se utilizó para realizar una serie de escaneos para documentar el interior de la iglesia.

Los escaneos se realizaron de forma ordenada, encadenando la secuencia de tomas desde el final de la calle Salas Pombo hacia la plaza de la Asunción, continuando por la calle Baños hasta llegar al final del núcleo urbano. Dada a geometría y los retranqueos de las fachadas de las vi-

viendas no fue necesario utilizar referencias artificiales para realizar el alineado entre las nubes de puntos ya que se podían utilizar las referencias naturales (geometría de los objetos).

Se realizaron un total de 39 escaneos, de los cuales 34 estaban repartidos en la calle Baños (7 escaneos), la plaza de la Asunción (10 escaneos), la calle de los Molinos (4 escaneos) y la calle Salas Pombo (13 escaneos). Los otros 5 escaneos se realizaron para documentar el interior de la iglesia.

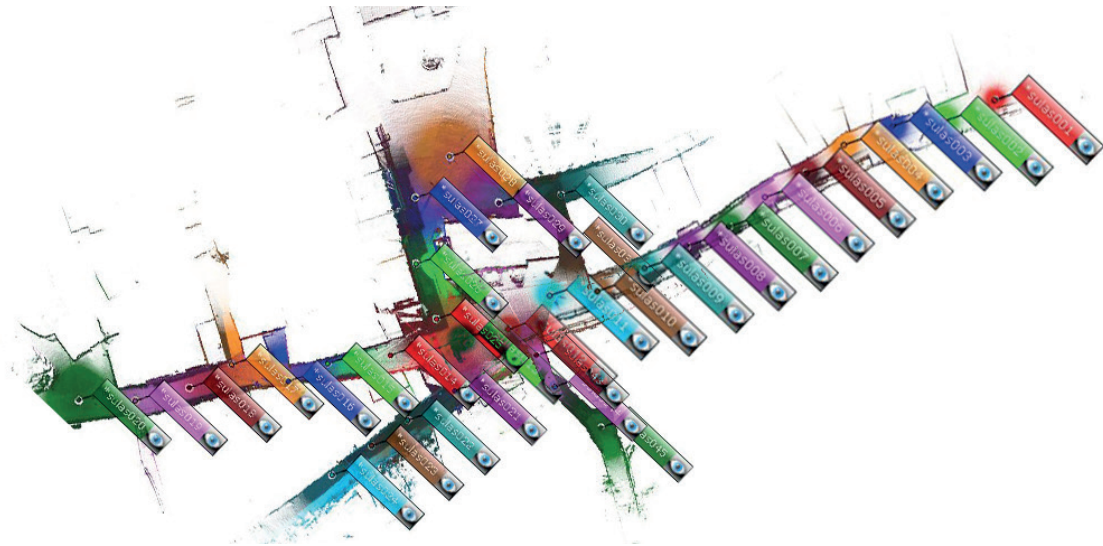


Figura 246. Distribución de los escaneos para la documentación de las calles. Fuente: elaboración propia

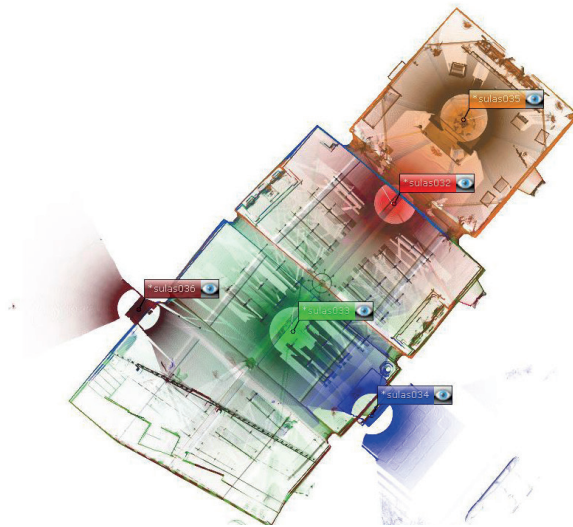


Figura 247. Distribución de los escaneos para la documentación del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia

Además, se realizaron varias colecciones de fotografías (terrestres y aéreas) para la generación de modelos a partir de fotogrametría digital para obtener fotoalzados de las fachadas de las viviendas. En las terrestres, para la calle Salas Pombo se realizaron 171 fotografías y para la calle Baños se realizaron 113 fotografías. Las fotografías fueron realizadas en formato RAW para poder realizar el revelado digital y poder mejorar las fotografías en caso de ser necesario.

La configuración de las fotografías fue la siguiente:

CONFIGURACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA	
Dimensiones fotografías	4256 x 2832 píxeles
Modelo de cámara	Nikon D700
Distancia focal	14 mm
Velocidad ISO	ISO-200
Apertura focal	f/8
Tiempo de exposición	1/250

Tabla 39. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia

En las aéreas, se realizaron un total de 271 fotografías para generar un modelo con el que poder obtener una ortofoto de la zona a documentar. La configuración de los parámetros de vuelo fueron los siguientes:

CONFIGURACIÓN PLAN DE VUELO	
Tipo de dron	DJI Phantom 4 Pro
Tipo de vuelo	Rejilla
Altitud de vuelo	50 m
Dimensiones área de vuelo	100 x 306 m
Tiempo de vuelo	9 min 30 seg
Overlap	80% (72%)
Ángulo cámara	90º
Localización	40.410291, -5.815955

Tabla 40. Parámetros de configuración del plan de vuelo. Fuente: elaboración propia



Figura 248. Configuración del plan de vuelo en la aplicación Pix4D Capture. Fuente: elaboración propia

Por otra parte, se realizaron 65 fotografías esféricas a una altura aproximada de 3 metros sobre el suelo con la Mi Sphere Camera colocada sobre una pértiga telescópica. Estas fotografías estaban destinadas a la elaboración de una visita virtual.



Figura 249. Fotografía esférica de la calle Salas Pombo. Fuente: elaboración propia

4. Procesado de datos

El procesado de datos se realizó en tres etapas. La primera estaba relacionada con el registro de los datos de escaneo con el software Faro Scene, la segunda con la generación de la fotogrametría mediante el software Agisoft Metashape y la tercera con el revelado digital con Adobe Lightroom y montaje de las fotografías panorámicas.

En el software Faro Scene se creó un proyecto en el que se importaron todos los escaneos. Estos se organizaron en varios clúster (carpetas de escaneo). Por un lado, los escaneos del interior de la iglesia, y por otro los escaneos de la traza urbana. En esta última, debido a la longitud de la calle (250 metros) y a que solo se realizaron escaneos en el eje de la calle, se tuvo que separar los escaneos en dos clúster, uno para la calle Salas Pombo y otro con la calle Baños y calle Molinos. De esta manera se consiguió una mejor alineación entre las nubes de puntos y una reducción en la deriva.



Figura 250. Nube de puntos de la zona de la plaza y la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción. Fuente: elaboración propia

Antes de realizar el registro se aplicaron los filtros *Stray* para eliminar puntos extraviados, el filtro de distancia para eliminar todos los puntos capturados a más de 35 m desde las posiciones del escáner y el filtro de puntos oscuros para eliminar los puntos con demasiado ruido. A mayores se realizó el coloreado automático de los escaneos a partir de las fotografías capturadas por el escáner láser durante el proceso de la toma de datos.

A continuación, se procedió al registro de las nubes de puntos mediante el cálculo automático de referencias entre ellos. El primer registro realizado fue el basado en vista superior. Los parámetros utilizados fueron una distancia de 0,045 m para el submuestreo y un valor de 65 para la fiabilidad.

La alineación fue favorable, consiguiendo alinear todos los escaneos a falta de realizar un ajuste fino. El siguiente paso fue aplicar un registro de puntos basado en *Cloud to Cloud* en el que se utilizan todos los puntos para ajustar el alineamiento. Los parámetros utilizados fueron una distancia de submuestreo de 0,085 (se recomiendan valores altos cuando se trata de escaneos de exteriores), un máximo de 200 interacciones y una distancia máxima de búsqueda de 1 m.

Los resultados en el registro fueron favorables, ya que el error medio de distancia de escaneo no superó los 5 mm de error. La nube completa con todos los escaneos tenía una densidad de 1.702,6 millones de puntos.

Debido al tamaño y densidad de la nube de puntos, se realizó una optimización de la nube homogeneizando el paso de malla a 1 punto cada 5 mm, consiguiendo así tener una nube de 346.188.056 puntos, más manejable para poder trabajar con ella.

En Agisoft Metashape se realizó un modelo fotogramétrico con las fotografías aéreas y las terrestres. Estas se cargaron dentro del programa en dos bloques diferentes. Cada uno de estos bloques se alinearon, calcularon las nubes de paso, se filtraron puntos para eliminar los de mayor error y se introdujeron marcadores o referencias externas. Con estos datos ya se pudo realizar un alineamiento de los dos bloques para unificarlo todo en uno solo.

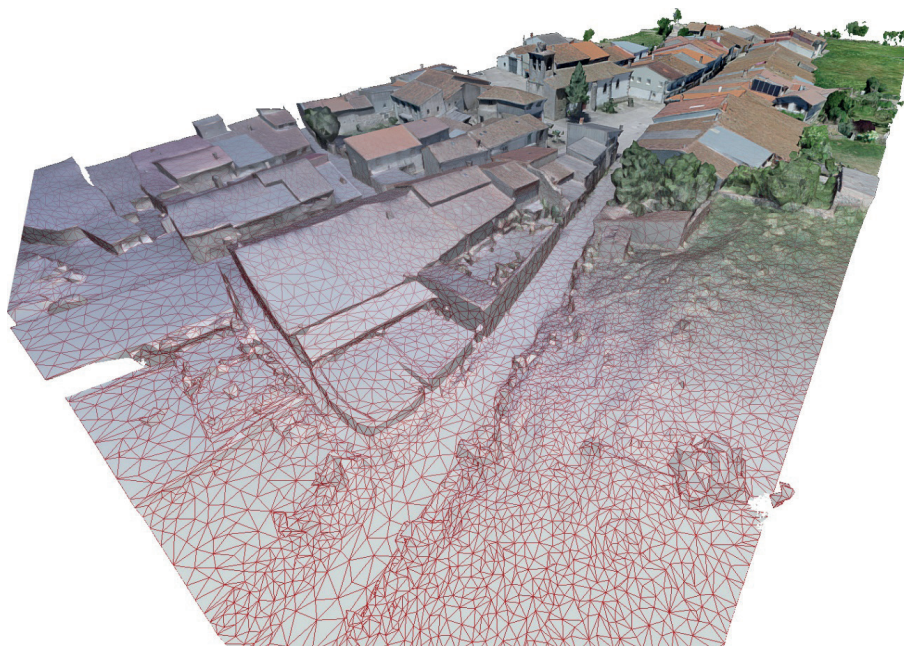


Figura 251. Modelo 3d obtenido mediante el proceso de fotogrametría digital. Fuente: elaboración propia

A partir de aquí se calculó la nube densa, el mallado de triángulos y el texturizado. El modelo a color de la traza urbana obtenido por fotogrametría tenía un total de 26.256.812 caras.

En Adobe Lightroom y Mi Sphere Camera Desktop se realizó el revelado digital de las fotografías panorámicas esféricas para mejorar la iluminación, sombras y color; y el montaje de las fotografías equirectangulares respectivamente. Este montaje era necesario, ya que la cámara no genera directamente la fotografía equirectangular, sino que captura imágenes tipo ojo de pez, las cuales hay que tratar y procesar.



Figura 252. Fotografía tipo ojo de pez que captura la cámara 360. Fuente: elaboración propia



Figura 253. Resultado de la fotografía esférica después de realizar el revelado digital y el procesado. Fuente: elaboración propia

5. Resultados

El modelo de nube de puntos fue exportado en formato E57, para poderlo visualizar, manipular y realizar consultas en otros programas de manejo de nubes de puntos. Además de la nube de puntos se extrajo información de la planta de todo el conjunto y los alzados por el eje de la calle principal.



Del modelo obtenido por fotogrametría se realizaron ortofotos de la planta de cubiertas, y de las fachadas de las viviendas, para posteriormente fueran utilizados por el equipo multidisciplinar para el análisis constructivo y tipológico.

Una de las cosas que se pudo comprobar mediante el flujo de trabajo seguido fue, que las ortofotos de las fachadas de las viviendas quedaron poco definidas en las zonas altas. Como las casas no tenían mucha altura, solo tenían planta baja más planta primera, en principio con realizar los escaneados a una altura del suelo de 2,5-3 metros al igual que las colecciones de fotografías tendría que haber sido suficiente para tener toda la información. Pero haciendo la comparativa de los resultados obtenidos, la ortofoto obtenida a partir de la fotogrametría digital es muy buena ya que tienen más detalle y menos sombras que la ortofoto obtenida de la nube de puntos. Pero si se hubiera realizado una altura más de fotografías la parte superior de las fachadas habrían quedado con una geometría más definida.



ORTOFOTO GENERADA A PARTIR DE LA NUBE DE PUNTOS OBTENIDA DEL ESCÁNER LÁSER

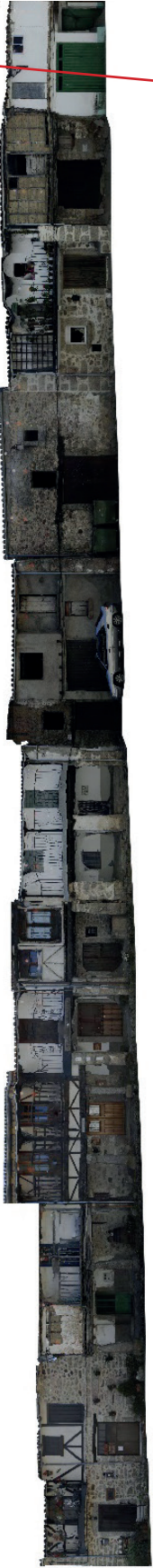


ORTOFOTO GENERADA A PARTIR DEL MODELO 3D OBTENIDO POR FOTOGAMETRÍA

Figura 254. Comparativa de las ortofotos obtenidas a partir de la nube de puntos y de la fotogrametría digital

El proceso seguido se orientó a tener un modelo del núcleo urbano para:

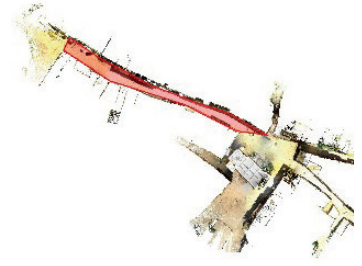
- generar documentación planimétrica para su posterior estudio y análisis
- crear un archivo 3d como registro del estado actual de la Calzada de Béjar y como fuente de datos para la consulta de mediciones
- difusión del modelo mediante herramientas web



ORTOFOTO LADO DERECHO C/ SALAS POMBO



ORTOFOTO LADO IZQUIERDO C/ SALAS POMBO





ORTOFOTO LADO DERECHO C/ BAÑOS



ORTOFOTO LADO IZQUIERDO C/ BAÑOS



Para alcanzar este objetivo los pasos realizados fueron:

1. Realización de escaneados de las calles, fachadas de viviendas e interior de la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción con el escáner faro Focus.
2. Montaje y registro de los escaneos en un único modelo de nube de puntos (importación, filtrado de puntos, coloreado de puntos y alineado de puntos).
3. Exportación de documentación planimétrica.
4. Exportación de nube de puntos de todo el conjunto en formato E57 y LAZ.
5. Realización de colección de fotografías terrestres y aéreas para la generación de un modelo 3d mediante fotogrametría digital.
6. Revelado digital de las fotografías para mejorar iluminación y color.
7. Procesado de fotografías en Agisoft Metashape (alineación, creación de nube de puntos densa, creación de malla y texturizado).
8. Creación y exportación de ortofotos de planta y alzados de las viviendas de la calle principal.
9. Exportación del modelo 3d en formato OBJ
10. Creación de modelo 3d y nube de puntos optimizados para su difusión web.
11. Realización de colección de fotografías esféricas de las calles a documentar.
12. Revelado digital de las fotografías para mejorar iluminación y color.
13. Procesado y montaje de las fotografías esféricas.
14. Montaje de una visita virtual a partir de las fotografías esféricas.

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

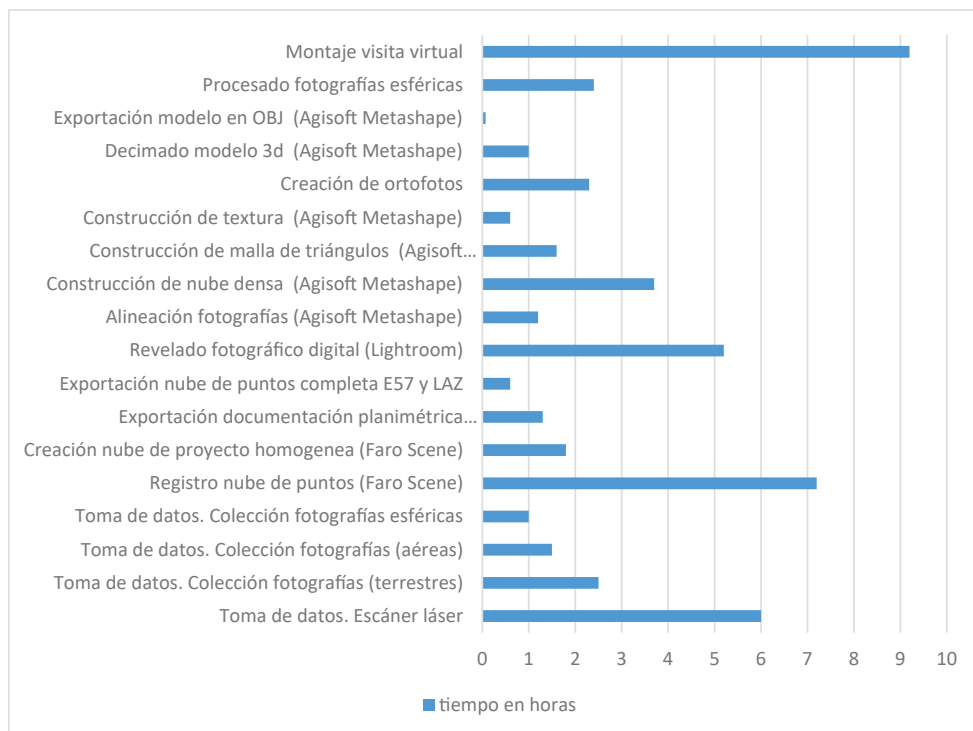


Tabla 41. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia



Figura 255. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde un dispositivo móvil. Fuente: José Martínez Rubio. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/6WPH8>

CASO 7

DIGITALIZACIÓN 3D PARA RESTAURACIÓN

**EL ARTESONADO DE LA CABECERA DE LA
IGLESIA DE SANTA MARÍA EN FUENTES
DE NAVA, PALENCIA**



Trabajo realizado en el año 2020 en colaboración con el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica que consistió en la realización de la digitalización 3d mediante escáner láser y fotogrametría del artesanado del presbiterio de la iglesia de Santa María en Fuentes de Nava, Palencia. El objetivo de esta documentación era obtener un modelo 3d con una gran precisión geométrica del estado actual del artesanado antes de realizar su restauración. De este modelo tridimensional se obtendría la documentación necesaria para la redacción del proyecto de restauración, pero además se generarían ortofotos de cada uno de los paños o faldones que definen el artesanado para utilizarlos como plantilla para colocar las piezas, de forma ordenada, durante el proceso de desmontaje.

1. Antecedentes

Dentro del casco urbano de Fuentes de Nava, declarado Conjunto Histórico con fecha 06/09/2007 (BOCyL 12/09/2007), se encuentra la iglesia de Santa María ubicada junto a lo que era la puerta oeste de la villa, dando acceso a la c/ Mayor que junto a la c/ de San Pedro estructura el tejido urbano.



Figura 256. Ubicación de la iglesia de Santa María dentro del núcleo urbano. Fuente: Google Maps y catastro

Las Normas Urbanísticas Municipales de Fuentes de Nava se refieren al edificio, dentro del capítulo dedicado a las condiciones para la conservación del patrimonio, en los siguientes términos:

“Se edificó en el s. XVI con ampliaciones y reformas realizadas en los s. XVII y XVIII. Además de su bella portada gótica de estilo Reyes Católicos, conserva en su interior un majestuoso artesanado mudéjar policromado, del más puro estilo castellano, catalogado como uno de los más importantes por su calidad y conservación”



Figura 257. Fotografías del exterior e interior de la iglesia de Santa María. Fuente: elaboración propia

La configuración inicial del edificio consta de nave principal y presbiterio (o capilla mayor) formadas por muros de fábrica mixta de ladrillo y tapial sobre zócalos de piedra caliza, separadas por un arco de triunfo. En la siguiente planta del edificio se indica en color rojo la posición del artesanado.



Figura 258. Ubicación del artesanado respecto la planta de la iglesia. Fuente: elaboración propia

Ambas naves se cierran en cubierta mediante entramados de madera formando artesanados de tipo denominado ataujerado⁶, donde los trazados de lazo se realizan con piezas de poco espesor clavadas sobre un tablero que cubre la armazón portante, que queda oculta. El conjunto está policromado.

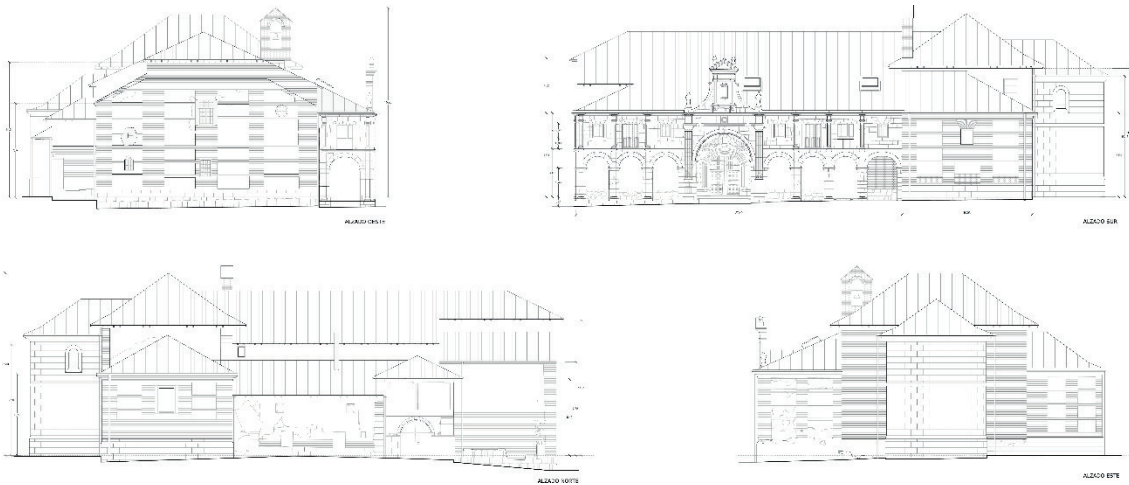


Figura 259. Alzados de la iglesia de Santa María. Fuente: <http://stamariafuentesdenava.com>

El artesanado del presbiterio tiene una superficie en planta de 113,17 m² (12.86 x 8.80). Se trata de una techumbre ochavada sobre trompas con lazo de doce, dieciséis y veinticuatro.

El entramado se ajusta a la organización consistente en una sucesión de pares enfrentados que forman los paños o faldones principales estribados sobre un diafragma horizontal atrantado, dispuesto sobre muros de carga, atestados a una hilera superior (cumbreira), y enlazados a un

⁶ Según Tesauros, Diccionario del Patrimonio Cultural de España del Ministerio de España de Cultura y Deporte, ataujerado es la decoración aplicada a la madera, consistente en lacerías compuestas por un entramado de listones que se clavetea sobre un panel.

tercio de su altura mediante nudillos horizontales que cortan la luz a los pares y definen un plano horizontal (almizate). Los extremos se resuelven mediante faldón testero perpendicular a los longitudinales y dos faldones ochavados (a 45°) entre ellos. La separación de pares y nudillos de esta estructura se mantiene constante en todos los faldones del entramado (aproximadamente 29 cm a ejes) que forman el artesonado. Este entramado delimita los distintos paños que forman la artesa, que se completa con la colocación de una tabla de anchura constante dispuesta entre pares o nudillos consecutivos.

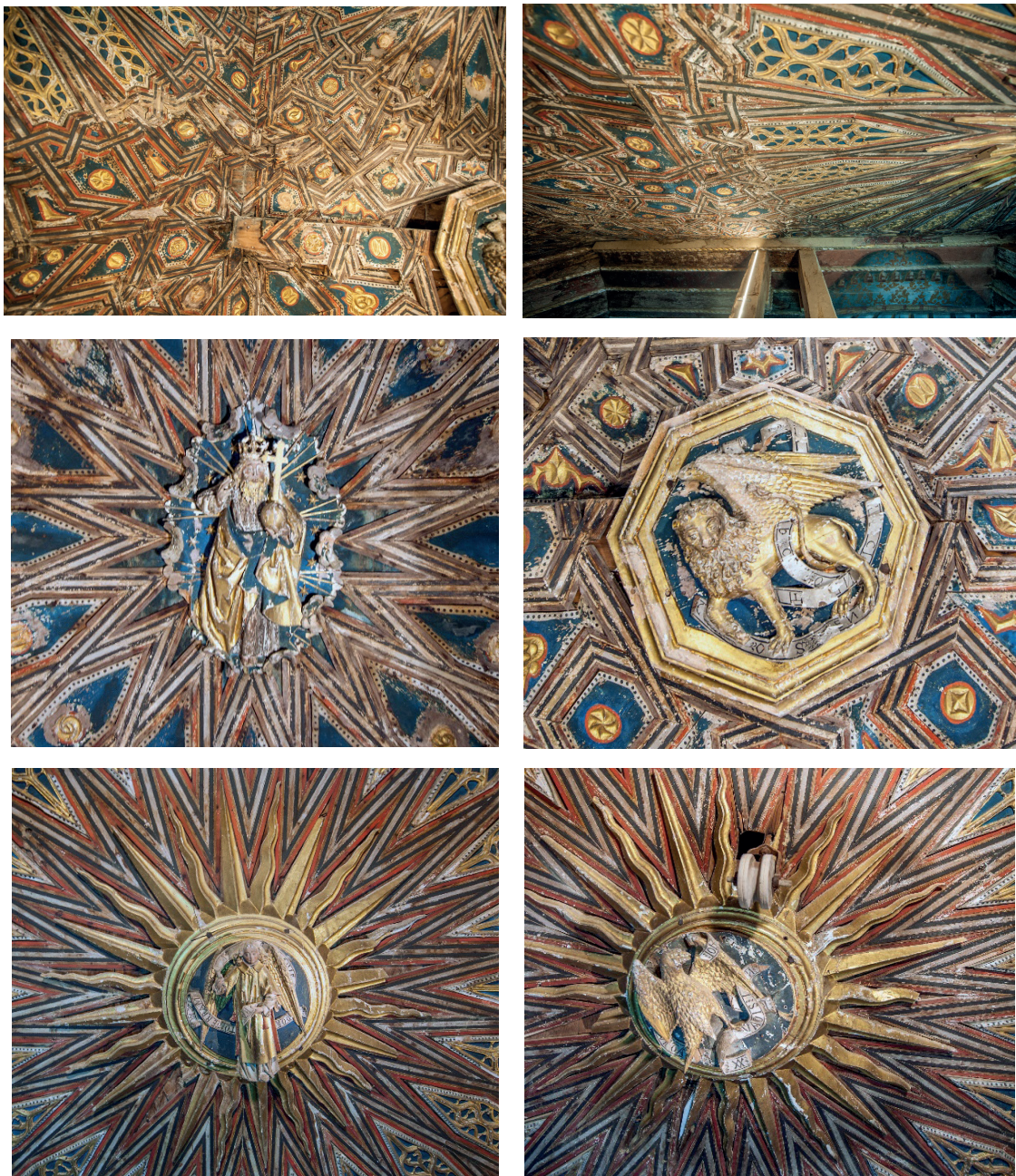


Figura 260. Fotografías de detalle de la decoración del artesonado. Fuente: elaboración propia

2. Planificación previa del trabajo

Previamente a la realización del trabajo se realizó una planificación de las diferentes fases que se llevarían a cabo para el proceso de documentación y los equipos a utilizar.

En una primera fase se realizaría el escaneado del artesanado para obtener un modelo geométrico con precisión milimétrica. Para ello se utilizó un escáner de diferencia de fase de medio alcance, el Faro Focus 3D 120 S que asegura obtener esa resolución.

En una segunda fase se realizaría una colección de fotografías para la generación de un modelo tridimensional con color.

La tercera fase sería el procesado, la creación del modelo tridimensional y la extracción de información básica.

A continuación, se muestra una tabla con el equipo y programas utilizados en el trabajo:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner láser Faro Focus 3D S 120
	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
Medios Auxiliares	Trípode Manfrotto
Programas	Faro Scene
	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 42. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

3. Toma de datos

A mediados de febrero de 2020 se realiza la visita a la iglesia de Santa María para realizar la toma de datos. Esta toma de datos no se realiza desde el suelo, sino que se aprovecha el andamio colocado, aproximadamente a unos 12 metros de altura, para la inspección del artesanado y su posterior restauración. Este andamio permitió estar muy próximos al artesanado (menos de 2 metros de distancia) lo que va a supuso la obtención de un resultado con mucho más detalle, sobre todo el obtenido con las fotografías por la proximidad al objeto.

Lo primero fue subir todos los equipos, y a partir de ese momento se realizó el replanteo de los escaneos.



Figura 261. Andamio utilizado para la toma de datos y la restauración del artesanado. Fuente: elaboración propia

La configuración de los escaneos se realizó marcando los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Indoor ...10 m
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º
	Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	2x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:06:35
Tamaño de escaneo	10246 x 4268
Millones de puntos del escaneo	28,44
Resolución mm/10 m	6.136
Color escaneado	Si

Tabla 43. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia

Estando en la parte superior se pudo comprobar que el andamio no era estable, ya que se producía un pequeño desplazamiento cada vez que nos desplazábamos. Esto no era un inconveniente para la realización de las fotografías, ya que se utilizaría tiempo de exposición, pero si que era un problema importante para la realización de los escaneos, ya que el mínimo movimiento introduciría errores en el modelo de la nube de puntos.

Para solucionar este contratiempo se tomó la decisión de realizar los escaneos de la zona central apoyando el trípode del escáner sobre los tirantes. Y cuando se realizaron los escaneos de los extremos el trípode del escáner se colocaba sobre el andamio y la persona que manejaba el escáner se subía a los tirantes para no transmitir movimiento a la plataforma. Estos dos escaneos se ejecutaron de forma inalámbrica desde un smartphone mediante la red wifi del escáner.

En total se realizaron ocho escaneos, seis en la zona central coincidiendo en la zona de los tirantes y dos en los extremos.

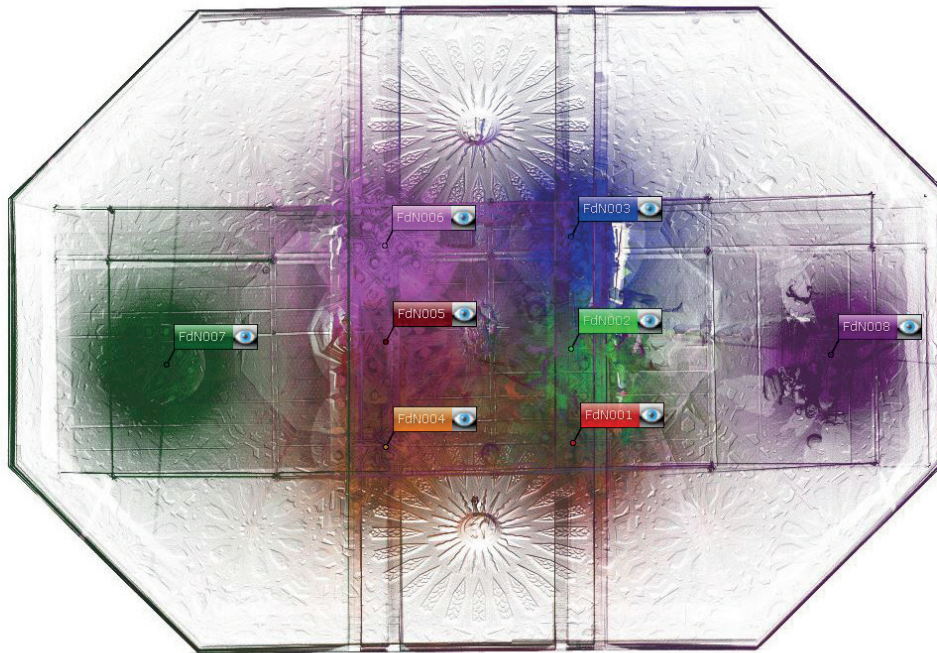


Figura 262. Distribución en planta de los escaneos realizados. Fuente: elaboración propia

En una segunda fase se realizó la colección de fotografías para poder generar un modelo fotogramétrico del artesanado. Se realizaron un total de 316 fotografías para poder hacer el recubrimiento completo. La cámara estaba apoyada sobre un trípode para evitar el desenfoque de la imagen, ya que se realizaron con tiempo de exposición. Las fotografías fueron realizadas en formato RAW para poder realizar el revelado digital y poder mejorar las fotografías en caso de ser necesario.

La configuración de las fotografías fue la siguiente:

CONFIGURACIÓN CÁMARA FOTOGRÁFICA	
Dimensiones fotografías	4256 x 2832 píxeles
Modelo de cámara	Nikon D700
Distancia focal	14 mm
Velocidad ISO	ISO-200
Apertura focal	f/8
Tiempo de exposición	2 seg

Tabla 44. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia

4. Procesado de los datos

El procesado de los datos se va a diferenciar en dos etapas. La primera será el registro de los datos de escaneo en el software Faro Scene y la segunda corresponderá a la generación de la fotogrametría mediante el software Agisoft Metashape.

En el software Faro Scene se creó un proyecto en el que se importaron los ocho escaneos realizados. Antes de realizar el registro se aplicaron los filtros *Stray* para eliminar los puntos extraviados, el filtro de distancia para eliminar todos los puntos capturados a más de 35 m desde el escáner y el filtro de puntos oscuros para eliminar los puntos con demasiado ruido. A mayores se realizó el coloreado automático de los escaneos a partir de las fotografías capturadas por el escáner láser durante el proceso de la toma de datos.

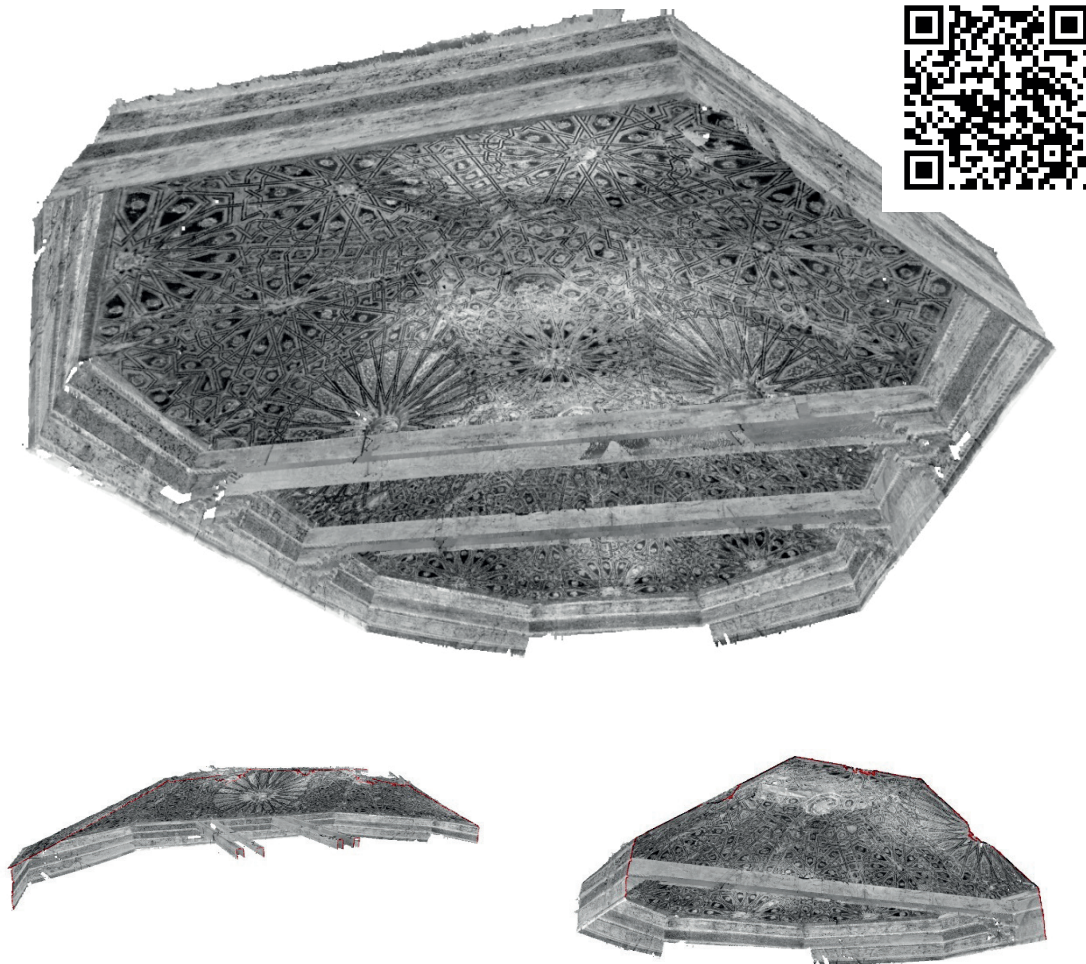


Figura 263. Nube de puntos resultante de los escaneos realizados con el faro Focus 3d. Escanea el código QR para poder visualizar la nube de puntos desde un dispositivo móvil. Fuente: elaboración propia

Una vez realizado este proceso se procedió al alineamiento de las nubes de puntos mediante el cálculo automático de referencias entre ellos. El primer registro realizado fue el basado en vista superior, en el que se hace una colocación rápida de los escaneos. Para esto es necesario haber activado en la toma de datos el sensor del inclinómetro. Los parámetros utilizados fueron una distancia de 0.035 m para el submuestreo de puntos y un valor de un 60 para la fiabilidad.

La alineación fue favorable a falta de realizar un ajuste fino. El siguiente paso fue aplicar un registro basado en *Cloud to Cloud* en el que se utilizan todos los puntos para ajustar el alineamiento. Los parámetros utilizados fueron una distancia de submuestreo de 0.025, un máximo de 30 interacciones y una distancia máxima de búsqueda de 10 m.

Los resultados obtenidos en el registro fueron muy buenos ya que el error medio de distancia del punto de escaneo no superó los 2 mm en ninguno de los escaneos. La nube completa con todos los escaneos tenía una densidad de 198.382.497.

La nube de proyecto fue optimizada con una densidad de puntos de a un punto cada cuatro milímetros, resultando una densidad de 7.610.821

En Agisoft Metashape se realizó un modelo fotogramétrico híbrido, utilizando las fotografías y las nubes de puntos individuales. Todos estos archivos se cargaron dentro de un bloque y se alinearon para obtener su posición y orientación, además de crear los puntos de paso de la nube dispersa. Se introdujeron marcadores para poder poner a escala el modelo. La posición de esos marcadores se extrajo de la nube de puntos de Faro Scene. El siguiente paso fue el filtrado gradual de puntos para eliminar los que daban un error mayor y a partir de ahí realizar el procesado para obtener la nube densa. A continuación, se realizó el mallado de triángulos y el texturizado.

El modelo a color del artesanado obtenido por fotogrametría tenía un total de 3.933.293 caras.

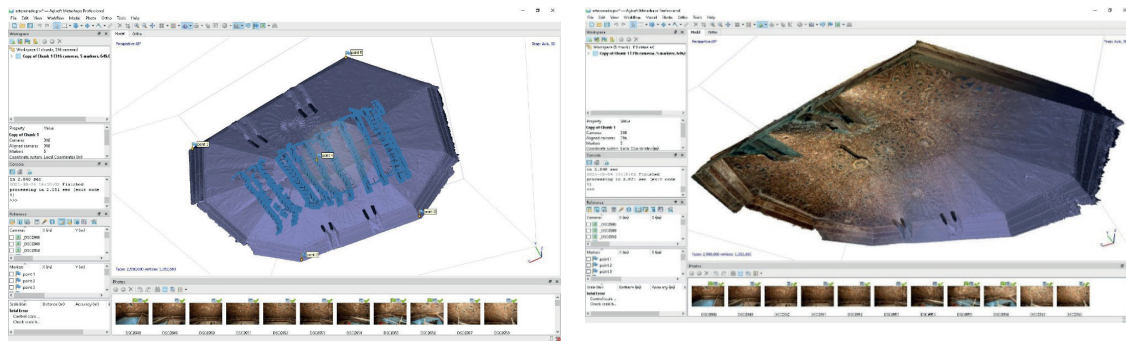


Figura 264. Modelo sólido y con textura obtenido a partir de la fotogrametría digital. Fuente: elaboración propia

5. Resultados

El modelo obtenido de malla de triángulos del artesanado tenía una resolución de paso de malla de un punto cada tres milímetros, existiendo zonas con mucho detalle. Existen algunas zonas de sombra en los puntos donde los faldones se han desprendido, ya que ni el escáner láser ha llegado ni la fotogrametría ha sido capaz de generar geometría (zonas oscuras). Con el modelo 3d realizado, ya se pudo proceder a la exportación de la malla de triángulos con color y la nube de puntos densa para poder utilizarlas en programas externos y obtener la documentación necesaria.

El modelo de nube de puntos fue exportado en formato E57 para poder subirlo al visualizador online Pointbox para que pudiera ser consultado de forma externa.

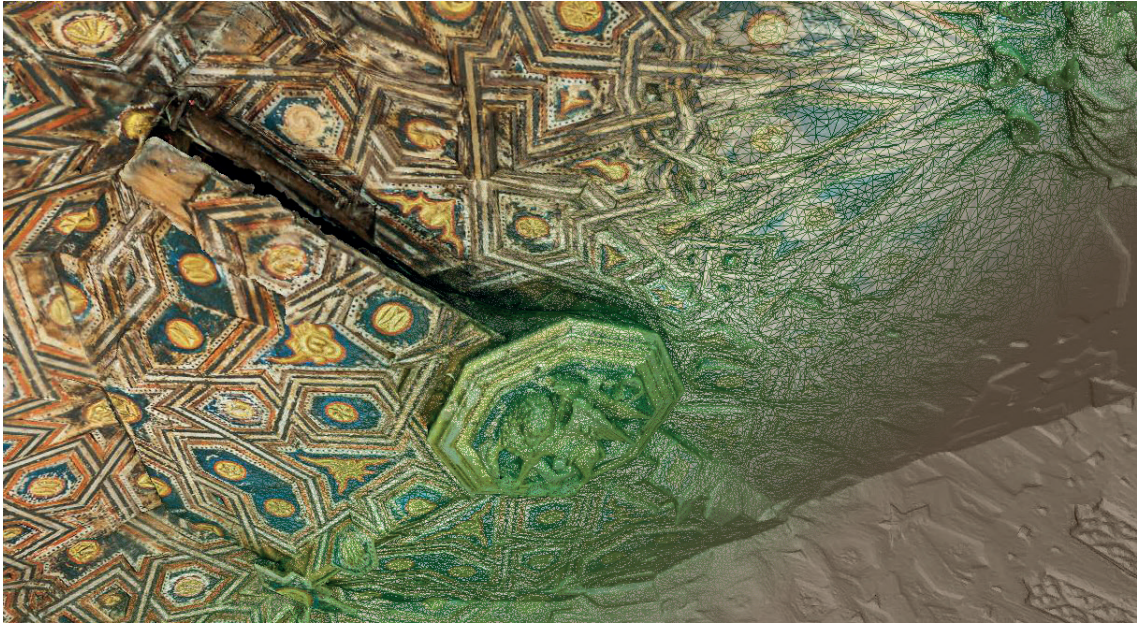


Figura 266. Composición del modelo sólido, la malla de triángulos y el modelo texturizado. Fuente: elaboración propia

Con los modelos 3d obtenidos, tanto con el escáner laser como con la fotogrametría digital, se realizó la extracción de documentación.

Se realizaron una serie de ortofotos de los paños o faldones que forman el artesanado a partir del modelo fotogramétrico a color. Estas ortofotos se imprimieron a escala 1:1 y fueron utilizadas como plantillas para apoyar las piezas de la tracería durante el proceso de desmontaje del artesanado.

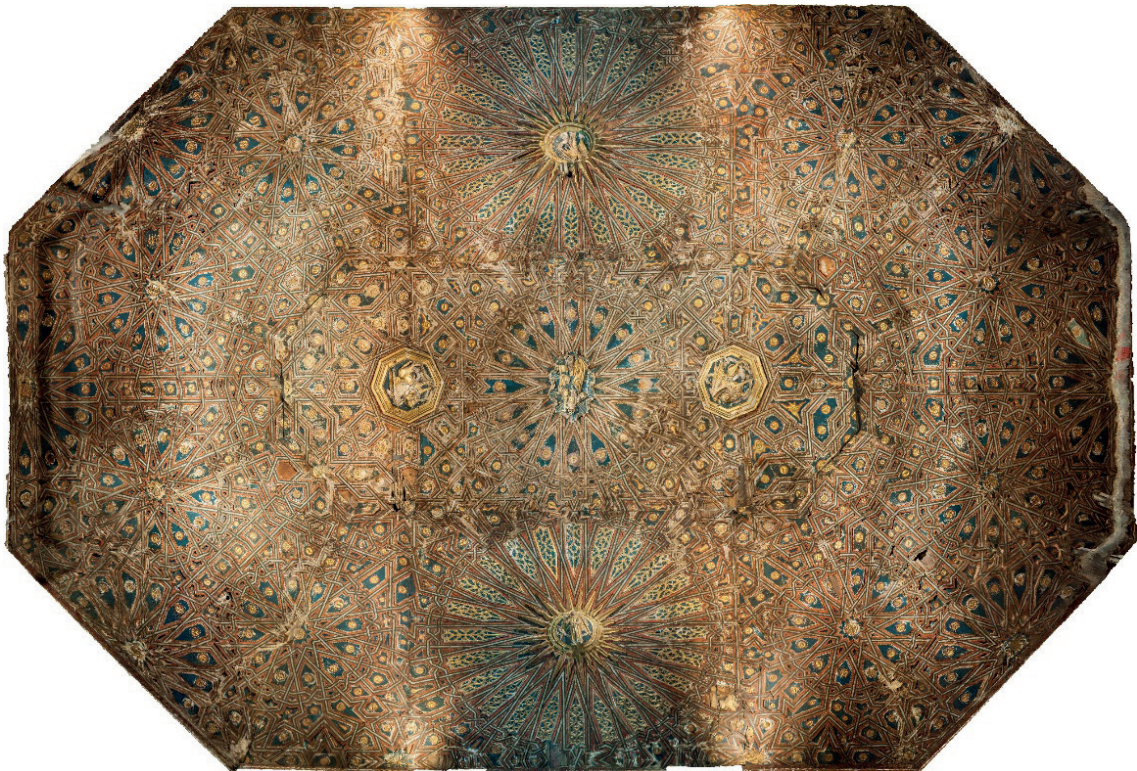


Figura 267. Ortofoto del artesanado visto en planta. Obtenido a partir del modelo generado por fotogrametría digital



Figura 268. Plantillas impresas a escala 1:1 de los faldones del artesanado. Fuente: elaboración propia

El proceso seguido se orientó a obtener un modelo 3d del artesanado para: generar documentación planimétrica con el desarrollo en verdadera magnitud de los faldones que componen el artesanado; crear un archivo 3d de registro del estado actual antes de realizar la restauración que permita poder realizar cualquier consulta o medida de la zona documentada; y difusión del modelo 3d. Para alcanzar este objetivo los pasos a seguir se concretaron en:

1. Realización de tomas del artesanado con el escáner Faro Focus 3D.
2. Montaje y registro de los escaneos en un único modelo de nube de puntos (importación, filtrado de puntos, coloreado de puntos, alineado de puntos).
3. Exportación de nube de puntos en formato E57 y LAZ.
4. Realización de colección de fotografías para la generación de un modelo 3d mediante fotogrametría digital.
5. Revelado digital de las fotografías para mejorar iluminación y color.
6. Procesado de fotografías en Agisoft Metashape (alineación, creación de nube densa, creación de malla y texturizado de la malla).
7. Creación y exportación de ortofotos de cada uno de los faldones del artesanado.
8. Exportación del modelo 3d en formato OBJ
9. Creación de modelo 3d y nube de puntos optimizados para su difusión web

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

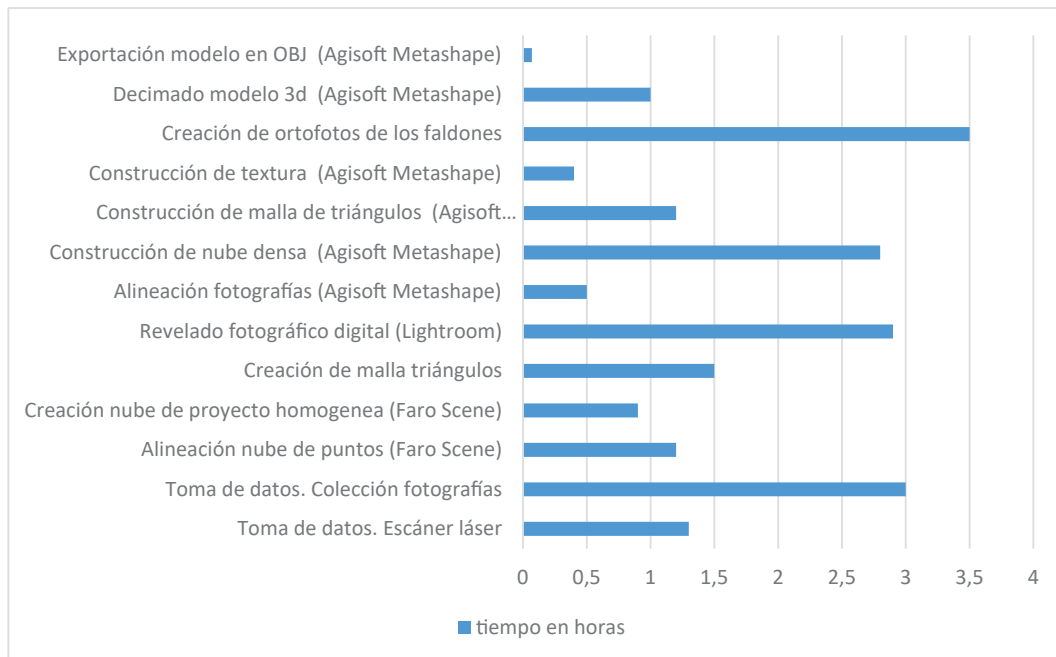


Tabla 45. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

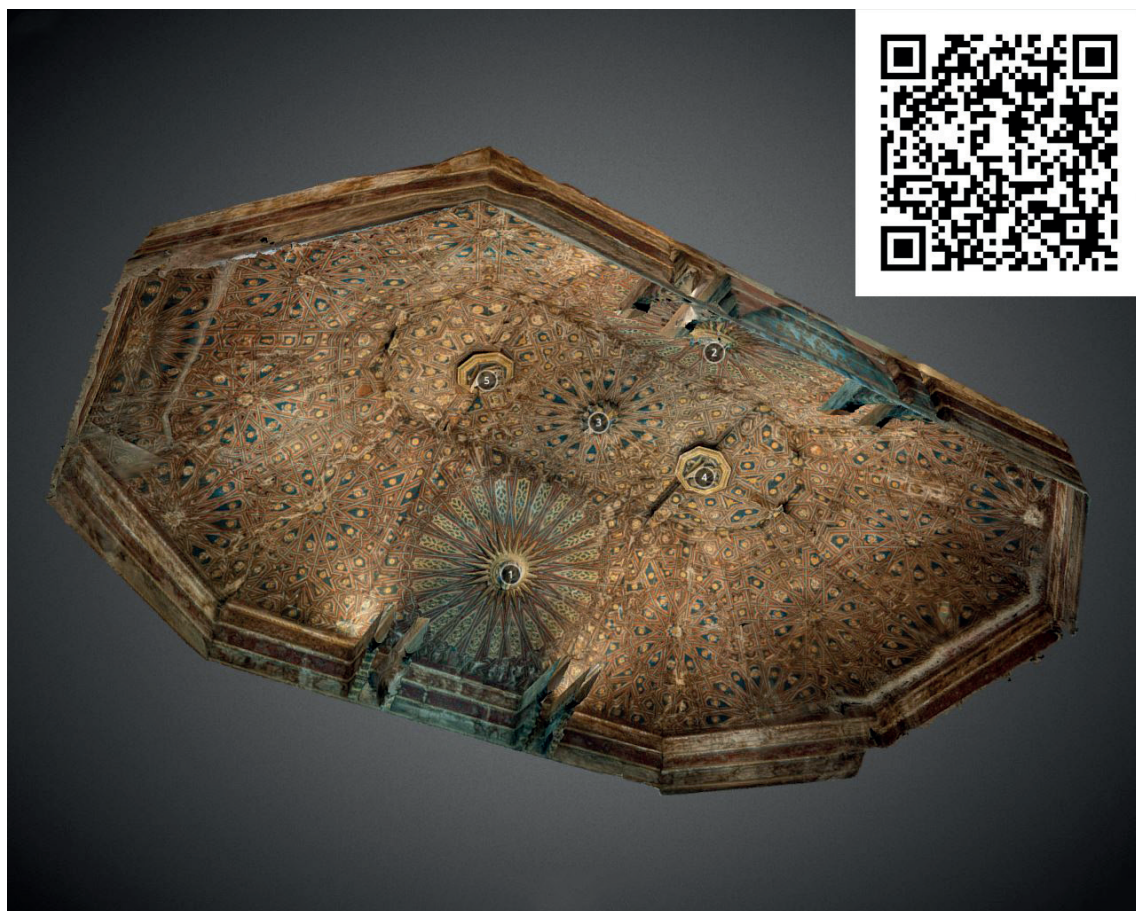
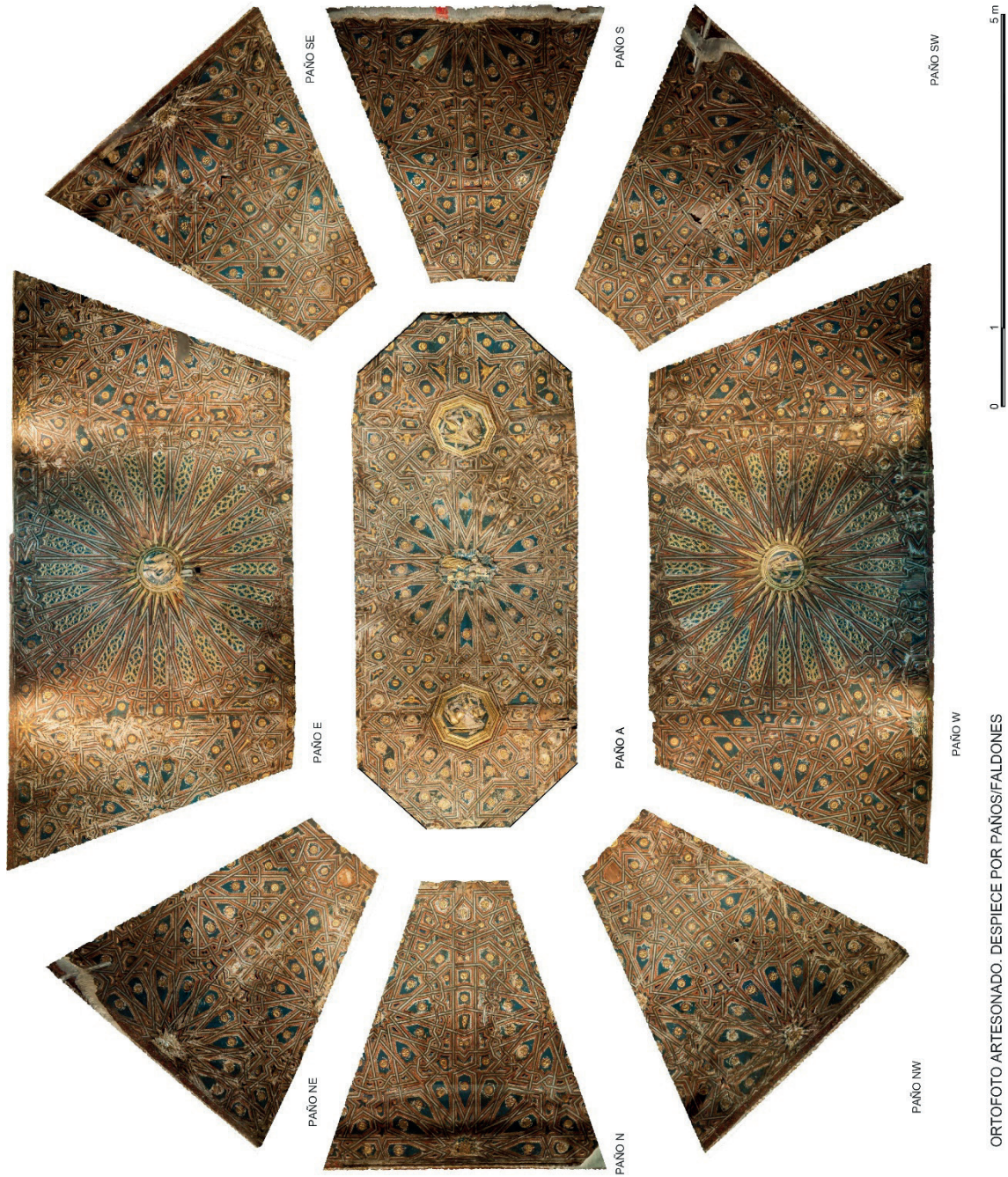
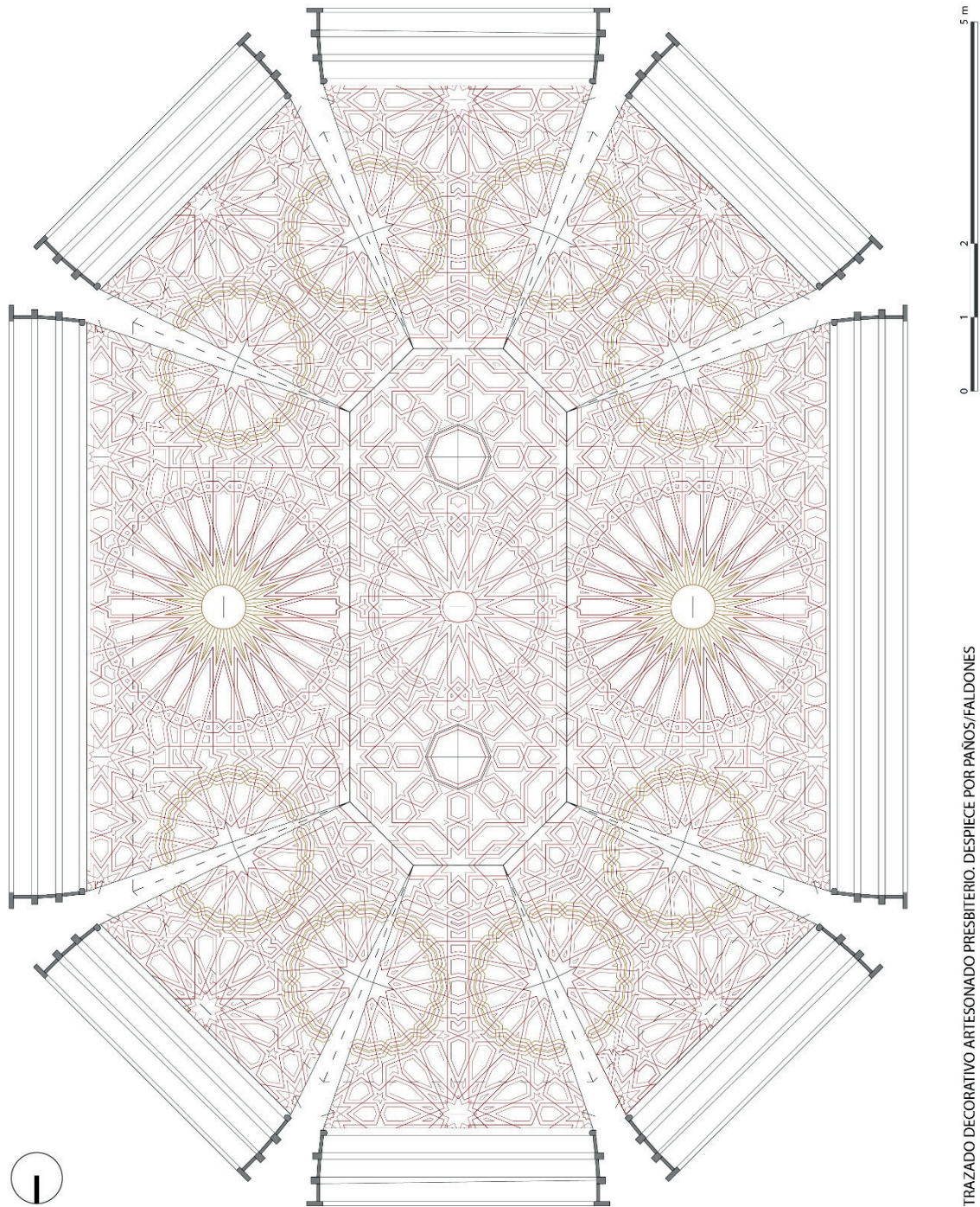


Figura 269. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3D desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7SKM>





TRAZADO DECORATIVO ARTESONADO PRESBITERIO. DESPIECE POR PAÑOS/FALDONES

CASO 8

DIGITALIZACIÓN 3D PARA DOCUMENTACIÓN

CATEDRALES DE PLASENCIA, CÁCERES



Este trabajo fue realizado en el tercer trimestre del año 2021 en colaboración con el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica y por petición de la Fundación de las Edades del Hombre y el obispado de Plasencia. El objetivo del levantamiento era documentar el interior de las dos catedrales para tener unas plantas con dimensiones precisas para elaborar el proyecto expositivo de las Edades del Hombre del año 2022.

1. Antecedentes

La catedral de Plasencia se ubica en la zona sur de la ciudad no muy alejada del río Jerte, entre la Plaza de la Catedral y la Avenida Calvo Sotelo.



Figura 270. Ortofoto aérea de la ciudad de Plasencia. Fuente: GoogleMaps

La catedral de Plasencia tiene una peculiaridad y es que son dos catedrales solapadas, la vieja del s. XIII y la nueva del s. XV. Esto es debido a que la construcción de la nueva catedral se inició con la idea de realizarla en la misma ubicación de la existente y según fueran avanzando las obras, la catedral vieja se iría derribando para usar sus piedras. Pero al no finalizar la construcción de la nueva finalmente quedaron las dos en pie e inacabadas, solapándose una sobre la otra.

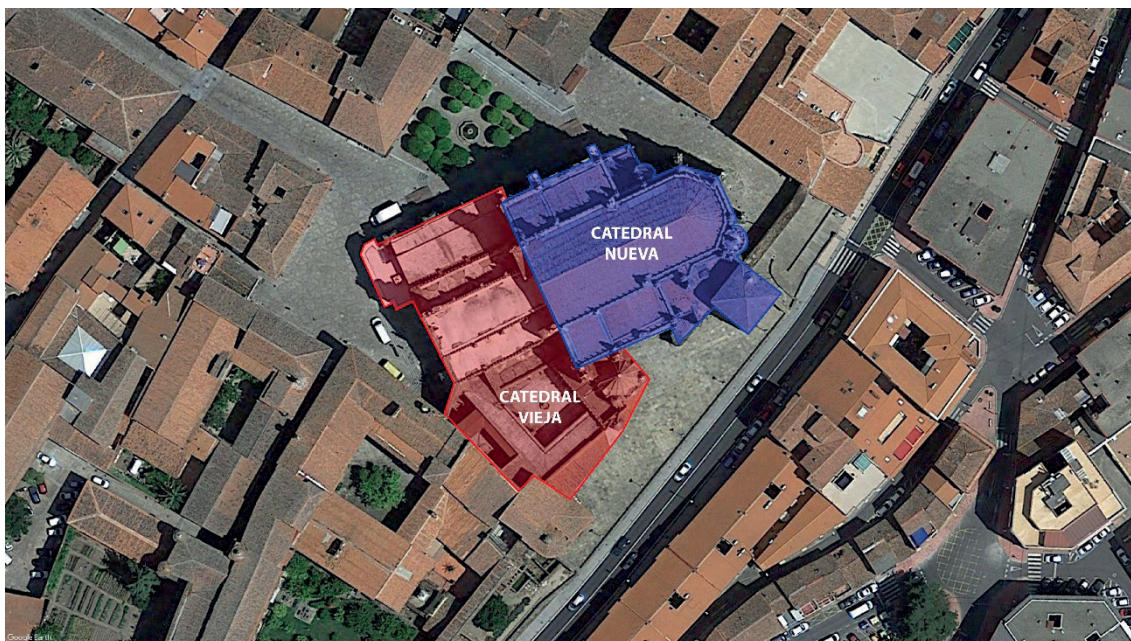


Figura 271. Imagen aérea donde se pueden diferenciar las dos catedrales. Fuente: elaboración propia

La catedral vieja o de Santa María comenzó a construirse a finales del s. XIII y fue restaurada a finales del s. XV. Las obras fueron realizadas por los maestros Remondo, Juan Francés, Juan Pérez o Diego Díaz. Actualmente quedan en pie las tres naves de la catedral sin las cabeceras porque fueron derribadas (estaban donde actualmente se ubica el coro de la catedral nueva); un claustro de forma rectangular de inspiración cisterciense con unas dependencias anexas y una torre de planta cuadrada en la que en el cuerpo inferior alberga la capilla de San Pablo (antigua sala capitular de la catedral). Esta torre es conocida popularmente en Plasencia como la “torre del melón”, llamada así por estar rematada por el exterior con una cúpula gallonada recubierta de teja de escama.

En la panda Este del claustro es donde se puede observar la unión entre las dos catedrales.

En el año 1931 fue declarado Bien de Interés Cultural.

La catedral nueva comenzó su construcción en el año 1498 por el hijo de los primeros duques de Alba y obispo de Plasencia: Gutiérrez Álvarez de Toledo y continuada a lo largo del siglo XVI, hasta que se paralizó en 1578. Durante el s. XVIII fueron retomadas sus obras hasta que transcurrido un tiempo quedó definitivamente paralizada su construcción por diferentes problemas, uno de ellos el económico. Los arquitectos que iniciaron las obras de la catedral nueva fueron Juan de Álava, Francisco de Colonia y Enrique Egas. También participaron Alonso de Covarrubias, Pedro de Ezquerro, Pedro de Ibarra, Rodrigo Gil de Hontañón y Diego de Siloé (Pizarro Gómez, 2018).

Tiene dos fachadas renacentistas de estilo plateresco, la principal iniciada por Juan de Álava y terminada por Gil de Hontañón en 1558, quien realizó el cuerpo superior, las cresterías y las agujas., que la terminó en 1558; y la otra que data entre 1538 y 1548 y está atribuida a Diego de Siloé.

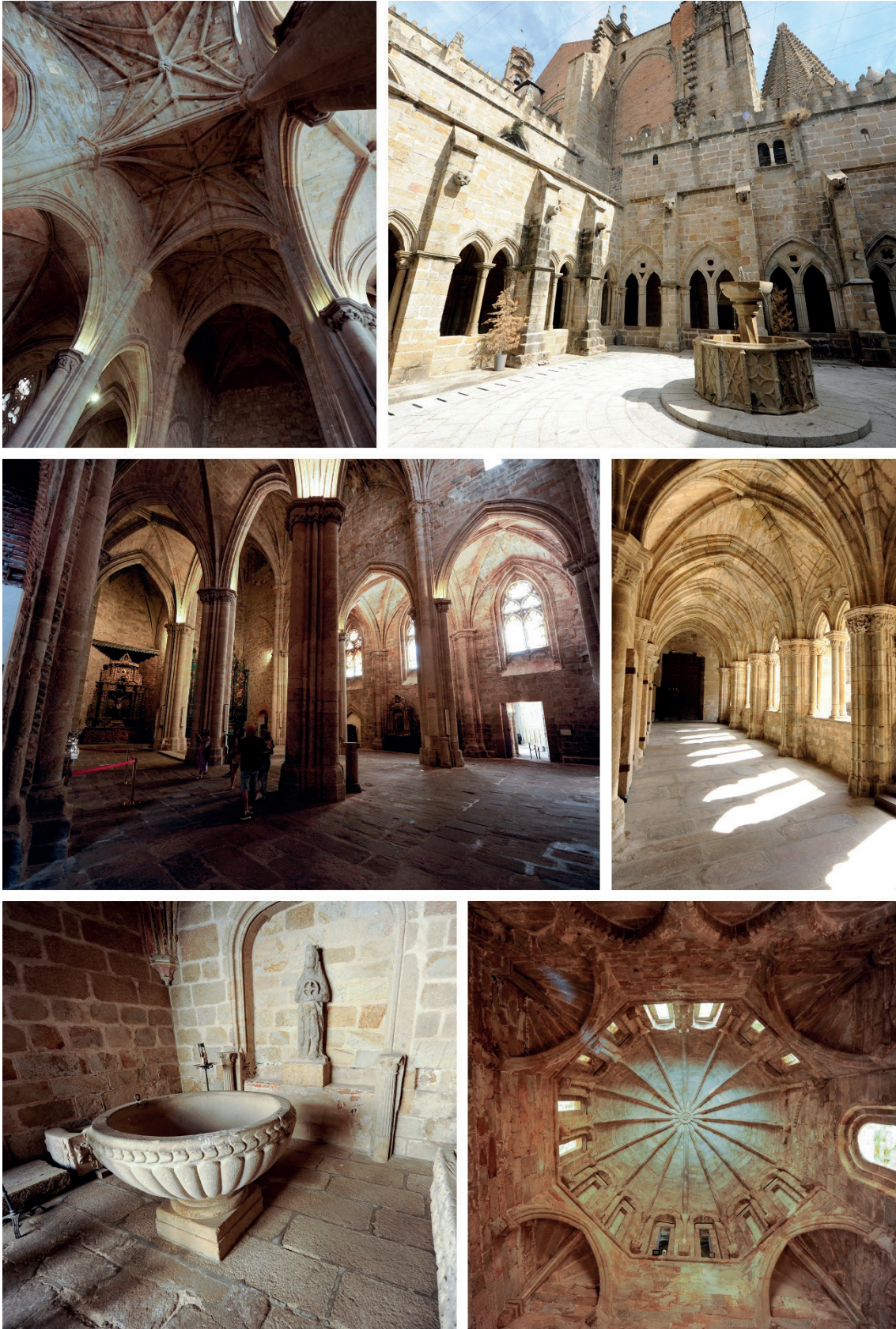


Figura 272. Fotografías de la catedral vieja. Fuente: elaboración propia

El interior de la catedral nueva tiene planta de salón de tres naves con la misma altura y rematada por un ábside mayor poligonal formando parte de la triple cabecera. Impresiona por sus enormes columnas de 26 m de altura y los nervios se van abriendo desde el pavimento hasta la bóveda formando hojas de palmera de color azul y oro. Al lado derecho de la cabecera está la sacristía y en su interior hay una escalera de caracol de mallorca que permite acceder a la parte superior de la torre.



Figura 273. Fotografías del interior de la Catedral Nueva. Fuente: elaboración propia

A los pies, rematando la nave central, se encuentra el coro. Está separado por una gran reja de hierro forjado de estilo plateresco y en su interior hay una gran sillería de madera con 41 siales en el coro alto y 26 siales en el coro bajo, todos decorados con relieves y rematados con cresterías.

2. Planificación previa del trabajo

Antes de acudir a la catedral de Plasencia a realizar la toma de datos se realizó una planificación previa del trabajo para establecer los equipos a utilizar y como realizar la toma de datos. Como el objetivo era obtener una documentación de la planta del edificio se decidió utilizar

el escáner láser para realizar una toma de datos métricos, por ser la opción más operativa y eficaz. Además, se realizaron fotografías de los diferentes espacios como apoyo a la documentación y de carácter informativo.

El equipo y software utilizado en el trabajo fue el siguiente:

EQUIPOS Y SOFTWARE UTILIZADO	
Equipos	Escáner láser Faro Focus 3D S 120
	Cámara fotográfica Nikon SLR D700
	Objetivo Nikon Nikkor AF-S 14-24 mm F2.8
	Mi Sphere Camera 360
Medios auxiliares	Trípode Manfrotto
Programas	Faro Scene
	Agisoft Metashape
	Adobe Lightroom
	UvaCAD
	AutoCAD

Tabla 46. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia

Dado que lo que interesaba era disponer de las dimensiones de los espacios del interior, todos los escaneos se realizaron dentro, a excepción de un par de ellos que se hicieron en el exterior para documentar las puertas de acceso. El posicionamiento de los escaneos se planteó a una distancia de entre 15-18 m y buscando siempre un amplio solapamiento entre ellos. Como se trata de una geometría muy definida y heterogénea se descartó el uso de referencias artificiales o dianas. Solo se utilizaron referencias naturales, propias de la geometría del edificio.

3. Toma de datos

Antes de proceder con la toma de datos se realiza una visita rápida a todo el edificio para ver los diferentes espacios y hacer un replanteo mental de las posiciones de los escaneos y el número aproximado que son necesarios realizar. Esta visita se aprovechó para ir realizando fotografías generales y de detalle. Como se ha señalado se descartó la colocación de dianas, utilizando tanto la geometría del edificio como referencias naturales para alinear los datos.

La configuración de los parámetros de escaneo fue:

- Para el exterior. Basado en el perfil de escaneo exterior de 20 m en adelante. La resolución del escaneo fue de 1/5 y de calidad 2x. Esta configuración dio como resultado una nube de puntos de alta densidad con una separación entre puntos de aproximadamente 7,67 mm a una distancia de 10 metros desde la posición del escáner láser. Los escaneos se realizaron sin color ya que solo interesaba la geometría. Con esta configuración salía un tiempo de escaneo de 2,45 minutos.

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Outdoor 20 m ...
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/5
Calidad	2x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:02:45
Tamaño de escaneo	8192 x 4268
Millones de puntos del escaneo	28,44
Resolución mm/10 m	6,136
Color escaneado	No

Tabla 47. *Parámetros de configuración de los escaneos exteriores. Fuente: elaboración propia*

- Para el interior. Basado en el perfil de escaneo interior de 10 m en adelante. La resolución del escaneo fue de 1/4 y de calidad 2x. Esta configuración va dio como resultado una nube de puntos de alta densidad con una separación entre puntos de aproximadamente 6,14 mm a una distancia de 10 metros desde la posición del escáner láser. Los escaneos se realizaron sin color ya que solo interesaba la geometría. Con esta configuración salía un tiempo de escaneo de 4 minutos.

PARÁMETRO	VALOR UTILIZADO
Perfil de escaneo	Indoor 10 m ...
Área de escaneo	Vertical de 90º a -60º Horizontal de 0º a 360º
Resolución	1/4
Calidad	2x
Tiempo de escaneo (hh:mm:ss)	00:02:50
Tamaño de escaneo	10246 x 4268
Millones de puntos del escaneo	28,44
Resolución mm/10 m	6,136
Color escaneado	No

Tabla 48. *Parámetros de configuración de los escaneos interiores. Fuente: elaboración propia*

Se realizaron un total de 106 escaneos, de los cuales 103 estaban repartidos en el interior de las dos catedrales y 3 escaneos en la zona exterior del patio de las baldosas.

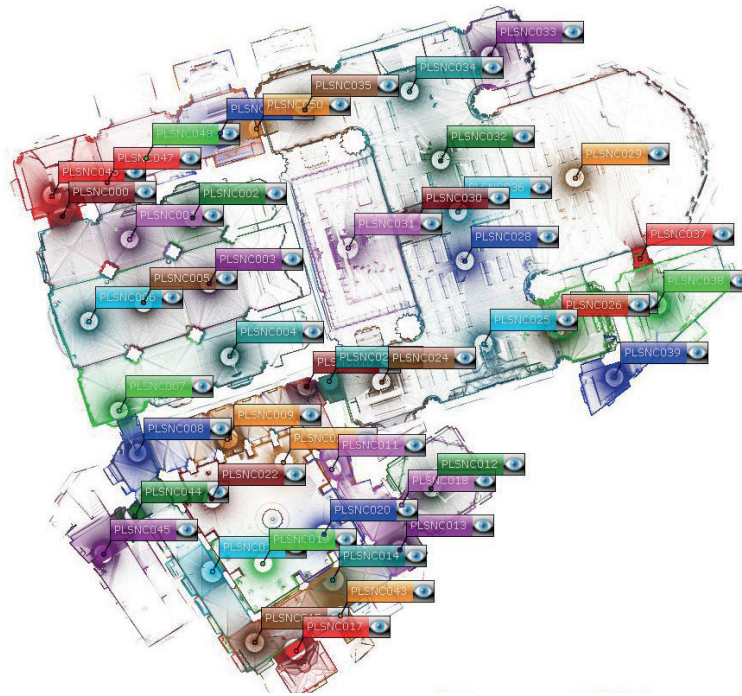


Figura 274. Distribución en planta de los escaneos realizados en el interior de la catedral. Fuente: elaboración propia

Además, se realizó una colección de 56 fotografías panorámicas esféricas en la zona del patio de las baldosas como experimento para probar la generación de un modelo fotogramétrico a partir de fotografías equirectangulares. La cámara utilizada fue una Mi Sphere Camera, se trata de una cámara de doble lente que de un solo disparo captura los 360°. Se realizaron con una separación máxima entre fotografías de 3 metros. El solapamiento vertical y horizontal de las fotografías es del 100%, ya que cada una de ellas captura todo lo que hay alrededor de la cámara. Las zonas menos fiables de estas fotografías son los extremos ya que son las zonas con mayor distorsión.

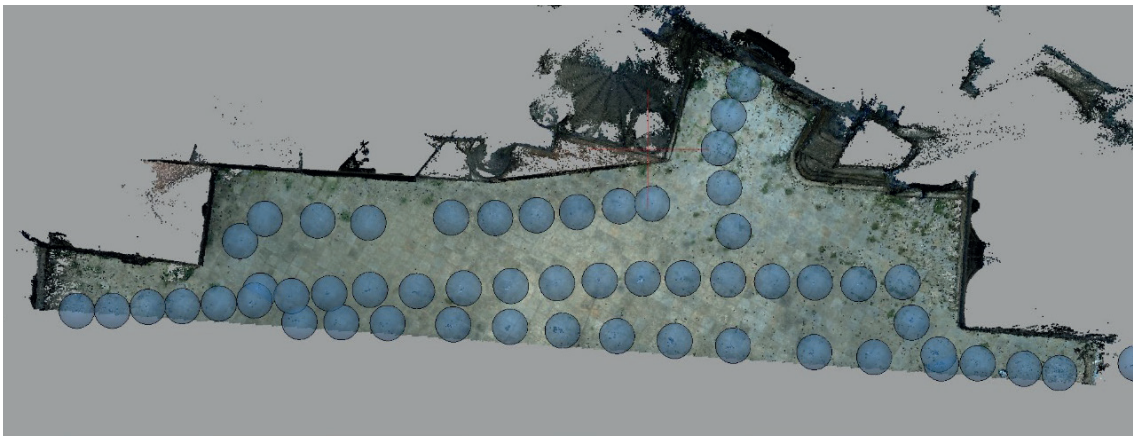


Figura 275. Distribución de las cámaras en planta. Fuente: elaboración propia

4. Resultados

El modelo completo de nube de puntos tenía zonas con muchísima densidad (zonas próximas a los estacionamientos), y estaba compuesto por aproximadamente 3.000 millones de puntos. Esta nube fue reprocesada en una única nube de proyecto para que la distribución de puntos fuera homogénea en todo el modelo. El paso de malla se estableció en un punto cada 4 mm. La nube de puntos optimizada tiene un peso de 3,12 Gb y 361.838.438 puntos.

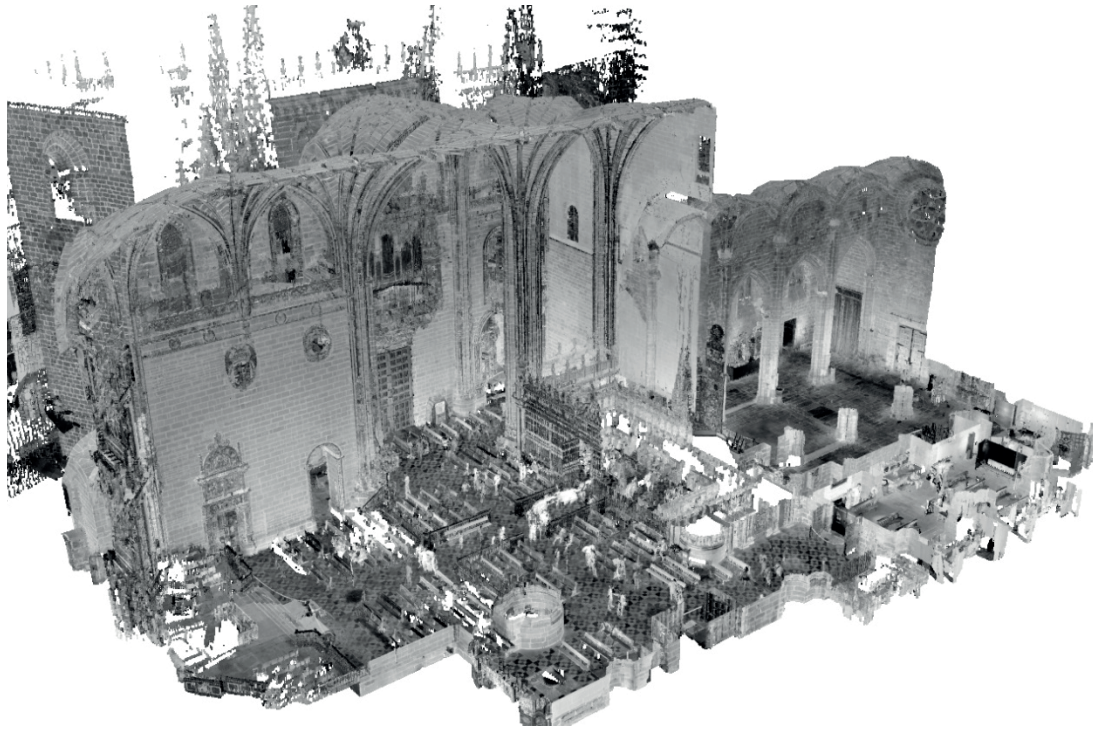


Figura 276. Nube de puntos optimizada del interior. Vista en perspectiva con sección por el eje longitudinal de la catedral nueva y la catedral vieja. Fuente: elaboración propia

Esta nube de puntos hubo que reducirla/optimizarla más para asegurar una visualización y navegación fluida a través de internet, además de poder subirla al visualizador web⁷ ya que tiene un límite de tamaño para los archivos. En este caso el límite son 2Gb de tamaño para el archivo.

A partir del modelo de nube de puntos homogeneizado se generó la documentación necesaria para definir la geometría del edificio (plantas, alzados y secciones). También se generó un modelo de malla de triángulos de la zona de la catedral vieja.

⁷ El visualizador web de nubes de puntos utilizado es PointBox. <https://www.pointbox.xyz>

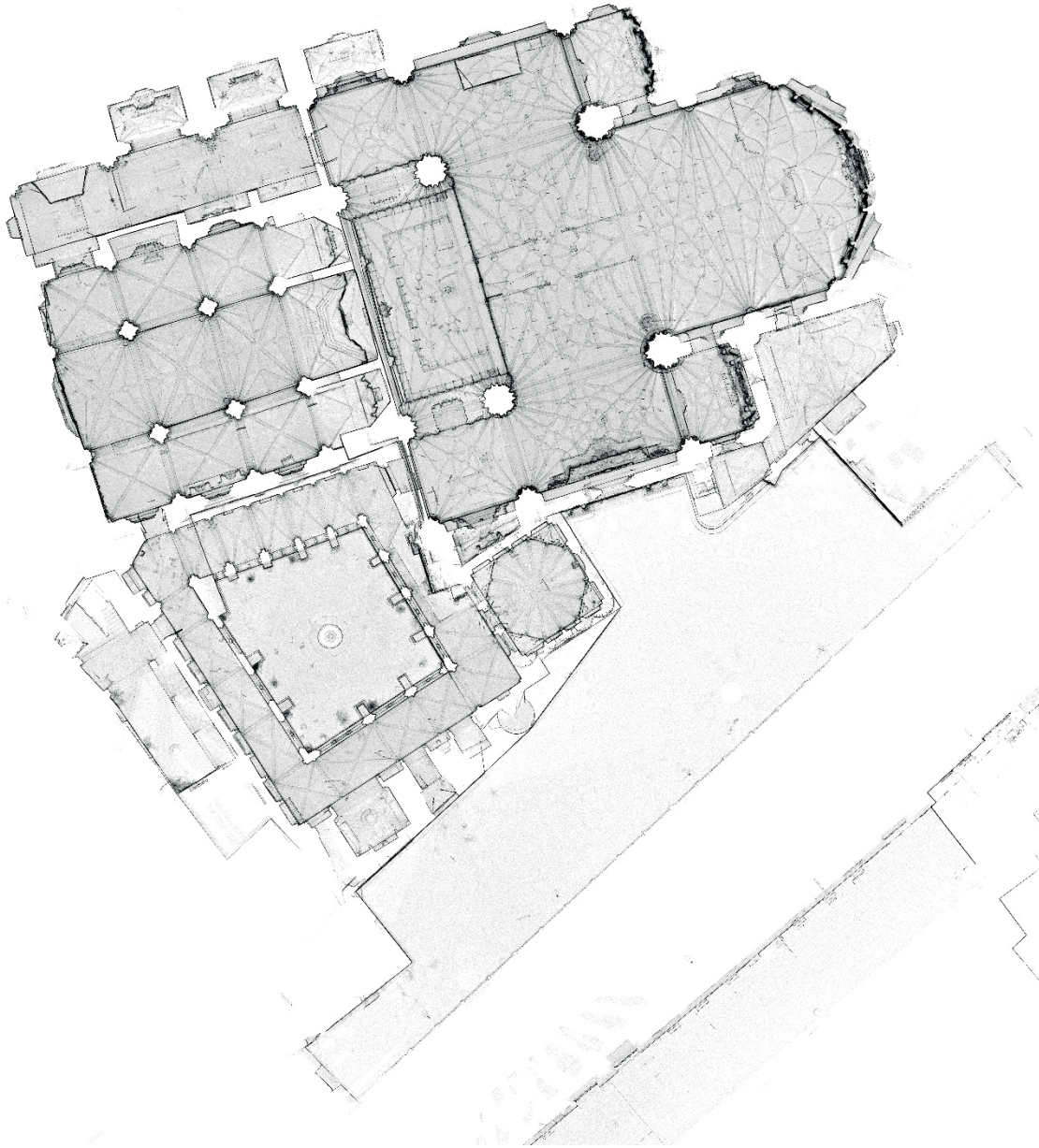


Figura 277. Planta de las catedrales obtenida a partir de las nubes de puntos. Fuente: elaboración propia

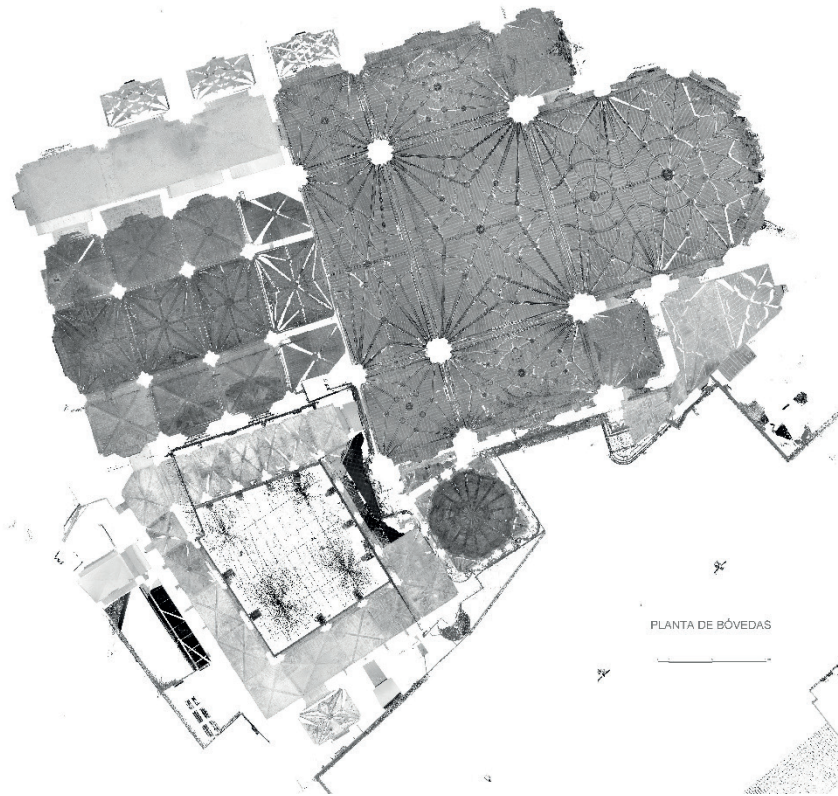
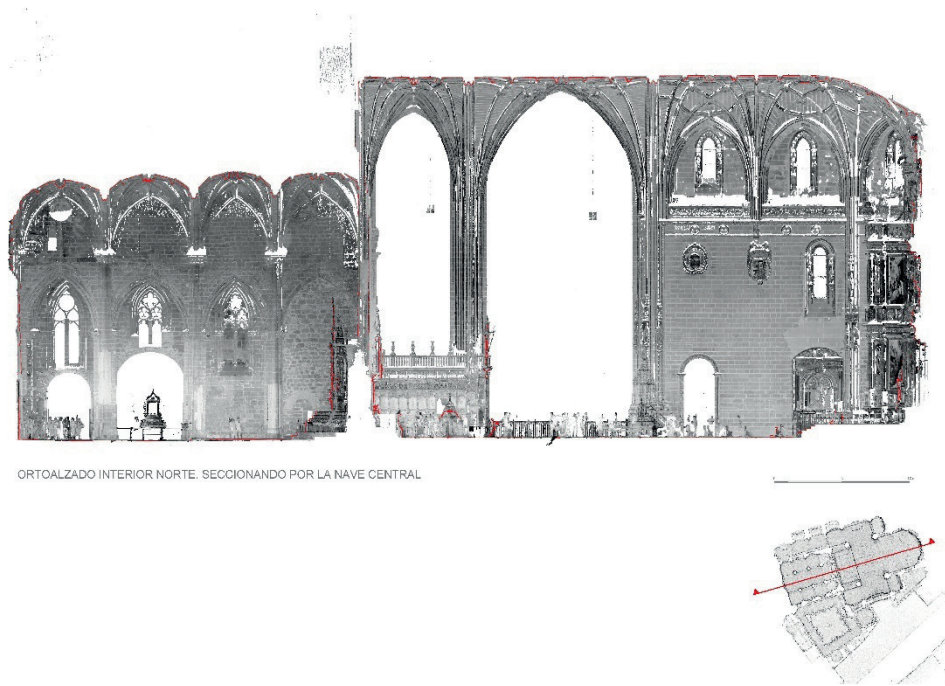


Figura 278. Planta de bóvedas obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia

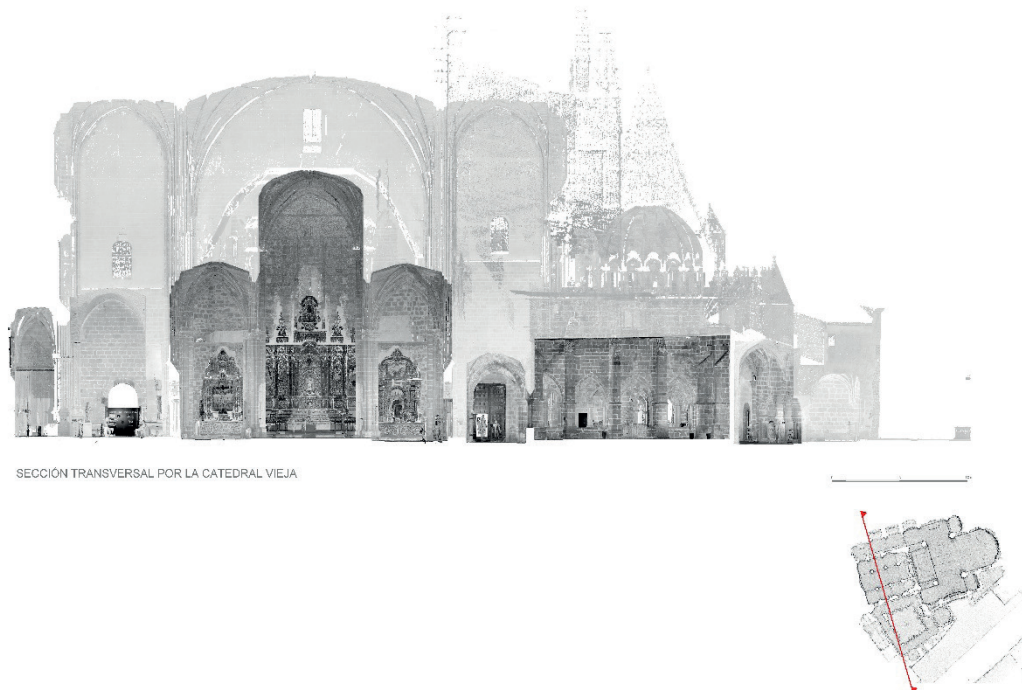


Figura 279. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia



ORTOALZADO INTERIOR NORTE. SECCIONANDO POR LA NAVE CENTRAL

Figura 280. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia



SECCIÓN TRANSVERSAL POR LA CATEDRAL VIEJA

Figura 281. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia



Figura 282. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, de la prueba realizada con fotogrametría digital, sobre la fachada que da al patio de las baldosas, a partir de fotografías esféricas dio como resultado un modelo tridimensional de 2.229.613 caras.



Figura 283. Fotografía esférica realizada con la Mi Sphere Camera para la realización del modelo fotogramétrico

Esta prueba demostró que sí es posible obtener un modelo a partir de este tipo de fotografías, pero la reconstrucción geométrica no es muy precisa. En este modelo se pudo comprobar que la franja comprendida entre la cota del suelo y aproximadamente unos 5 metros, la geometría reconstruida está bien definida, pero a partir de esa cota la geometría empieza a mostrar problemas en la reconstrucción de la malla y ruido, e incluso la textura muestra muchas deformaciones.

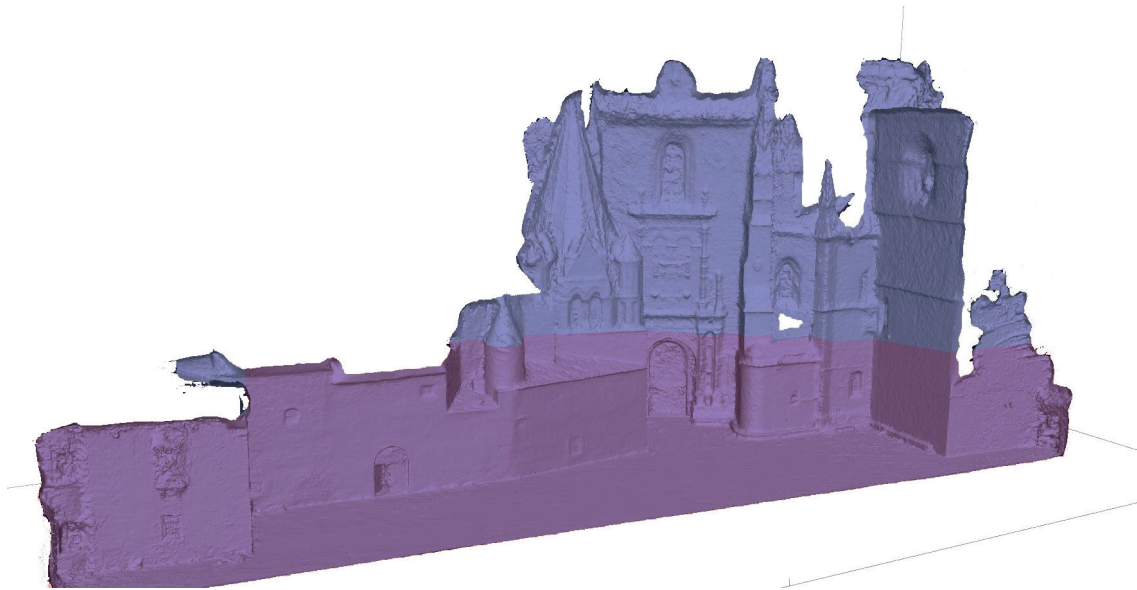


Figura 284. La franja coloreada es la que ofrece una mejor reconstrucción en la malla tridimensional. A partir de esa cota la malla empieza a mostrar deformaciones y errores

Esto se debe a que este tipo de fotografías tienen mucha distorsión en los extremos, mientras que la zona central de la foto es la que tiene menos distorsión y una definición mejor. Como las fotografías se realizaron a una cota de unos 2,5 metros, la franja comprendida en $\pm 2 - 3$ metros a partir de ese eje es la que va a tener una geometría y textura definida y precisa.

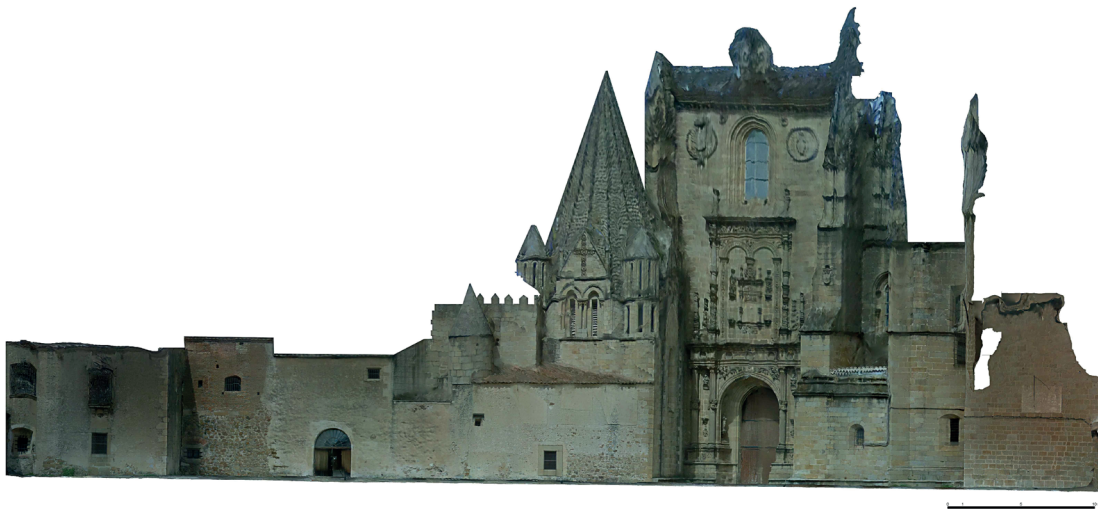


Figura 285. Ortofoto obtenida a partir del modelo fotogramétrico obtenido a partir de las fotografías esféricas. La parte inferior de la ortofoto es correcta, pero las partes superiores tienen una gran deformación o distorsión

Los modelos de malla generados a partir de las fotos esféricas del patio de las baldosas y el generado a partir de la nube de puntos de la zona de la catedral vieja, fueron subidos a la aplicación web Sketchfab para su visualización online.

El proceso seguido se orientaba a obtener un modelo 3d de nube de puntos del interior de la catedral para:

- generar documentación planimétrica para el desarrollo de un proyecto expositivo
- crear un archivo de registro del estado actual del edificio y con ese archivo 3d poder realizar cualquier consulta o medida de la zona documentada
- difusión del modelo 3d a través de herramientas web

Para alcanzar este objetivo los pasos a seguir se concretaron en:

1. Realización de tomas del interior de la catedral con el escáner Faro Focus 3D.
2. Montaje y registro de los escaneos en un único modelo de nube de puntos (importación, filtrado de puntos, alineado de puntos).
3. Exportación de nube de puntos en formato E57 y LAZ.
4. Generación de documentación planimétrica.
5. Realización de fotografías esféricas para la generación de un modelo 3d de la zona del patio de baldosas
6. Procesado de estas fotografías en Agisoft Metashape (alineación, creación de nube densa, creación de malla y texturizado de la malla).
7. Exportación del modelo 3d en formato OBJ
8. Creación de modelo 3d y nube de puntos optimizados para su difusión web

A continuación, se muestra una tabla que relaciona las diferentes fases del proyecto con el tiempo empleado en cada una de ellas:

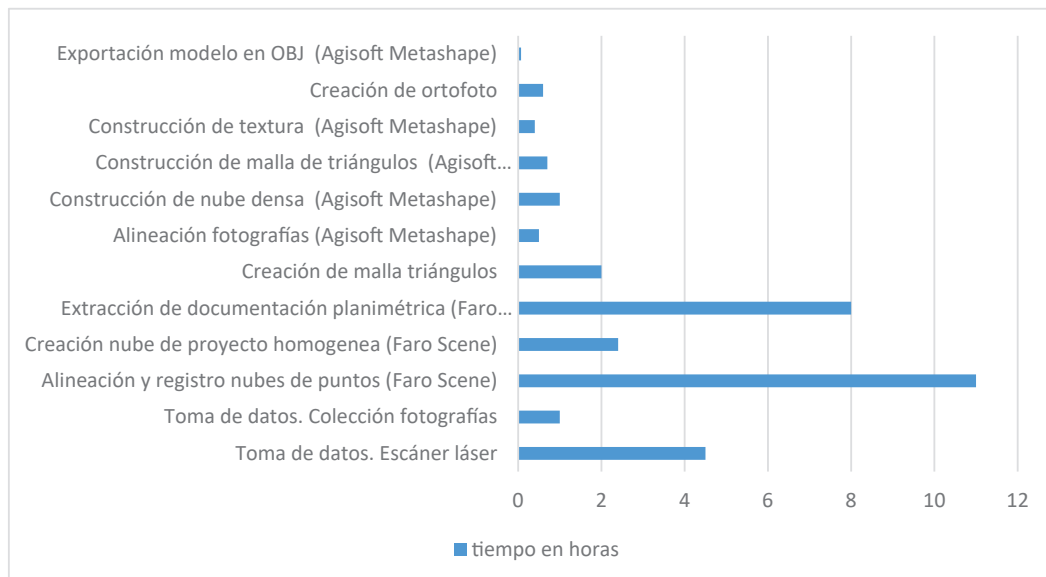


Tabla 49. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia



Figura 286. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3D desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7T1o>



Figura 287. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3D desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7T1Z>

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Una de las primeras conclusiones que se puede obtener del trabajo realizado es, que a pesar de las grandes ventajas que nos ofrecen las nuevas herramientas de digitalización 3D, sigue siendo compatible el uso de las herramientas tradicionales con las modernas. Las nuevas herramientas nos permiten capturar toda la información que define el objeto de una forma mecánica sin fijarnos en exceso en los detalles, mientras que hacer un croquis de trabajo o tomar medidas in situ con un flexómetro nos ayuda a reflexionar y entender cómo es el objeto, analizar sus estructuras y elementos en detalle, a la vez que nos ayudará a interpretar los datos en la fase de procesado, a la vez que a establecer la documentación necesaria a redactar para su adecuada representación.

El uso del escáner láser, la fotogrametría digital o el uso de drones ha reducido de forma considerable los tiempos de trabajo en la toma de datos en campo, pero ha aumentado los tiempos en la fase del procesado, ya que hay que trabajar con grandes cantidades de datos. A partir de la experiencia con los casos de estudio realizados he podido estimar que más o menos un día de toma de datos equivale aproximadamente a 2-3 semanas de procesado de los datos. En el último año de redacción de este trabajo de investigación han surgido mejoras tecnológicas en los nuevos escáneres láser, como son la incorporación de sistemas inerciales visuales (VIS) que son capaces de saber mediante un grupo de cámaras la posición exacta y orientación del escáner en todo momento. Esto facilita que mientras el escáner va capturando datos ya vaya haciendo un pre-registro de los escaneos. La combinación de estos sistemas VIS junto al resto de sensores que ya incorporaban los escáneres desde hace un tiempo (brújula, inclinómetro, barómetro y gps), reducen mucho los tiempos de procesado en la fase de registro de los escaneos, ya que al cargarlos en el programa los escaneos aparecerán ya ubicados en su posición y solo habrá que realizar un ajuste fino.

Desde el punto de vista económico las nuevas herramientas de documentación tienen precios bastante elevados, pero gracias a la evolución en la tecnología experimentada durante los últimos años ha permitido que surjan nuevas alternativas más baratas que permiten conseguir resultados con una calidad bastante aceptable. Por otro lado, el uso del escáner láser, la fotogrametría digital o los drones ha reducido los costes en la toma de datos ya que reducen el tiempo de captura de datos y no son necesarios medios auxiliares muy complejos.

Los datos obtenidos con estas nuevas tecnologías son geoméricamente muy precisos y detallados, lo que facilita el poder realizar diagnósticos de deformaciones o desplomes que visualmente o con métodos tradicionales eran difíciles de detectar. Al estar hablando de precisiones de centímetro y a veces de milímetro, esto va a permitir realizar proyectos de monitorización para observar la evolución de ese objeto en el tiempo mediante la comparación de modelos tridimensionales obtenidos en diferentes fechas.

Los avances tecnológicos en los equipos y los programas están haciendo que los resultados de precisión entre el escaneo láser y la fotogrametría digital estén cada vez más parejos. Sobre todo, se puede comprobar en la digitalización de objetos de pequeño formato, ya que las fotografías que se utilizan son de mucho detalle, lo que ayuda mucho a los programas a conseguir geometrías con mucha definición.

La calidad de un modelo obtenido por fotogrametría está directamente relacionado con la cantidad de fotografías tomadas y con el detalle que muestren estas imágenes. Es decir, a mayor número de fotografías capturadas y mayor detalle que se muestre en estas, el resultado será más preciso.

La nueva metodología de levantamiento permite generar documentación que por métodos tradicionales métricamente era muy complicado de generar, principalmente con las superficies curvas (ortofotos de superficies abovedadas, de cúpulas o el desarrollo desplegado de la superficie de un cilindro).

Los datos de color son mejores en los modelos obtenidos a partir de fotografías frente a los modelos obtenidos con escáner láser, ya que las cámaras de los escáneres no nos permiten configurar los parámetros de la cámara y tienen sensores más pequeños y de peor calidad que los sensores de las cámaras fotográficas. Si existiera una mayor configuración de las cámaras internas de los escáneres láser, este problema quizás se podría solucionar mediante la realización de horquillados de fotografías con diferentes exposiciones de iluminación, obteniendo como resultado imágenes de alto rango dinámico (HDR).

Para la construcción de ortofotos arroja un mejor resultado las obtenidas desde mallas de triángulos que las generadas desde nubes de puntos. La malla de triángulos puede ser de baja resolución, pero si la textura es buena la ortofoto resultante será de gran calidad.

Las ortofotos obtenidas con la fotogrametría digital son más completas ya que ofrecen una visión ortogonal de todas las partes del objeto y ofrecen un gran nivel de detalle y de color, lo que permite generar documentación para la lectura de paramentos más fiable y detallada que la que se obtenía por rectificación fotográfica¹. Estas ortofotos obtenidas por fotogrametría son más fidedignas a la realidad y muestran más información que un dibujo realizado sobre esa ortofoto, ya que el dibujo es fruto de la interpretación que hace la persona que lo dibuja, mientras que la ortofoto muestra la realidad tal y como es.

Los casos de estudio han permitido demostrar que la metodología planteada en el trabajo de investigación es aplicable a cualquier situación o campo de investigación. El aspecto más importante en la elaboración de un proceso de levantamiento documental es realizar una planificación previa del trabajo para poder ajustar cada método a las diferentes necesidades que motivan el trabajo y obtener un buen resultado métrico y gráfico.

En estos casos también se ha podido comprobar en qué casos es mejor realizar fotogrametría digital o utilizar el escáner láser. Cuando nos enfrentamos a un objeto de grandes dimensiones,

1 La rectificación fotográfica permitía obtener ortofotos perfectas y con gran detalle de las zonas que eran superficies grandes y planas, pero por ejemplo las molduras o superficies curvas no se rectificaban dada su complejidad. Por este motivo para obtener un ortoalzado completo de un edificio había que combinar el dibujo de línea con las ortofotos.

como pueden ser arquitecturas en las que nos interesa el interior y exterior, o espacios con geometrías muy homogéneas, como pueden ser cuevas, túneles o bosques, lo mejor sigue siendo la utilización del escáner láser. Mientras que para digitalizar objetos de tamaño mediano/pequeño (escultura, orfebrería, etc.) lo mejor es utilizar fotogrametría digital. En este último caso sí que será necesario hacer uso de marcadores con apoyo métrico para poder escalar nuestro modelo, ya que las fotografías por si solas no tienen carácter métrico.

Cuando los objetos a documentar sean zonas elevadas o superficies de grandes extensiones, como terrenos, canteras o infraestructuras urbanas, lo más recomendable es el uso de fotogrametría realizada con dron. En el caso de que la normativa vigente no permita utilizar el dron la solución será realizarlo mediante el uso de pértigas telescópicas u otros sistemas como el cablecam².

En el caso de la arquitectura, las nuevas aplicaciones de realidad virtual o realidad aumentada se han convertido en una herramienta muy importante de accesibilidad, ya que permiten a cualquier persona sin importar su movilidad o el lugar en donde se encuentre, poder navegar por los espacios de forma libre y fluida.

Los modelos obtenidos con escáner láser o fotogrametría tienen la ventaja de que ofrecen una precisión y detalle del objeto real muy importante, pero el inconveniente de esto es que los archivos resultantes son de gran tamaño, lo que dificulta mucho su manejabilidad. Sobre todo, cuando los queremos utilizar en la difusión mediante tecnologías de realidad virtual o realidad aumentada. El único camino para salvar este contratiempo será, realizar un proceso de optimización de los modelos 3d para reducir lo máximo posible su tamaño de polígonos sin perder calidad y así facilitar su visualización con estas herramientas.

La realidad virtual y la realidad aumentada son unas herramientas muy interesantes como aplicación a la difusión de cualquier trabajo de levantamiento. Mientras que la VR tiene un flujo de trabajo muy sencillo, la AR tiene un flujo de trabajo más complejo por la dificultad de poder transformar los archivos OBJ en archivos USDF especiales para este tipo de realidad. Al tratarse de una tecnología tan reciente la transformación de los archivos 3d en el formato estándar de AR con extensión USDF, en estos momentos es muy limitada y casi no existen alternativas para poder realizar esta transformación de forma directa desde los programas de fotogrametría y de modelado. Próximamente irán apareciendo alternativas mediante actualizaciones de estos programas o mediante desarrollos externos como plugins o addons, que evitarán que este tipo de conversiones solo las puedan realizar programadores de software con cuentas de desarrollador de aplicaciones web.

² El cablecam es una herramienta que consiste en un soporte de cámara con estabilizador y un sistema móvil que se desplaza por una cuerda colgada en dos extremos de longitud máxima 200 metros, a velocidades de casi 50km/h. Permite generar imágenes de gran precisión en entornos complejos o zonas donde el dron no puede volar y en interiores.

CAPÍTULO 6. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

El trabajo de investigación realizado nos ha generado nuevas expectativas de investigación, que permiten proponer varias líneas de trabajo futuro.

En relación a las tecnologías investigadas:

- Estudiar las nuevas formas de integración de modelos fotogramétricos en Unreal Engine mediante Nanite. Esta es una nueva tecnología que van a implementar en los próximos años y que es revolucionaria porque permite cargar modelos fotogramétricos con millones de triángulos sin necesidad de ser optimizados.
- El año 2022 va a ser un año de gran innovación en el campo de la realidad aumentada con la aparición de nuevos dispositivos a precios muy asequibles, lo que va a facilitar mucho el desarrollo de nuevos contenidos para estos equipos. Serán una alternativa muy interesante para utilizar en el patrimonio ya que son dispositivos tipo gafa lo que hace que la experiencia sea más inmersiva que los dispositivos móviles que utilizamos en la actualidad (tablets y smartphones). Será necesario estudiar la forma de integrar información en los modelos fotogramétricos para que estos se adapten a la geometría real vista a través de estos dispositivos en tiempo real.

En relación a los casos de estudio realizados:

- Estudiar y documentar los edificios religiosos de grandes arcos localizados en Castilla y León para analizar sus características formales y poder establecer una hipótesis del por qué, de esta tipología de edificaciones y su construcción en una zona concreta del territorio.
- Aumentar el estudio y digitalización de mayor número de edificios conventuales, en particular de la misma orden religiosa, con el fin de poder analizar y comprobar si la distribución espacial de estos edificios es común a todos ellos, obedece a un patrón establecido, o realmente es fruto de la adaptación del edificio a las necesidades de la vida diaria del convento.
- Desarrollar una propuesta de acción sistemática de registro documental de datos de edificios deteriorados o amenazados de ruina que permita disponer de una base de datos presta a su utilización.

CAPÍTULO 7. DIFUSIÓN DEL TRABAJO

Durante estos años de desarrollo de la tesis doctoral algunas partes de la investigación referidas a la metodología de levantamiento o algunos de los casos de uso han sido divulgados en publicaciones o congresos científicos.

1. CONFERENCIAS

- “La digitalización, base del proceso documental para la pervivencia de los bienes culturales” impartida en el curso de verano Patrimonio Cultural de las órdenes mendicantes en la Ribera del Duero de la Universidad de Burgos. 2015

2. ARTÍCULOS PUBLICACIONES

- MARCOS GONZÁLEZ, D. Y SÁNCHEZ RIVERA, J. I. *El Convento de los Valles en Torresandino: tristes ruinas de la presencia mendicante entre el Duero y el Cerrato*. 2016. Revista Biblioteca 31. ISSN: 1132-225X. págs. 55-90

3. COMUNICACIONES A CONGRESOS

- MARCOS GONZÁLEZ, D.; PATANE, C; MARTÍNEZ RUBIO, J.; FERNÁNDEZ MARTÍN, J.J.; SAN JOSÉ ALONSO, J.; MORILLO RODRÍGUEZ, F. y ANTONIO GARCÍA, L.A. *Make of/Sign La Calzada de Béjar Graphic Narration of a Village*. EGA 2020, SSDI 7, pp. 157–165, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-47987-9_13
- MARCOS GONZÁLEZ, D; SÁNCHEZ RIVERA, J. I. Y SAN JOSÉ ALONSO, J. I. *El convento carmelita de Los Valles en Torresandino (Burgos): del abandono del pasado al futuro digital*. X Congreso Internacional AR&PA: Patrimonio inteligente, territorio inteligente. 2016
- MARCOS GONZÁLEZ, D.; GARCÍA GARCÍA, L. A.; SAN JOSÉ ALONSO, J. I. Y SÁNCHEZ RIVERA, J. I. *Virtualización del Patrimonio Arquitectónico caído. La torre de la iglesia de San Esteban en Valdespina, Palencia*. REHABEND 2016. Burgos. págs. 2463-2470

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

Libros y artículos

- A, A., A, F., GIRARDI, S., GONZO, L., REMONDINO, F., & KESSLER, F. (2009). Digital preservation, documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital cameras and range
- ALONSO, B., BARBA, S., & ALVARO-TORDESILLAS, A. (2016). Cultural heritage documentation. Method based on the fusion of optical scanning triangulation and photogrammetric techniques [Documentación del Patrimonio Cultural. Método basado en la fusión de técnicas fotogramétricas y de escaneado óptico de triangulación]. *EGA Revista de Expression Grafica Arquitectonica*, 21, 236–245. <https://doi.org/10.4995/ega.2016.6308>
- ALONSO, J., MARTÍNEZ-RUBIO, J., FERNANDEZ, J., & GARCIA FERNANDEZ, J. (2012). Comparing time-of-flight and phase-shift. the survey of the royal pantheon in the basilica of san isidoro (león). *isprs - international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, xxxviii-5/, 377–385. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-5-w16-377-2011>
- ALVARO-TORDESILLAS, A., & MONTES SERRANO, C. (2013). El dibujo en la enseñanza de arquitectura: el boceto manual y el modelo fotogramétrico. Conferencia International Meeting on Drawing, Image and Research: DUT. Drawing in the University Today. Oporto 2013
- ÁNGEL J. FERNÁNDEZ ÁLVAREZ. (2010). De las arquitecturas virtuales a la realidad aumentada un nuevo paradigma de visualización arquitectónica. X Congreso Internacional de Expresión Gráfica Aplicada a La Edificación: Nuevas Líneas de Investigación En Ingeniería de Edificación. Alicante, 2, 3 y 4 de Diciembre, 2010, ISBN 978-84-2681-528-6, Págs. 111-120, 111–120.
- BARBA, S., ANTINOZZI, S., & GUJSKI, L. (2019). Immagini sferiche per il patrimonio costruito: rilievo e documentazione con insta360 one x. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30394.13760>
- BARBA, S., DI FILIPPO, A., FERREYRA, C., & LIMONGIELLO, M. (2020). A pipeline for the integration of 3D data on aerophotogrammetric frameworks. The case study of Villa Rufolo.
- BUILL, F., NÚÑEZ, A.M., RODRÍGUEZ, J. J. 2008. *Fotogrametría Arquitectónica*. ISBN 978-84-8301-920-7
- BUILL, FELIPE & NÚÑEZ, M. & LANTADA, NIEVES & ALBERT, PRADES. (2016). Comparison of Photogrammetric Techniques for Rockfalls Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. DOI: 10.1088/1755-1315/44/4/042023.
- BUILL, FELIPE & NÚÑEZ, M. & REGOT, JOAQUÍN. (2013). Técnicas de captura masiva de datos para el levantamiento y modelado de monumentos medievales. *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*. 18. DOI: 10.4995/ega.2013.1525.
- BUILL, FELIPE & NÚÑEZ, M.. (2008). Aplicación del láser escáner terrestre para levantamientos arquitectónicos, arqueológicos y geotécnicos. *Mapping*, ISSN 1131-9100, Nº 124, 2008, pags. 46-49. 124.

- CABEZOS-BERNAL, P.M., BARROS COSTA, H., IÑARRA-ABAD, S. (2019). Symbiosis between panoramic photography, CGI and freehand drawing in landscape representation. *Revista DisegnareCon*. Vol. 12. 22. 4-1-4.11
- CABRELLES, M., & LERMA, J. (2017). Documentación 3d de la cova dels cavalls y de su entorno (tírig, castellón). <https://doi.org/10.4995/CIGeo2017.2017.6627>
- CAIZA INFANTE, Á., ROBAYO JÁCOME, D., & MEDINA CHICAIZA, R. P. (2016). Reconocimiento de fachadas mediante realidad aumentada como medio publicitario. *3c Tecnología*, ISSN-e 2254-4143, Vol. 5, No. 2, 2016 (Ejemplar Dedicado a: 3C Tecnología - Edición No 18), Págs. 54-64, 5(2), 54–64.
- CAMPI, M., DI LUGGO, A., PALOMBA, D., & PALOMBA, R. (2019). Digital surveys and 3d reconstructions for augmented accessibility of archaeological heritage. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 205–212. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-205-2019>
- CAMPI, M., DI LUGGO, A., & SCANDURRA, S. (2017). 3d modeling for the knowledge of architectural heritage and virtual reconstruction of its historical memory. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 133–139. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-133-2017>
- CANCIANI, M., CONIGLIARO, E., GRASSO, M., PAPALINI, P., & SACCONI, M. (2016). 3d survey and augmented reality for cultural heritage. The case study of aurelian wall at castra praetoria in rome. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 931–937. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-931-2016>
- CASTRO GARCÍA, M., ROJAS SOLA, J. I., & CARRANZA CAÑADAS, M. P. (2011). Realidad aumentada aplicada al patrimonio histórico molinar. *Virtual Archaeology Review*, ISSN-e 1989-9947, Vol. 2, No. 3 (Abril 2011), 2011, Págs. 83-86, 2(3), 83–86.
- CHÍAS, P., ABAD, T., DE MIGUEL, M., GONZALEZ-FIERRO, G., & VALIENTE, E. (2019). 3d modelling and virtual reality applied to complex architectures: an application to hospitals' design. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 255–260. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-255-2019>
- CHÍAS NAVARRO, Pilar; ABAD BALBOA, Tomás; (ed.) .El Patrimonio fortificado. Cádiz y el Caribe: una relación transatlántica / The Fortified Heritage. Cadiz and the Caribbean: A Transatlantic Relationship. Alcalá de Henares. 2012. 470. ISBN: 978-84-8138-942-5.
- COSTANTINO, D., PEPE, M., & ALFIO, V. (2020). Point Cloud accuracy of Smartphone Images: Applications in Cultural Heritage Environment. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9, 6259–6767. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/305942020>
- DONADIO, E., SAMMARTANO, G., CHIABRANDO, F., LINGUA, A., & SPANO, A. (2015). Reality based modelling training. Photomodelling and LiDAR techniques for the St. Uberto Church in Venaria Reale.
- ESTEVE, P., OLIVER, S., HERRAEZ, J., DENIA, J., SÁNCHEZ, M., & PEREÑA, J. (2017). Restoration of paintings on domes with non-developable geometry (Los Santos Juanes Church in Valencia). *International Journal of Architectural Heritage*, 12. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1356946>

- FALCONE, M., DI LUGGO, A., CAMPI, M., REPOLA, L., CERA, V., SCANDURRA, S., & PULCRANO, M. (2019). Evaluation of historical heritage documentation: reality based survey and derivative models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W17, 115–122. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-115-2019>
- FALCONE, M., ORIGLIA, A., CAMPI, M., & MARTINO, S. (2021). From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data management for cultural heritage CONSERVATION WITH DIGITAL TWINS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B4-2, 47–53. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-47-2021>
- FERNANDEZ, J., SAN JOSÉ, J., MARTÍNEZ, J., & FINAT, J. (2005). Multiresolution Surveying of complex façades: a comparative analysis between digital photogrammetry and 3d laser scanning.
- FERNANDEZ, J., SAN JOSÉ, J. *Fotogrametría aplicada a la arquitectura. Resumen de las II Jornadas de Fotogrametría Arquitectónica*. Valladolid. 1998.
- GARCIA FERNANDEZ, J., SOCCI, L., & FERNANDEZ, J. (2013). Methodology of efficient assessment of structural deformation from non-intrusive techniques for civil heritage conservation.
- GISBERT, ANDRÉS & REGOT, JOAQUÍN & ANDRÉS, M^a & BUILL, FELIPE. (2009). Métodos y procesos para el levantamiento de reconstrucción tridimensional gráfica de elementos del patrimonio cultural. La iglesia de Sant Sever de Barcelona. *EGA Revista de expresión gráfica arquitectónica*. 14. DOI: 10.4995/ega.2009.10240.
- FLORES GUTIERREZ, M., RUFETE MARTÍNEZ, T., MACANÁS VIDA, J., MARTÍNEZ GARCÍA, J., LÓPEZ MARTÍNEZ, C. M., & RAMOS MARTÍNEZ, F. (2011). Visor de Realidad Aumentada en Museos (RAM) para Exposiciones Situadas en Entornos Cerrados. *Virtual Archaeology Review*, ISSN-e 1989-9947, Vol. 2, No. 3 (Abril 2011), 2011, Págs. 87-91, 2(3), 87–91.
- FREGONESE, L., & ADAMI, A. (2020). The 3D Model of St. Mark's Basilica in Venice (pp. 343–354). https://doi.org/10.1007/978-3-030-33570-0_31
- FUENTES, L., FINAT, J., FERNANDEZ, J., MARTÍNEZ, J., & SANJOSE, J. (2007). Some Experiences in 3D Laser Scanning for Assisting Restoration and Evaluating Damage in Cultural Heritage (pp. 543–551). https://doi.org/10.1007/978-3-540-72310-7_65
- GONZÁLEZ-AGUILERA, D., LAHOZ, J., FINAT, J., MARTÍNEZ, J., FERNANDEZ, J., & SAN JOSÉ, J. (2006). Terrestrial laser scanning and low-cost aerial photogrammetry in the archaeological modeling of a jewish tanneries.
- HERNÁNDEZ GARRIDO, J. L. (2018). Capitel sencillo con Ascensión de Cristo y Apostolado. In *Fundación Las Edades del Hombre* (Ed.), Mons Dei (pp. 74–75).
- HERRAEZ, J., NAVARRO, P., DENIA, J., MARÍA, T., & RODRÍGUEZ, J. (2013). Modeling the thickness of vaults in the church of santa maria de magdalena (Valencia, Spain) with laser scanning techniques. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.015>
- JUNYENT, E., TARTERA, E., GRANOLLERS, T., LORÉS, J., & RAIMAT, G. (2003). Análisis y diseño de una visita guiada a la Fortaleza de Arbeca en realidad aumentada. In *II Congrès Internacional sobre museïtzació de jaciments arqueològics*, Barcelona 7, 8 i 9 d'octubre de 2002 (pp. 265–269). Museu d'Història de la Ciutat.

- LERMA, J., CABRELLES, M., & NAVARRO, S. (2015). Fusion of range-based data and image-based datasets for efficient documentation of cultural heritage objects and sites. In ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: Vols. XL-5/W7. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-277-2015>
- LERMA, J., CABRELLES, M., NAVARRO, S., & FABADO, S. (2013). From Digital Photography to Photogrammetry for Cultural Heritage Documentation and Dissemination. DISEGNARECON, 6. <https://doi.org/10.6092/issn.1828-5961/3850>
- MARCOS, D., GARCÍA, L. A., SAN JOSÉ, J. I., & SÁNCHEZ, J. I. (2016). Virtualización del patrimonio arquitectónico caído. La Torre de la Iglesia de San Esteban en Valdespina, Palencia. REHABEND, 2016-May.
- MOLINA SILES, P., CORTINA MARUENDA, F.J., BARROS COSTA, H., GILABERT SANZ, S. (2018). 3d printing as a technological tool geared towards architecture. ISBN 3-319-58855-9, págs. 1063-1073. Architectural draughtsmanship. From analog to digital narratives. Ed. Springer
- MORALES, J., BUILL, F., & NAVAS, J. (2014). Utilización de técnicas láser escáner y de fotogrametría terrestre para el estudio de desprendimientos de rocas: el caso de la zona de más riesgo del tren cremallera de Núria. Mapping, ISSN 1131-9100, No 103, 2005, Pags. 26-33.
- MOUSSA, W. (2014). Integration of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for cultural heritage data recording.
- NAVARRO ESTEVE, P., HERRÁEZ BOQUERA, J., MORA FLORES, A., BARROS E COSTA, H., DENIA RÍOS, J.L. (2011). Aplicaciones de la tecnología de digitalización tridimensional por la coordinación de monumentos históricos del instituto nacional de arqueología e historia (INAH) en México DF. (2009 y 2010). EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica 16 (17), 42-53
- NOCERINO, E., MENNA, F., & GRUEN, A. (2021). Bundle adjustment with polynomial point-to-camera distance dependent corrections for underwater photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-B2-2021, 673–679. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-B2-2021-673-2021>
- NOCERINO, E., STATHOPOULOU, E., RIGON, S., & REMONDINO, F. (2020). Surface Reconstruction Assessment in Photogrammetric Applications. Sensors, 20. <https://doi.org/10.3390/s20205863>
- NÚÑEZ, M., BUILL, F., REGOT, J., & GISBERT, A. (2012). Generation of virtual models of cultural heritage. Journal of Cultural Heritage - J CULT HERIT, 13. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.06.004>
- OLIVERO, L. F., ROSSI, A., & BARBA, S. (2019). A Codification of the Cubic Projection to Generate Immersive Models. 4, 53–63. <https://doi.org/10.26375/disegno.4.2019.07>
- PALOMBA, D., CAMPI, M., CIRILLO, V., DI LUGGO, A., FACCHINI, M., IADEROSA, R., IOVANE, D., & ZERLENGA, O. (2019). MULTI-SCALAR SURVEYS FOR COMPLEX ARCHITECTURES. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W18, 151–158. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-151-2019>
- PEPE, M., DOMENICA, C., ALFIO, V., RESTUCCIA, A., & PAPALINO, N. (2021). Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site. Journal of Cultural Heritage. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.006>
- PEREZ-MONEO, J.-D., FINAT, J., FERNANDEZ, J., SANJOSE, I., & MARTÍNEZ-RUBIO, J. (2012). Uva-CAD: a software platform for 3d architectural surveying

- PICON-CABRERA, I., RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P., TOSCHI, I., REMONDINO, F., & GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2021). Reconstrucción de edificios y análisis urbanístico de centros históricos con fotogrametría aérea. *Informes de La Construcción*, 73, e398. <https://doi.org/10.3989/ic.79082>
- PIZARRO GÓMEZ, F. J. (2018). *La catedral de Plasencia: compendio de un patrimonio histórico, religioso y cultural* (Tecnigraf editores (ed.)).
- RAPOSO GRAU, JAVIER FCO. *Revista OBJETIVO BIM*. "Paso del CAD al BIM: Comparativa del Software de Autodesk: AutoCad versus Revit.". Pp. 20-22. Febrero 2017. Web: <https://www.objetivobim.com>
- RIZZI, A., BARATTI, G., JIMÉNEZ FERNÁNDEZ-PALACIOS, B., GIRARDI, S., & REMONDINO, F. (2012). 3D recording for 2D delivering - The employment of 3D models for studies and analyses. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 38, 301–309. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVI-II-5-W16-301-2011>
- ROBINS, G., & SHUTE, C. (1987). *The Rhind Mathematical Papyrus: An Ancient Egyptian Text* (British Museum (ed.)).
- ROLDÁN HERVÁS, J. M. (1971). *Iter ab Emerita Astvricam. El Camino de la Plata* (Universida).
- RUIZ TORRES, D. (2013). *La realidad aumentada y su aplicación en el patrimonio cultural*. Trea.
- SALERI, R., CAPPELLINI, V., NONY, N., DE LUCA, L., PIERROT-DESEILLIGNY, M., BARDIERE, E., & CAMPI, M. (2013). UAV photogrammetry for archaeological survey: The Theaters area of Pompeii. *Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions FromCAA, Arqueologica 2.0 et Al., 2*, 497–502. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6744818>
- SALGADO DE LA ROSA, MARÍA ASUNCIÓN; RAPOSO GRAU, JAVIER FCO.; BUTRAGUEÑO DÍAZ-GUERRA, BELÉN MARÍA. *Retórica gráfica. El dibujo del arquitecto como herramienta de comunicación crítica. Arte, Individuo y Sociedad*, Vol. 31, No.1 (2019). 31 - 1, pp. 593-110. 09/2017. ISSN 1131-5598. <http://dx.doi.org/10.5209/ARIS.58826>
- SAN JOSÉ ALONSO, J.I (2018), Levantamiento, tecnología y documentación de la arquitectura. Vol. 23, Núm. 34 (2018): *Conversando con... RCR arquitectes* (parte 1), 240-251. <https://doi.org/10.4995/ega.2018.10937>
- SANCHEZ RIVERA, J., BARBA, S., & CHAVEN CARRA, L. (2020). Primer levantamiento del puente de Maderuelo: actuaciones de emergencia para documentar un puente de presencia intermitente. 34, 147–172.
- SAINT AUBIN, J. 1992. *Le relevé et la représentation de l'Architecture*. Paris: Association Etudes, loisirs et Patrimoine, Documents et méthodes.
- TORRESANI, A., & REMONDINO, F. (2019). Videogrammetry vs photogrammetry for heritage 3d reconstruction. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 1157–1162. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1157-2019>
- VACCA, G., MISTRETTA, F., STOCHINO, F., & DESSI, A. (2016). Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 453–460. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-453-2016>

VILLAR FERNÁNDEZ, C., CABRERA LAFUENTE, A., RODRÍGUEZ MARCO, I., & STAJNOVIC, N. (2012). Realidad Aumentada aplicada al patrimonio museístico: El proyecto europeo ArtSense. SIAM. Series Iberoamericanas de Museología. Vol. 3., 2012, ISBN 978-84-695-6668-8, Págs. 191-200, 191–200.

Web

Manual de usuario de Agisoft Metashape. <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>

Manual de usuario de Adobe Lightroom. <https://helpx.adobe.com/es/lightroom-classic/user-guide.html>

Manual de usuario escáner láser Faro Focus 3D. https://es-knowledge.faro.com/Hardware/3D_Scanners/Focus/User_Manual_for_the_Focus3D_20-120_and_S_20-120

Manual de usuario de Faro Scene. https://es-knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/User_Manual_for_SCENE

Nuevo marco regulatorio temporal para las operaciones con drones, (2014). http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4242703/marco_regulatorio_temporal_operaciones_con_drones.pdf

Sede electrónica del catastro. <https://www.sedecatastro.gob.es/>

Videotutoriales de utilización software PTGui. <https://www.ptgui.com/videotutorials.html>

CAPÍTULO 9. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tipos de fotogrametría según su tratamiento</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2. Nuevas categorías, requisitos de las aeronaves y de los pilotos según la nueva norma europea de vuelo con drones y el Reglamento de Ejecución 2019/947. Fuente: https://www.oneair.es/nuevo-reglamento-europeo-drones [Consultado: 20/04/2021]</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 14. Equipos e instrumentos utilizados en la investigación. Fuente: elaboración propia</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 15. Programas utilizados en la investigación. Fuente: elaboración propia</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 3. Tabla de perfiles de escaneo predefinidos que vienen por defecto dentro del menú de FARO Focus 3D. Fuente: https://es-knowledge.faro.com [Consultado: 16/05/2017]</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4. Tabla comparativa del tamaño de sensor de la cámara digital. Fuente: elaboración propia</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 5. Tabla de diferentes tipos de cámara según el sensor. Fuente: elaboración propia</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 6. Tabla con diferentes tipos de cámaras esféricas de un solo disparo. Fuente: elaboración propia</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 7. Ventajas y desventajas de los métodos de activación del disparo de la cámara. Fuente: elaboración propia</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 8. Esquema del flujo de trabajo del registro de puntos en Faro Scene. Fuente: elaboración propia</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 9. Tipos geometrías para la detección de referencias naturales. Fuente: elaboración propia</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 10. Tabla de tiempos estimados para un trabajo realizado con escáner láser de unos 30 escaneos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 11. Esquema del flujo de trabajo del procesado mediante fotogrametría con Agisoft Metashape. Fuente: elaboración propia</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 12. Tipos de visualización en Metashape de la malla tridimensional</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 13. Tabla de tiempos estimados para un trabajo realizado de Fotogrametría Digital de unas 120 fotografías. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 16. Listado de edificios localizados en la investigación. Fuente: elaboración propia</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 17. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..</i>	<i>179</i>

Tabla 18. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia	180
Tabla 19. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia	190
Tabla 20. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..	197
Tabla 21. Especificaciones escáner Scanworks Perceptron V5. Fuente: https://hitech.netlify.app [Consultado: 07/03/2017)	198
Tabla 22. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia	202
Tabla 23. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia	203
Tabla 24. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia	208
Tabla 25. Datos obtenidos del catálogo/inventario del Museo Arqueológico Nacional (Madrid). Fuente: http://ceres.mcu.es [Consultado: 09/06/2018]	217
Tabla 26. Datos obtenidos del catálogo/inventario del Museo Arqueológico Nacional (Madrid). Fuente: http://ceres.mcu.es	219
Tabla 27. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..	220
Tabla 28. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia	222
Tabla 29. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia	224
Tabla 30. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..	234
Tabla 31. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia	235
Tabla 32. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia	243
Tabla 33. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..	251
Tabla 34. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia	254
Tabla 35. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia	255
Tabla 36. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia	264
Tabla 37. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..	272
Tabla 38. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia	273
Tabla 39. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia	275
Tabla 40. Parámetros de configuración del plan de vuelo. Fuente: elaboración propia	275

<i>Tabla 41. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia</i>	<i>283</i>
<i>Tabla 42. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..</i>	<i>293</i>
<i>Tabla 43. Parámetros de configuración de los escaneos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>294</i>
<i>Tabla 44. Parámetros de configuración de las fotografías. Fuente: elaboración propia</i>	<i>295</i>
<i>Tabla 45. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia</i>	<i>300</i>
<i>Tabla 46. Equipos y programas utilizados en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia ..</i>	<i>311</i>
<i>Tabla 47. Parámetros de configuración de los escaneos exteriores. Fuente: elaboración propia</i>	<i>312</i>
<i>Tabla 48. Parámetros de configuración de los escaneos interiores. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>312</i>
<i>Tabla 49. Relación de tiempos de las diferentes fases de trabajo en el caso de estudio. Fuente: elaboración propia</i>	<i>320</i>

CAPÍTULO 10

CAPÍTULO 10. ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Vista frontal del templo de Luxor. Dibujo de viajes realizado por el pintor renacentista David Roberts en el año 1838 durante su expedición en Egipto. Fuente: <https://egiptoaldescubierto.es> [Consultado: 11/03/2019]..... 17*
- Figura 2. Análisis de deformaciones estructurales utilizando la nube de puntos, obtenida mediante escaneado láser, como base para el diagnóstico. Fuente: elaboración propia..... 18*
- Figura 3. El croquis de trabajo permite analizar en detalle el objeto de estudio en el proceso de toma de datos del levantamiento arquitectónico. Fuente: elaboración propia..... 19*
- Figura 4. Prueba de modelo fotogramétrico obtenido a partir de fotografías capturadas con un teléfono móvil. Fuente: elaboración propia. Escultura de madera policromada de San Miguel Arcángel de Alejo de Vahía. Museo de Becerril de Campos..... 23*
- Figura 5. Herramientas de medición tradicionales. De izquierda a derecha: cinta métrica y flexómetro, plomada y jalón. Ilustración propia..... 24*
- Figura 6. Fragmento del papiro de Ahmes o de Rhind. Fotografía de Paul James Cowie..... 25*
- Figura 7. De izq. a dcha. estación total Leica TCRM1203 R300 y distanciómetro láser Leica D5. Ilustración propia 25*
- Figura 8. Evolución de los equipos topográficos. De izquierda a derecha: Pentax AL-320, Pentax PCS-1S, Leica TCR 305, Leica TCR 1200 y GPS Leica Smartrover. Fuente: elaboración propia 26*
- Figura 9. La realización del dibujo digital se asemeja más al tradicional gracias a la evolución de las tabletas gráficas. A la izquierda una de las primeras tabletas en las que se dibujaba en una superficie pero el dibujo se visualizaba en una pantalla externa. A la derecha una tableta con pantalla integrada, lo que facilita el dibujo ya que la posición de la punta del lapicero coincide con el trazo dibujado. Imágenes de www.wacom.com [Consultado: 12/02/2018]..... 27*
- Figura 10. Clasificación de la fotogrametría 29*
- Figura 11. Evolución de los equipos fotográficos. De izquierda a derecha: cámara métrica Hasselblad 500c; cámara réflex digital SLR Nikon D700, cámara micro cuatro tercios Olympus EPM1, cámara sin pantalla Olympus AIR, micro cámara foto/vídeo GoPro Hero 10. Fuente: elaboración propia 30*
- Figura 12. Rectificación fotográfica. A la izquierda imagen original y a la derecha imagen rectificadas. Fuente: elaboración propia..... 31*
- Figura 13. Rejilla de calibración. Fuente: ASRix. [Consultado: 12/03/2017]..... 32*

<i>Figura 14. Espacio de trabajo del software de rectificación fotográfica ASRix.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15. Alzados de fotografías rectificadas. Alzados norte y oeste de la iglesia de la Asunción en Olmillos de Sasamón. Fuente: elaboración propia</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16. Pares estereoscópicos. A la izquierda pares en formato analógico del patio del Museo de Escultura de Valladolid, y a la derecha pares en formato digital de la fachada norte de la catedral de Ávila. Fuente: Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17. Restituidores. A la izquierda un Adam MPS2 (digital) y a la derecha un Leica SD2000 (analógico). Fuente: Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18. Colección de fotografías realizadas en diferentes niveles para la restitución por fotogrametría de la fachada occidental de la Catedral de Ávila. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19. Imágenes de las diferentes fases del proceso de fotogrametría. De izquierda a derecha: nube de puntos paso o de orientación, malla de triángulos monocroma y malla de triángulos con textura</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20. Evolución del escáner láser en tamaño, movilidad y operatividad. Fuente: https://leica-geosystems.com [Consultado: 20/06/2021]</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21. Esquema del interior de un escáner láser. Fuente: https://leica-geosystems.com</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22. Tipos de escáner según el procedimiento de utilización. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 23. Modelo de nubes de puntos formado por varios escaneos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>39</i>
<i>Figura 24. Escáner Leica RTC360. Imagen tomada de la web corporativa Leica Geosystems. [Consultado: 09/04/2021]</i>	<i>40</i>
<i>Figura 25. Ejemplo de sistema de mapeo móvil Road-Scanner C. Imagen tomada de la web corporativa de FARO. [Consultado: 23/05/2019]</i>	<i>41</i>
<i>Figura 26. Aplicaciones del escáner láser</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27. Esquema gráfico del funcionamiento por tiempo de vuelo. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28. Escáneres láser de tiempo de vuelo. De izq. a dcha: Optech Illris 3D, Leica Station C10 y Riegl VZ-1000.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29. Principios de la triangulación</i>	<i>44</i>
<i>Figura 30. Esquema gráfico del funcionamiento por triangulación. Fuente: elaboración propia</i>	<i>45</i>
<i>Figura 31. Esquema gráfico del funcionamiento por diferencia de fase. Fuente: elaboración propia</i>	<i>45</i>

<i>Figura 32. Escáneres láser de diferencia de fase. De izquierda a derecha: Faro Photon 120, Trimble FX y el Faro Focus 3D 120 S. Fuente: imágenes de Google</i>	46
<i>Figura 33. Escáneres de luz estructurada y ejemplo de patrón de luz. De izquierda a derecha: smartSCAN 3d HE de Breuckmann, Sidio Pro de nub3d y patrón de luz. Fuente: imágenes de Google</i>	47
<i>Figura 34. Escáneres de rango esférico. De izq. a dcha. Faro Focus S150, Leica RTC360 y Trimble X7. Fuente: imágenes de Google. [Consultado: 18/07/2021]</i>	48
<i>Figura 35. Modelo digital del terreno obtenido mediante fotogrametría aérea con dron. Fuente: ww.cartodesia.com [Consultado: 11/11/2020]</i>	49
<i>Figura 36. Zeppelin, cometa y sistema picavent. Fuente: imágenes Google</i>	50
<i>Figura 37. Aeronaves de radiocontrol</i>	50
<i>Figura 38. Diferentes configuraciones de multicopteros. Fuente: www.mikrokopter.de [Consultado: 04/08/2018]</i>	51
<i>Figura 39. Esquema de los componentes internos de un dron multirrotor. Fuente: https://guiadrones.com [Consultado: 26/04/2020]</i>	52
<i>Figura 40. Imagen de dron de ala fija y dron multirrotor</i>	53
<i>Figura 41. Pantalla de configuración del plan de vuelo desde la aplicación de Pix4D. Fuente: www.pix4d.com [Consultado: 18/02/2020]</i>	54
<i>Figura 42. Imagen de dron de uso militar y dron de uso civil</i>	54
<i>Figura 43. Croquis de trabajo</i>	65
<i>Figura 44. Funcionamiento del escáner láser. De izquierda a derecha esquemas de desviación del láser, rotación vertical del espejo y rotación horizontal del escáner. Fuente: https://es-knowledge.faro.com [Consulta: 16/05/2017]</i>	66
<i>Figura 45. Contenido del equipo básico del escáner láser Faro. Fuente: elaboración propia</i>	66
<i>Figura 46. Cilindro virtual que define el área de riesgo ocular nominal (NOHA). Fuente: https://es-knowledge.faro.com [Consulta: 16/05/2017]</i>	67
<i>Figura 47. Esquema de flujo de trabajo de la toma de datos con escáner láser. Fuente: elaboración propia</i>	68
<i>Figura 48. Tipos de dianas para usar con escáner láser. De izquierda a derecha: esferas con base magnética; dianas giratorias en los dos ejes; y dianas adhesivas en varios formatos. Fuente: elaboración propia</i>	68
<i>Figura 49. Ejemplo de colocación de referencias artificiales elevadas del suelo debido a las características físicas del caso de estudio. Fuente: elaboración propia</i>	70

<i>Figura 50. Pantallas de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 51. Pantallas de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 52. Pantalla de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D</i>	<i>72</i>
<i>Figura 53. Pantalla de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D</i>	<i>73</i>
<i>Figura 54. Pantallas de navegación y configuración de escáner Faro Focus 3D.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 55. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D</i>	<i>74</i>
<i>Figura 56. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D</i>	<i>75</i>
<i>Figura 57. Pantallas de configuración escáner láser Faro Focus 3D.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 58. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D</i>	<i>76</i>
<i>Figura 59. Tipos de mediciones de exposición para determinar los parámetros de color de los escaneos. Fuente: https://es-knowledge.faro.com [Consultado: 16/05/2017]</i>	<i>77</i>
<i>Figura 60. Pantalla de configuración escáner láser Faro Focus 3D</i>	<i>77</i>
<i>Figura 61. Esquema del proceso de escaneado. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 62. Comparación gráfica del tamaño de los distintos tipos de sensores en cámaras fotográficas. Fuente: elaboración propia</i>	<i>84</i>
<i>Figura 63. Relación de la profundidad de campo con el tamaño del sensor de la cámara. Fuente: https://captureheatlas.com/es [Consultado: 11/09/2020]</i>	<i>84</i>
<i>Figura 64. Toma de datos de imágenes para recubrimiento completo de un objeto grande. Fuente: elaboración propia</i>	<i>85</i>
<i>Figura 65. Toma de datos de imágenes para recubrimiento completo de un objeto pequeño. Fuente: elaboración propia</i>	<i>85</i>
<i>Figura 66. Sistema de captura simultanea de imágenes. Fuente: http://www.garmaz.es [Consultado: 12/03/2020]</i>	<i>86</i>
<i>Figura 67. Relación de proporciones de la fotografía esférica o equirectangular. Fuente: elaboración propia</i>	<i>87</i>
<i>Figura 68. Punto nodal respecto la intersección de los ejes nodales. Fuente: elaboración propia</i>	<i>88</i>
<i>Figura 69. Esquema de la ubicación del punto nodal en el interior de la cámara. Fuente: elaboración propia</i>	<i>88</i>
<i>Figura 70. Gráfica de relación entre la distancia focal y el ángulo de visión. Fuente: www.blogdelfotografo.com [Consultado: 11/09/2020]</i>	<i>89</i>
<i>Figura 71. Clasificación de objetivos de cámara. Relación entre las distancias focales y el ángulo de visión. Fuente: www.blogdelfotografo.com [Consultado: 11/09/2020]</i>	<i>90</i>

Figura 72. Esquemas del proceso para calcular el punto nodal o de no paralaje. Fuente: elaboración propia	91
Figura 73. Esquema de giros respecto los diferentes planos para realizar las fotografías de la panorámica esférica. Fuente: elaboración propia	92
Figura 74. Fotografías necesarias para realizar una panorámica esférica de 360. Fuente: elaboración propia	92
Figura 75. Esquema de pasos a realizar en el proceso de fotogrametría aérea con RPAS. Fuente: elaboración propia	94
Figura 76. GSD que afecta al nivel de detalle de los datos adquiridos. Fuente: https://www.ugcs.com [Consultado: 19/05/2020]	94
Figura 77. Configuración del área de levantamiento durante la planificación del vuelo	95
Figura 78. Configuración de superposición y distancia de muestreo del GSD de la cámara	96
Figura 79. Valores de la ruta mostrados en la ventana Perfil de elevación	96
Figura 80. Ruta de vuelo con altura constante sin waypoints intermedios	97
Figura 81. Ruta de vuelo con altura variable con waypoints intermedios ajustando la altitud al relieve del terreno	97
Figura 82. Esquema de trayectorias de tipo de giro en waypoint: parada y giro; y giro adaptativo. Fuente: elaboración propia	98
Figura 83. Ejemplo de punto de despegue	99
Figura 84. Esquema de formas de despegue de vehículo aéreo no tripulado. Fuente: elaboración propia	100
Figura 85. Esquema de relación entre la altura de despegue y de vuelo. Fuente: elaboración propia	100
Figura 86. Ejemplo de planificación de ruta de despegue seguro	101
Figura 87. Dron DJI Phantom 4 equipado con sistema RTK. Fuente: www.dji.com [Consulta: 11/10/2020]	102
Figura 88. Esquema de funcionamiento de sistema RTK. Fuente: elaboración propia	103
Figura 89. Registro de nubes de puntos de escáner Faro (FLS) en el software de Polyworks. Fuente: elaboración propia	105
Figura 90. Pantalla de trabajo de Faro Scene. Fuente: software Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]	106
Figura 91. Estructura de la carpeta de proyecto de Faro Scene. Fuente: Manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019]	108

<i>Figura 92. Estructura de la carpeta de escaneo Faro Scene. Fuente: Manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019].....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 93. Ejemplo de eliminación de puntos con el filtro Stray. Fuente: manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019].....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 94. Ejemplo de aplicación del filtro Smooth. Fuente: manual Faro Scene [Consultado: 13/06/2019].....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 95. Visualización de un escaneo mediante la opción Vista rápida. Fuente: elaboración propia</i>	<i>110</i>
<i>Figura 96. Visualización de un escaneo mediante la opción Vista plana. Fuente: elaboración propia</i>	<i>111</i>
<i>Figura 97. Visualización de un escaneo mediante la opción Vista 3D. Fuente: elaboración propia</i>	<i>111</i>
<i>Figura 98. Selección de puntos en la vista rápida para realizar su eliminación. Fuente: elaboración propia</i>	<i>112</i>
<i>Figura 99. Ventana de configuración de los parámetros de pre-procesado escaneo. Fuente: elaboración propia</i>	<i>114</i>
<i>Figura 100. Proceso de recuperación de color de la fotografía original capturada por el escáner láser. Fuente: elaboración propia</i>	<i>116</i>
<i>Figura 101. Proceso de coloreado a partir de fotografía capturada de forma externa.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 102. Comparativa de calidad de color entre una imagen capturada por la cámara interna del escáner y una cámara externa. Fuente: elaboración propia</i>	<i>118</i>
<i>Figura 103. Visualización de la vista correspondencia para el registro manual de los escaneos</i>	<i>119</i>
<i>Figura 104. Ventanas de parámetros de configuración de los distintos modos de registro</i>	<i>120</i>
<i>Figura 105. Ventanas Scan Manager donde se pueden visualizar los resultados del registro..</i>	<i>121</i>
<i>Figura 106. Esquema de los resultados que se pueden obtener con el escáner láser. Fuente: elaboración propia</i>	<i>122</i>
<i>Figura 107. Ventana de configuración para la creación de mallas 3D</i>	<i>123</i>
<i>Figura 108. Scene WebShare Cloud proporciona una sencilla visualización 3D de los datos as-built a través de Internet</i>	<i>125</i>
<i>Figura 109. Espacio de trabajo programa Adobe Lightroom. Fuente: elaboración propia</i>	<i>127</i>
<i>Figura 110. Visualización del módulo de revelado donde se puede observar cómo se puede mejorar la iluminación de una fotografía a partir de la información almacenada dentro del archivo RAW. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>128</i>

<i>Figura 111. Espacio de trabajo de PTGui para procesado de panorámicas esféricas de forma automática. Fuente: elaboración propia</i>	<i>129</i>
<i>Figura 112. Proceso de cálculo de los puntos de control para hacer el cosido entre las fotografías. Fuente: elaboración propia</i>	<i>130</i>
<i>Figura 113. Pestaña de PTGui que muestra los puntos de control localizados en cada una de las fotografías. Podemos añadir, modificar o eliminar puntos para mejorar el resultado de la panorámica. Fuente: elaboración propia</i>	<i>130</i>
<i>Figura 114. Ventana de calibración de la cámara de Agisoft Metashape. Fuente: elaboración propia</i>	<i>132</i>
<i>Figura 115. Configuración de tipo de carpeta para fotografías esféricas sin procesar. Fuente: elaboración propia</i>	<i>133</i>
<i>Figura 116. Filtrado de la nube de puntos de paso mediante la selección gradual por criterio de Error de Reproyección. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 117. Proceso de enmascarado en las fotografías. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 118. Modo de enmascaramiento mediante la importación de máscaras desde modelo 3d. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 119. Proceso de añadir un punto de control o marcador en el modelo. Fuente: elaboración propia</i>	<i>136</i>
<i>Figura 120. Ajuste de la caja delimitadora en traslación, rotación y escala para contener la nube dispersa completa. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 121. Ventana de configuración de los parámetros de la nube densa. Fuente: elaboración propia</i>	<i>138</i>
<i>Figura 122. Cuadro de dialogo de la configuración de los parámetros de malla de triángulos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>138</i>
<i>Figura 123. Cuadro de diálogo de Metashape con los parámetros para el cálculo de la textura. Fuente: elaboración propia</i>	<i>140</i>
<i>Figura 124. Cuadro de dialogo de creación de ortofoto en Metashape. Fuente: elaboración propia</i>	<i>143</i>
<i>Figura 125. Visualización de la ortofoto creada y ampliación de nivel de detalle. Fuente: elaboración propia</i>	<i>144</i>
<i>Figura 126. Ventana de configuración parámetros exportación ortofoto. Fuente: elaboración propia</i>	<i>146</i>
<i>Figura 127. Esquema de los resultados que se pueden obtener en la fotogrametría digital. Fuente: elaboración propia</i>	<i>146</i>

<i>Figura 128. Ortofoto del castillo de la Mota en Medina del Campo generada a partir de un modelo fotogramétrico. Fuente: elaboración propia</i>	149
<i>Figura 129. Pantalla de inicio de la aplicación web de visualización de nubes de puntos Pointbox. Fuente: www.pointbox.xyz [Consultado: 01/04/2019]</i>	150
<i>Figura 130. Esquema de división del cubo en octrees. Fuente: https://programmerclick.com/article/13011211203 [Consultado:18/06/2019]</i>	150
<i>Figura 131. Ventana de visualización de nube de puntos en Pointbox. Fuente: elaboración propia. Nube de puntos del interior de la iglesia de Santa María en Becerril de Campos (Palencia)</i>	151
<i>Figura 132. Máquina CNC de 5 ejes. Fuente: https://redshift.autodesk.es/digital-stone-project [Consultado: 11/02/2021]</i>	152
<i>Figura 133. Diferentes tecnologías existentes de impresión 3d mediante fabricación aditiva. Fuente: imágenes Google</i>	153
<i>Figura 134. Ventana de trabajo del programa 3DBuilder. Fuente: elaboración propia</i>	154
<i>Figura 135. Preparación del archivo G-code en el programa Ultimaker Cura. Fuente: elaboración propia</i>	154
<i>Figura 136. Pantalla de trabajo de Sketchfab. Fuente: https://sketchfab.com [Consultado: 10/08/2021]</i>	155
<i>Figura 137. Retopología automática de modelo 3D realizada con Instant Meshes. Fuente: elaboración propia</i>	156
<i>Figura 138. Generación de las UVs del modelo low poly en el programa de Blender. Fuente: elaboración propia</i>	156
<i>Figura 139. Imagen de las diferentes texturas quedan forma al modelo 3d. Fuente: elaboración propia</i>	157
<i>Figura 140. Resultado final de la optimización de un modelo fotogramétrico. Fuente: elaboración propia</i>	158
<i>Figura 141. Esquema de los dos sistemas de realidad virtual según los grados de libertad. Fuente: https://emiliusvgs.com [Consultado: 13/04/2021]</i>	159
<i>Figura 142. Sistema de seguimiento externo de los dispositivos de realidad virtual. Fuente: https://itigic.com/virtual-reality-glasses-6-dof [Consultado: 18/04/2021]</i>	159
<i>Figura 143. Esquema del sistema guardián y pantalla de interacción en el espacio virtual. Fuente: https://distritoxr.com [Consultado: 27/07/2021]</i>	160
<i>Figura 144. Entorno de trabajo de programa de creación de visitas virtuales. Fuente: Kolor Panotour [Consultado: 12/05/2018]</i>	161

<i>Figura 145. Entorno de trabajo del programa Twinmotion. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 146. Blueprints es el sistema de scripting visual dentro de Unreal Engine y es la forma de crear acciones o rutinas dentro del mundo virtual. Fuente: Unreal Engine [Consultado: 17/08/2021]</i>	<i>162</i>
<i>Figura 147. Flujo de trabajo para la creación de una escena. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 148. Ventana de trabajo de la herramienta web Vectary. Fuente: https://www.vectary.com [Consultado: 13/09/2021]</i>	<i>164</i>
<i>Figura 149. Flujo de trabajo dentro de Reality Composer. Fuente: elaboración propia</i>	<i>164</i>
<i>Figura 150. Interior de la ermita de Santa Cecilia en Aguilar de Campoo. Construida entre los s. XII y XIII es un claro ejemplo del románico en la zona norte de Palencia. Fuente: https://www.santamarialareal.org [Consultado: 19/09/2018]</i>	<i>171</i>
<i>Figura 151. Desarrollo geométrico para la construcción de un arco escarzano. Fuente: elaboración propia</i>	<i>172</i>
<i>Figura 152. Nube de puntos del interior de la iglesia de Santa María en Torrelobatón. Fuente: elaboración propia</i>	<i>172</i>
<i>Figura 153. Mapa de Castilla y León con las ubicaciones de los edificios localizados. Fuente: elaboración propia</i>	<i>176</i>
<i>Figura 154. Ubicación de la iglesia dentro del núcleo urbano. Fuente: Google Maps y sede catastro</i>	<i>177</i>
<i>Figura 155. Fotografías del interior y exterior de la iglesia del Santo Sepulcro. Fuente: elaboración propia</i>	<i>178</i>
<i>Figura 156. Posiciones de los escaneos en el interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>180</i>
<i>Figura 157. Parámetros de configuración para e registro basado en planta. Fuente: elaboración propia</i>	<i>181</i>
<i>Figura 158. Resultados de la alineación de los escaneos y tensiones de los puntos de escaneo. Fuente: elaboración propia</i>	<i>182</i>
<i>Figura 159. Nube de puntos completa del proyecto. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 160. Ortoalzado de la fachada Sur. Fuente: elaboración propia</i>	<i>183</i>
<i>Figura 161. Ortoalzado de la fachada Oeste</i>	<i>184</i>
<i>Figura 162. Planta obtenida a partir de la nube de puntos del escáner láser</i>	<i>184</i>
<i>Figura 163. Planta de pavimentos generada a partir del modelo de fotogrametría.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 164. Planta de techos generada a partir del modelo de fotogrametría.....</i>	<i>185</i>

<i>Figura 165. Secciones longitudinales generadas a partir del modelo de fotogrametría</i>	<i>186</i>
<i>Figura 166. Secciones longitudinales generadas a partir del modelo de fotogrametría</i>	<i>186</i>
<i>Figura 167. Secciones transversales generadas a partir del modelo de fotogrametría</i>	<i>187</i>
<i>Figura 168. Gráfico de curvaturas de los arcos formeros y distancia que cubren. Análisis realizado a partir de las ortofotos generadas del modelo fotogramétrico.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 169. Ortofoto del estado actual del muro que separa la nave central de la nave de la epístola</i>	<i>188</i>
<i>Figura 170. Hipótesis de cómo fue el muro de separación entre la nave central y la nave de la epístola antes de la ejecución del gran arco formero</i>	<i>188</i>
<i>Figura 171. Escanear el código QR con el dispositivo móvil para poder visualizar el modelo tridimensional del interior de la iglesia del Santo Sepulcro. Enlace a modelo 3d: https://skfb.ly/o7SKP.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 172. Ubicación de la iglesia Penitencial de Jesús dentro del casco histórico de Valladolid. Fuente: Google Maps y Sede Catastro.....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 173. Fotografía esférica realizada en el centro de la iglesia. Fuente: elaboración propia....</i>	<i>196</i>
<i>Figura 174. Ejes de movimiento del brazo Romer Infinity (izq) y cabezal escáner láser Scanworks Perceptron V5 (dcha). Fuente: elaboración propia</i>	<i>197</i>
<i>Figura 175. Colocación de la talla y el equipo de trabajo en la zona del camarín. Fuente: elaboración propia</i>	<i>198</i>
<i>Figura 176. Proceso de escaneado de la zona del rostro de la imagen. Fuente: elaboración propia</i>	<i>199</i>
<i>Figura 177. Comprobación de los resultados obtenidos durante el proceso de escaneo. Fuente: elaboración propia</i>	<i>199</i>
<i>Figura 178. Proceso de escaneado de los pliegues de la túnica. Fuente: elaboración propia ..</i>	<i>200</i>
<i>Figura 179. Proceso de retirada de las manos del Nazareno y escaneo independiente. Fuente: elaboración propia</i>	<i>200</i>
<i>Figura 180. Proceso de escaneado de las manos en su ubicación en la talla . Fuente: elaboración propia</i>	<i>201</i>
<i>Figura 181. Modelo en nube de puntos (izq) y modelo sólido de una de las manos (dcha)</i>	<i>201</i>
<i>Figura 182. Escaneado de la corona de espinas (izq) y modelo sólido de la corona (dcha)</i>	<i>201</i>
<i>Figura 183. Modelo sólido y con textura obtenido a partir de la fotogrametría digital.....</i>	<i>202</i>
<i>Figura 184. Toma de datos en el interior de la iglesia con el escáner faro Focus 3D Fuente: elaboración propia</i>	<i>203</i>

<i>Figura 185. Modelo de malla de triángulos (izq) y modelo de nube de puntos del rostro y la mano (dcha)</i>	<i>204</i>
<i>Figura 186. Modelo sólido de la talla visualizado desde diferentes puntos de vista. Fuente: elaboración propia</i>	<i>205</i>
<i>Figura 187. Imágenes de la aplicación Reality Composer y de la visualización AR del modelo del Nazareno. Fuente: elaboración propia</i>	<i>205</i>
<i>Figura 188. Modelo de nube de puntos del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>206</i>
<i>Figura 189. Planimetrías del interior de la iglesia obtenidas a partir de la nube de puntos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>207</i>
<i>Figura 190. Vista ortogonal en planta.....</i>	<i>209</i>
<i>Figura 191. Vista ortogonal en alzado lateral derecho</i>	<i>209</i>
<i>Figura 192. Vista ortogonal en alzado lateral izquierdo.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 193. Vista ortogonal frontal y posterior</i>	<i>210</i>
<i>Figura 194. Imagen del modelo virtual resultante. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: https://skfb.ly/zWFP</i>	<i>211</i>
<i>Figura 195. Fotografía de la zona frontal del capitel sencillo con la Ascensión de Cristo y Apostolado. Fuente: elaboración propia</i>	<i>215</i>
<i>Figura 196. Fotografía de la zona frontal del capitel doble con las Marías ante el sepulcro de Cristo, aparición de Cristo a la Magdalena (noli me tangere) y duda de Santo Tomás. Fuente: elaboración propia</i>	<i>218</i>
<i>Figura 197. Sala del Museo Nacional Arqueológico en donde se ubican los dos capiteles. Fuente: www.man.es [Consultado: 23/01/2020]</i>	<i>221</i>
<i>Figura 198. Fotografía del capitel original (izq). Imagen del modelo tridimensional del capitel (dcha). Fuente: elaboración propia</i>	<i>222</i>
<i>Figura 199. Fotografía del capitel original (izq). Imagen del modelo tridimensional del capitel (dcha). Fuente: elaboración propia</i>	<i>222</i>
<i>Figura 200. Composición de los capiteles en los que se puede ver el modelo de triángulos, el modelo sólido y el modelo de color. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>223</i>
<i>Figura 201. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde tú dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: https://skfb.ly/o7SKQ</i>	<i>225</i>
<i>Figura 202. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde tú dispositivo móvil. Enlace a modelo 3d: https://skfb.ly/o7SKU.....</i>	<i>225</i>

<i>Figura 203. Fotografía aérea con la ubicación de la catedral dentro del núcleo urbano de Cádiz. Fuente: elaboración propia</i>	<i>231</i>
<i>Figura 204. Fotografías del exterior de la catedral de Cádiz. Fuente: elaboración propia</i>	<i>232</i>
<i>Figura 205. Fotografías del interior de la catedral de Cádiz. Fuente: elaboración propia</i>	<i>233</i>
<i>Figura 206. Sección realizada a la nube de puntos por el eje central de la cripta. Fuente: elaboración propia</i>	<i>234</i>
<i>Figura 207. Distribución de los escaneos realizados en el interior de la cripta. Fuente: elaboración propia</i>	<i>235</i>
<i>Figura 208. Distribución de los escaneos realizados en el interior de la catedral. Fuente: elaboración propia</i>	<i>236</i>
<i>Figura 209. En las vistas planas de los escaneos se visualiza un efecto extraño a partir de la línea de cornisa interior. El problema fue debido a que a partir de ese punto había colocadas varias mallas, una de ellas de fibra de vidrio</i>	<i>237</i>
<i>Figura 210. En esta imagen de la nube de puntos se puede observar que los datos capturados a partir de la línea de cornisa, no son correctos. No tiene la densidad que el resto y se ven errores. Fuente: elaboración propia</i>	<i>237</i>
<i>Figura 211. Vistas generadas a partir de la nube de puntos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>238</i>
<i>Figura 212. Ortofoto de la planta generada a partir de la nube de puntos, donde aparece superpuesta la planta de la catedral y la planta de la cripta. Fuente: elaboración propia</i>	<i>239</i>
<i>Figura 213. Vista de la sección longitudinal realizada por el eje de la nave central de la catedral. Fuente: elaboración propia</i>	<i>239</i>
<i>Figura 214. Vista en perspectiva de la distribución en planta de la catedral. Fuente: elaboración propia</i>	<i>240</i>
<i>Figura 215. Vista en perspectiva de la distribución en planta de la cripta. Fuente: elaboración propia</i>	<i>240</i>
<i>Figura 216. Sección longitudinal por la nave central mirando hacia el Este. Fuente: elaboración propia</i>	<i>241</i>
<i>Figura 217. Sección longitudinal por la nave central mirando hacia el Oeste. Fuente: elaboración propia</i>	<i>241</i>
<i>Figura 218. Sección transversal por la capilla mayor mirando hacia el Sur (cabecera). Fuente: elaboración propia</i>	<i>241</i>
<i>Figura 219. Fotografías del modelo CAD con el proyecto expositivo y fotografías del montaje de la exposición</i>	<i>242</i>

<i>Figura 220. Ubicación del convento en relación l núcleo urbano de Torresandino. Fuente: elaboración propia</i>	<i>247</i>
<i>Figura 221. Fotografía panorámica del Monasterio de Santa María de los Valles y su entorno. Fuente: elaboración propia</i>	<i>248</i>
<i>Figura 222. Fotografías que muestran el estado de ruina del Monasterio de Santa María de los Valles en el momento de realizar la visita en mayo de 2015. Fuente: elaboración propia</i>	<i>252</i>
<i>Figura 223. Fotografía y croquis del proceso de inspección visual previa al trabajo. Fuente: Jesús I. San José</i>	<i>252</i>
<i>Figura 224. Fotografía del escáner durante el proceso de captura de datos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>253</i>
<i>Figura 225. Planta del monasterio con la posición de los escaneos y tabla con los datos de los números de puntos de cada uno de ellos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>254</i>
<i>Figura 226. Modelo completo de nube de puntos como resultado del registro de todos los escaneos. Fuente: elaboración propia</i>	<i>255</i>
<i>Figura 227. Nube de puntos coloreada con la imagen esférica capturada por la cámara interna del escáner</i>	<i>256</i>
<i>Figura 228. Modelo obtenido mediante la fotogrametría. Fuente_ elaboración propia.....</i>	<i>257</i>
<i>Figura 229. Conjunto de perfiles generados a partir de la nube de puntos en el eje Z cada 50 cm. (dcha) Plantas del monasterio, a diferentes cotas, extraídas de los perfiles generados a lo largo del eje Z. Fuente: elaboración propia</i>	<i>257</i>
<i>Figura 230. Alzado norte del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia</i>	<i>258</i>
<i>Figura 231. Alzado sur del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>258</i>
<i>Figura 232. Alzado este (altar) y alzado oeste (coro) del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia</i>	<i>259</i>
<i>Figura 233. Alzado sur del exterior del conjunto monástico. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>259</i>
<i>Figura 234. El nivel de detalle de los alzados generados permite detectar cualquier desperfecto o patología que exista sobre la superficie. Fuente: elaboración propia</i>	<i>259</i>
<i>Figura 235. Diagnóstico de los desplomes que sufren los muros norte y sur de la iglesia. Fuente: elaboración propia</i>	<i>260</i>
<i>Figura 236. Modelo CAD creado con la hipótesis del estado original del convento. Fuente: elaboración propia</i>	<i>261</i>
<i>Figura 237. Sección realizada al modelo de la hipótesis. Fuente: elaboración propia</i>	<i>261</i>

<i>Figura 238. Vistas del modelo de la hipótesis con incorporación de objetos de vegetación e iluminación.....</i>	<i>262</i>
<i>Figura 239. Simulación de modificación de las estaciones desde el programa Twinmotion</i>	<i>263</i>
<i>Figura 240. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: https://skfb.ly/o7SKI.....</i>	<i>265</i>
<i>Figura 241. Vista aérea del núcleo de Calzada de Béjar. Fuente: elaboración propia</i>	<i>269</i>
<i>Figura 242. Imagen aérea del fortín romano. Fuente: Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica</i>	<i>270</i>
<i>Figura 243. Imagen aérea del núcleo urbano de Calzada de Béjar. Fuente: Google Maps. Imagen modificada para este documento.....</i>	<i>270</i>
<i>Figura 244. Mapa de los diferentes Caminos de Santiago y ubicación del núcleo urbano de Calzada de Béjar. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Caminos_de_Santiago_Espa%C3%B1a_(por_grupos).svg. Imagen modificada para este documento.....</i>	<i>271</i>
<i>Figura 245. Toma de datos con el escáner Faro Focus 3D. Fuente: elaboración propia</i>	<i>273</i>
<i>Figura 246. Distribución de los escaneos para la documentación de las calles. Fuente: elaboración propia</i>	<i>274</i>
<i>Figura 247. Distribución de los escaneos para la documentación del interior de la iglesia. Fuente: elaboración propia</i>	<i>274</i>
<i>Figura 248. Configuración del plan de vuelo en la aplicación Pix4D Capture. Fuente: elaboración propia</i>	<i>275</i>
<i>Figura 249. Fotografía esférica de la calle Salas Pombo. Fuente: elaboración propia</i>	<i>276</i>
<i>Figura 250. Nube de puntos de la zona de la plaza y la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción. Fuente: elaboración propia</i>	<i>276</i>
<i>Figura 251. Modelo 3d obtenido mediante el proceso de fotogrametría digital. Fuente: elaboración propia</i>	<i>277</i>
<i>Figura 252. Fotografía tipo ojo de pez que captura la cámara 360. Fuente: elaboración propia ...</i>	<i>278</i>
<i>Figura 253. Resultado de la fotografía esférica después de realizar el revelado digital y el procesado. Fuente: elaboración propia</i>	<i>278</i>
<i>Figura 254. Comparativa de las ortofotos obtenidas a partir de la nube de puntos y de la fotogrametría digital.....</i>	<i>280</i>
<i>Figura 255. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3d desde un dispositivo móvil. Fuente: José Martínez Rubio. Enlace modelo 3d: https://skfb.ly/6WPH8.....</i>	<i>284</i>

<i>Figura 256. Ubicación de la iglesia de Santa María dentro del núcleo urbano. Fuente: Google Maps y catastro.....</i>	<i>289</i>
<i>Figura 257. Fotografías del exterior e interior de la iglesia de Santa María. Fuente: elaboración propia</i>	<i>290</i>
<i>Figura 258. Ubicación del artesanado respecto la planta de la iglesia. Fuente: elaboración propia</i>	<i>291</i>
<i>Figura 259. Alzados de la iglesia de Santa María. Fuente: http://stamariafuentesdenava.com.....</i>	<i>291</i>
<i>Figura 260. Fotografías de detalle de la decoración del artesanado. Fuente: elaboración propia .</i>	<i>292</i>
<i>Figura 261. Andamio utilizado para la toma de datos y la restauración del artesanado. Fuente: elaboración propia</i>	<i>294</i>
<i>Figura 262. Distribución en planta de los escaneos realizados. Fuente: elaboración propia....</i>	<i>295</i>
<i>Figura 263. Nube de puntos resultante de los escaneos realizados con el faro Focus 3d. Escanea el código QR para poder visualizar la nube de puntos desde un dispositivo móvil. Fuente: elaboración propia</i>	<i>296</i>
<i>Figura 264. Modelo sólido y con textura obtenido a partir de la fotogrametría digital. Fuente: elaboración propia</i>	<i>297</i>
<i>Figura 266. Composición del modelo sólido, la malla de triángulos y el modelo texturizado. Fuente: elaboración propia</i>	<i>298</i>
<i>Figura 267. Ortofoto del artesanado visto en planta. Obtenido a partir del modelo generado por fotogrametría digital.....</i>	<i>298</i>
<i>Figura 268. Plantillas impresas a escala 1:1 de los faldones del artesanado. Fuente: elaboración propia</i>	<i>299</i>
<i>Figura 269. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3D desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: https://skfb.ly/o7SKM.....</i>	<i>300</i>
<i>Figura 270. Ortofoto aérea de la ciudad de Plasencia. Fuente: GoogleMaps</i>	<i>307</i>
<i>Figura 271. Imagen aérea donde se pueden diferenciar las dos catedrales. Fuente: elaboración propia</i>	<i>308</i>
<i>Figura 272. Fotografías de la catedral vieja. Fuente: elaboración propia</i>	<i>309</i>
<i>Figura 273. Fotografías del interior de la Catedral Nueva. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>310</i>
<i>Figura 274. Distribución en planta de los escaneos realizados en el interior de la catedral. Fuente: elaboración propia</i>	<i>313</i>
<i>Figura 275. Distribución de las cámaras en planta. Fuente: elaboración propia</i>	<i>313</i>

*Figura 276. Nube de puntos optimizada del interior. Vista en perspectiva con sección por el eje longitudinal de la catedral nueva y la catedral vieja. Fuente: elaboración propia.....*314

Figura 277. Planta de las catedrales obtenida a partir de las nubes de puntos. Fuente: elaboración propia 315

Figura 278. Planta de bóvedas obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia 316

Figura 279. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia 316

Figura 280. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia 317

Figura 281. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia 317

Figura 282. Sección obtenida a partir del modelo de nubes de puntos. Fuente: elaboración propia 318

Figura 283. Fotografía esférica realizada con la Mi Sphere Camera para la realización del modelo fotogramétrico 318

*Figura 284. La franja coloreada es la que ofrece una mejor reconstrucción en la malla tridimensional. A partir de esa cota la malla empieza a mostrar deformaciones y errores*319

Figura 285. Ortofoto obtenida a partir del modelo fotogramétrico obtenido a partir de las fotografías esféricas. La parte inferior de la ortofoto es correcta, pero las partes superiores tienen una gran deformación o distorsión 319

Figura 286. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3D desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7Tlo>..... 321

Figura 287. Escanea el código QR para poder visualizar el modelo 3D desde un dispositivo móvil. Enlace modelo 3d: <https://skfb.ly/o7TIZ>..... 321

