



Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Arquitectura



**DOCTORADO EN ARQUITECTURA,
EDIFICACIÓN, URBANÍSTICA Y PAISAJE**

**PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D
INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y
LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO**

TESIS DOCTORAL

Dña. Isabel Mtnez-Espejo Zaragoza

Autora de la Tesis Doctoral
- Universitat Politècnica de València -

D. Francisco Juan Vidal

Director Académico de la Tesis Doctoral
- Universitat Politècnica de València -

Dña. Gabriella Caroti

Co-Directora Académica de la Tesis Doctoral
- Università di Pisa -

D. Filippo Fantini

Co-Director Académico de la Tesis Doctoral
- Università di Bologna -

Valencia, Abril del 2014



Universitat Politècnica de València

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

TESIS DOCTORAL

Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

**PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO
CON HERRAMIENTAS AVANZADAS, APLICADO AL
CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO**

Dña. Isabel Mtnez-Espejo Zaragoza

Autora de la Tesis Doctoral
- Universitat Politècnica de València -

D. Francisco Juan Vidal

Director Académico de la Tesis Doctoral
- Universitat Politècnica de València -

Dña. Gabriella Caroti

Co-Directora Académica de la Tesis Doctoral
- Università di Pisa –

D. Filippo Fantini

Co-Director Académico de la Tesis Doctoral
- Università di Bologna –

Valencia, Abril de 2014



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



A mi madre, que me ha enseñado que la constancia y la perseverancia son las claves para conseguir alcanzar nuestros sueños, por su apoyo constante y su amor infinito.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje
Isabel Martínez-Espejo Zaragoza



Tesis Doctoral

ÍNDICE



ÍNDICE

1. Abstract en español, italiano, inglés y valenciano	1
2. Introducción (Encuadre del estudio)	5
A. Introducción	6
B. Referencias	10
3. Estado del arte de las metodologías de levantamiento arquitectónico y la restitución	11
A. El Levantamiento arquitectónico	12
i. Image-based Modelling	18
ii. Range-based Modelling	33
B. La Restitución	44
i. Tipos y su utilización	47
ii. Objetivos de los diferentes modelos para el levantamiento	49
iii. Primera rama: Los modelos matemáticos	53
iv. Segunda rama: Los modelos numéricos	60
C. Referencias	65
4. Caso de estudio 1. Restauración virtual: El caso de una bóveda gótica en Coves de Vinromá	67
A. Breve reseña histórica	68
B. Objeto	74
C. Medios, sistemas y metodología de levantamiento	75
i. Clásico: Medidas directas	76
ii. Láser Escáner	77
D. Tratamiento de los datos	91
E. Análisis	94
F. Modelos obtenidos	101
G. Resultados	111
H. Referencias	114
5. Caso de estudio 2. Anastilosis virtual de modelos adquiridos mediante escáner láser: Piazza d'Oro dentro del Recinto Arqueológico de Villa Adriana (Tívoli, Roma)	116
A. Breve reseña histórica	117
B. Objeto	125
C. Medios, sistemas y metodología de levantamiento	126
i. Láser escáner	127
ii. Image-based Modelling	130
D. Tratamiento de los datos.	133
E. Análisis	139



F. Modelos obtenidos	144
G. Resultados	148
H. Referencias	152
6. Caso de estudio 3. Integración de frescos: Bóveda con frescos del Palacio Roncioni	154
A. Breve reseña histórica	155
B. Objeto	160
C. Medios, sistemas y metodología de levantamiento	162
i. Láser escáner	163
ii. Levantamiento fotogramétrico para la aplicación de la textura	164
iii. Image-based Modelling	165
D. Tratamiento de los datos	169
E. Análisis	176
F. Modelos obtenidos	188
G. Resultados	193
H. Referencias	200
7. Caso de estudio 4. Nueva herramienta para el levantamiento de cubiertas: Iglesia San Miniato en Marciana (Cascina, Pisa)	202
A. Breve reseña histórica	203
B. Objeto	208
C. Medios, sistemas y metodología de levantamiento	210
i. Láser escáner	211
ii. Image-based Modelling a partir de fotogrametría aérea (Drone)	213
D. Tratamiento de los datos	223
E. Análisis	228
F. Modelos obtenidos	230
G. Resultados	232
H. Referencias	235
8. La Terminología como cuestión abierta	237
A. El Levantamiento como campo multidisciplinar	238
B. Objetivos (del capítulo)	239
C. Metodología (del capítulo)	240
D. Campos	240
E. Términos y conceptos	242
i. Campo 1	242
ii. Campo 2	257
iii. Campo 3	265
iv. Campo 4	272
v. Campo 5	275
vi. Campo 6	280
F. Índice de términos	295



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



G. Índice de autores	310
H. Referencias	317
9. Conclusiones	322
A. Conclusiones en español	323
B. Conclusiones en italiano (<i>Conclusioni</i>)	334
C. Referencias	345
10. Bibliografía	346
A. Bibliografía básica	347
11. Agradecimientos	349



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje
Isabel Martínez-Espejo Zaragoza



Tesis Doctoral

CAPÍTULO 1. ABSTRACT



A. ABSTRACT ESPAÑOL

El objetivo de la tesis es el análisis de las nuevas tecnologías para el levantamiento arquitectónico integrado, que se desarrollará mediante el estudio de ventajas y limitaciones de cada una de ellas en los diferentes ámbitos de uso, dando una visión global y buscando unificar terminología y metodología en el campo de la arquitectura y la ingeniería. En particular, entre las nuevas tecnologías se ha analizado el láser escáner, sea a tiempo de vuelo que a triangulación, la modelación 3D a partir de imágenes, la fotogrametría a partir de drone, y su integración con las técnicas clásicas de levantamiento.

Con este objetivo se realiza una serie de casos de estudio, utilizando diferentes técnicas de levantamiento avanzadas con diferentes aplicaciones siempre dentro del campo del patrimonio arquitectónico. Estos casos de estudio nos permiten analizar y estudiar dichas técnicas, teniendo, sin embargo, clara una cosa, no se busca la comparación de las técnicas de Image-based Modelling y de Range-based Modelling, sino el estudio de éstas para su integración. Esta integración se considera esencial para realizar restituciones de modelos a alto nivel de detalle morfológico y cromático.

Por otra parte, y gracias a la experiencia vivida entre dos facultades diversas (arquitectura en Valencia, España, e ingeniería civil en Pisa, Italia), más allá del problema entre dos idiomas, se comprueba la existencia de una divergencia entre la terminología empleada por los diferentes especialistas que intervienen en el proceso, ya sean ingenieros (de diversas ramas), arquitectos o arqueólogos. Está claro que cada una de las figuras tiene una visión diferente con respecto al patrimonio construido, a la construcción en general y al levantamiento. La tendencia actual de formar grupos multidisciplinares, que intervienen en el patrimonio arquitectónico, nos lleva a decir que una terminología técnica unificada en esta materia, podría facilitar la comprensión y la integración entre las diversas figuras, creando un código común.



B. ABSTRACT ITALIANO

L'obiettivo della tesi è l'analisi delle nuove tecnologie per il rilievo architettonico integrato, che si svilupperà mediante lo studio di vantaggi e dei limiti di ognuna di queste nei diversi ambiti di impiego, dando una visione globale e cercando di unificare terminologia e metodologia nel campo dell'architettura e dell'ingegneria. In particolare, fra le nuove tecnologie sono state analizzate il laser a scansione, sia a tempo di volo che a triangolazione, la modellazione 3D da immagini, la fotogrammetria da drone e la loro integrazione con le tecniche classiche di rilievo.

Con tali finalità sono stati presi in considerazione alcuni casi di studio, che impiegassero diverse tecniche di rilievo avanzato con diversi fini applicativi, appartenenti al campo del patrimonio architettonico. I casi di studio affrontati ci permettono di analizzare e di studiare queste tecniche, avendo, tuttavia, chiara una cosa, vale a dire che non si cerca di confrontare le tecniche di Image-based Modelling e di Range-based Modelling, ma di studiarle per la loro integrazione. Questa integrazione è considerata essenziale per realizzare restituzioni di modelli ad alto livello di dettaglio morfologico e cromatico.

D'altra parte, grazie all'esperienza vissuta tra due facoltà diverse (architettura a Valencia in Spagna ed ingegneria civile a Pisa in Italia), al di là dei problemi di interpretazione tra le due lingue, si riscontra l'esistenza di una divergenza tra la terminologia usata dai diversi specialisti che intervengono nel processo, siano essi ingegneri (anche se di rami differenti), architetti o archeologi. È chiaro che ognuna delle figure avrà una visione diversa del patrimonio costruito, degli edifici in generale e del rilievo. La tendenza attuale a formare gruppi multidisciplinari, che intervengono sul patrimonio architettonico, ci porta a dire che una terminologia tecnica unificata in questa materia potrebbe facilitare la comprensione e l'integrazione tra le diverse figure, creando così un codice comune.



C. ABSTRACT ENGLISH

The aim of the thesis is to analyse new technologies for integrated architectural surveys, studying the advantages and limitations of each in different architectural contexts, providing a global vision and unifying terminology and methodology in the field of architecture and engineering. The new technologies analyzed include laser scanning (both time-of-flight and triangulation), image-based 3-D modelling and drone-based photogrammetry, along with their integration with classical surveying techniques.

With this goal, some case studies were examined, using different survey techniques with several advanced applications, in the field of architectural heritage. The case studies enabled us to analyze and study these techniques, however having quite clear that Image- and Range-based Modelling techniques, rather than compared, must be analysed for their integration, which is essential for the rendering of models with high levels of morphological and chromatic detail.

On the other hand, thanks to the experience of the two different faculties (Architecture in Valencia, Spain and Civil Engineering in Pisa, Italy), besides the issues of interpretation between the two languages, divergence was found between the terminology used by the different specialists involved in the process, be they engineers (although dealing with different branches), architects and archaeologists. It is obvious that each of these profiles has a different view of architectural heritage, general construction and surveys. The current trend to form multidisciplinary teams working on architectural heritage, leads us to conclude that an unified technical terminology in this field could facilitate understanding and integration between the different figures, thus creating a common code.



D. ABSTRACT VALENCIANO

L'objectiu de la tesi és l'anàlisi de les noves tecnologies per a l'alçament arquitectònic integrat, que es desenrotllarà per mitjà de l'estudi d'avantatges i limitacions de cada una d'elles en els diferents àmbits d'ús, donant una visió global i buscant unificar terminologia i metodologia en el camp de l'arquitectura i l'enginyeria. En particular, entre les noves tecnologies s'ha analitzat el làser escàner, siga a temps de vol que a triangulació, la modelació 3D a partir d'imatges, la fotogrametria a partir de drone, i la seua integració amb les tècniques clàssiques d'alçament.

Amb este objectiu es realitza una sèrie de casos d'estudi, utilitzant diferents tècniques d'alçament avançades amb diferents aplicacions sempre dins del camp del patrimoni arquitectònic. Estos casos d'estudi ens permeten analitzar i estudiar dites tècniques, tenint, no obstant això, clara una cosa, no es busca la comparació de les tècniques d'*Image-based Modelling* i de *Range-based Modelling*, sinó l'estudi d'estes per a la seua integració. Esta integració es considera essencial per a realitzar restitucions de models a alt nivell de detall morfològic i cromàtic.

D'altra banda, i gràcies a l'experiència viscuda entre dos facultats diverses (arquitectura a València, Espanya, i enginyeria civil en Pisa, Itàlia) , més enllà del problema entre dos idiomes, es comprova l'existència d'una divergència entre la terminologia empleada pels diferents especialistes que intervenen en el procés, ja siguen enginyers (de diverses branques) , arquitectes o arqueòlegs. Està clar que cada una de les figures té una visió diferent respecte al patrimoni construït, a la construcció en general i a l'alçament. La tendència actual de formar grups multidisciplinaris, que intervenen en el patrimoni arquitectònic, ens porta a dir que una terminologia tècnica unificada en esta matèria, podria facilitar la comprensió i la integració entre les diverses figures, creant un codi comú.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje
Isabel Martínez-Espejo Zaragoza



Tesis Doctoral

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN



A. INTRODUCCIÓN

La tesis doctoral se presenta como una continuación de la tesina realizada en el Máster Universitario en Conservación del Patrimonio Arquitectónico de la UPV (Mtnez-Espejo Zaragoza, I., 2010)¹. En ella se realiza un riguroso estudio de restitución de una bóveda gótica que cubría la capilla mayor de una iglesia del siglo XVI de Castellón. Dicho estudio comienza partiendo de un levantamiento gráfico tridimensional, mediante sistemas basados en sensores activos, un escáner láser de triangulación y un escáner láser TOF (Time of Flight). Si bien este estudio se centra en un caso específico, partiendo del levantamiento hasta llegar a la hipótesis de su estado original, mediante una anástilosis virtual, permite a su vez hacer un análisis sobre el uso de estos sistemas dentro del campo de la restauración arquitectónica.

La tesina, por lo tanto, permite argumentar el positivismo de esta técnica, que como se demostraba, permite la obtención de una cantidad de información difícilmente adquirible con una toma de datos directa. Los sistemas basados en sensores activos ofrecen indiscutibles ventajas, fundamentalmente derivadas de la capacidad de adquisición rápida y sistemática de las coordenadas espaciales de un número inmenso de puntos, en forma de modelo virtual 3D (nube de puntos), que los hacen especialmente adecuados para levantamientos de bienes arquitectónicos y arqueológicos.

Sin embargo, también en este estudio, se advierten ciertas limitaciones en dichos sistemas de levantamiento, que se encuentran en estado de desarrollo, y aunque en pocos años ha visto una veloz evolución, quedan aspectos por resolver.

Por otra parte, en esta tesis se introduce como novedad la inclusión de sensores pasivos de última generación al uso ya probado de los sensores activos. A lo largo de toda la tesis se ve el uso de ambos, teniendo, sin embargo, clara una cosa, no se busca la comparación de las técnicas de Image-based Modelling y de Range-based Modelling, sino el estudio de éstas para su integración. Esta integración se considera esencial para realizar restituciones de modelos a alto nivel de detalle morfológico y cromático.

Por otra parte, y gracias a la experiencia vivida entre dos facultades diversas (arquitectura en Valencia, España, e ingeniería civil en Pisa, Italia), más allá del problema entre dos idiomas, se comprueba la existencia de una divergencia entre la terminología empleada por los diferentes especialistas que intervienen en el proceso, ya sean ingenieros (de diversas ramas), arquitectos o arqueólogos. Está claro que cada una de las figuras tiene una visión diferente con respecto a los bienes, a la construcción en general y al levantamiento. Sin embargo, también se debe admitir que una terminología técnica unificada en esta materia, podría facilitar la comprensión y la integración entre las diversas figuras, creando un código común, imprescindible sobre todo, en

¹ Título de la tesis: *La Iglesia de los Desamparados de Les Coves de Vinromá. Hipótesis y restitución virtual de la bóveda de la capilla mayor*. Dirigida por Francisco Juan Vidal (director), Filippo Fantini (codirector), Francisco Grande Grande (codirector) y Esther Capilla Tamborero (codirector). Levantamiento arquitectónico de la iglesia con escáner láser 3D realizado por Pablo Navarro Esteve.



la época actual en la que cobran importancia los grupos multidisciplinares en la intervención en el patrimonio.

El objetivo de la tesis, por lo tanto, es el análisis de la integración entre nuevas tecnologías para el levantamiento arquitectónico, estudiando las ventajas y las limitaciones de cada una de ellas en los diferentes ámbitos arquitectónicos, y sus posibilidades al combinarlas, dándole una visión global buscando unificar terminología y metodología en el campo de la arquitectura y la ingeniería.

Con este objetivo se realiza una serie de casos de estudio, utilizando diferentes técnicas de levantamiento avanzadas con diferentes aplicaciones, integrándose entre ellas, siempre dentro del campo del patrimonio arquitectónico. Estos casos de estudio nos permiten analizar y estudiar dichas técnicas poniendo de manifiesto sus ventajas y sus carencias, permitiendo concluir en cada uno de ellos que la mejor opción es siempre la integración entre varias de ellas. Buscando resolver el problema: “*In the field of architectural survey there isn't the better and decisive technique.*” (Vernizzi 2007, Remondino 2011; citados en Casu y Pisu, 2013: 44)

El primer caso de estudio, como se comentaba, se refiere a una bóveda gótica en la Comunidad Valenciana. Se realiza dicho levantamiento buscando poder efectuar una restitución virtual, que permita comprobar la posibilidad de ejecutar en una segunda fase una restauración real utilizando las piezas de la bóveda aún conservadas dentro del recinto que anteriormente cubría. Este caso de estudio permite comprobar la gran utilidad de este tipo de levantamientos, pues ha permitido estudiar una hipótesis antecedente sobre la bóveda y comprobar mediante una construcción en 3D utilizando los modelos escaneados que no era posible debido a los ángulos de las claves en el sentido vertical, porque si bien el estudio realizado utilizando metodología tradicional, permitía dentro de un margen razonable el estudio de los ángulos en horizontal de la dirección de las claves, la inclinación en sentido vertical era tan sutil que no era apreciable en el estudio realizado anteriormente. Con los modelos 3D de alta precisión, y basándose obviamente en estudios de trazados antiguos, es posible realizar una nueva hipótesis que nos es posible reconstruir virtualmente, permitiendo de este modo comprobar su coherencia geométrica, y la utilidad de la combinación de técnicas avanzadas para obtener dichos resultados.

El segundo caso de estudio, consiste en la anastilosis virtual de algunos frisos de temática de caza situados en Piazza d'Oro dentro del recinto arqueológico de Villa Adriana (Tívoli, Roma). En este, se realiza un escaneado de la Piazza d'Oro, prestando una especial atención a la zona donde se situaban dichos frisos. Cuando se efectúa el escaneado surgen algunos problemas debidos a la luminosidad, a la distancia, etc., problemas presentes en el escáner láser de triangulación. Por ello, se introduce la fotogrametría como un complemento que permite solventar las carencias del escáner láser, y a su vez comenzar a hacer las primeras comparaciones de precisión y de ventajas e inconvenientes entre ambos, para una buena integración. La lectura de las marcas en sus muros, aún reconocibles, permite estudiar el módulo corintio usado en la Piazza.



El tercer caso de estudio, se realiza sobre una bóveda con un fresco del setecientos del Palacio Roncioni, que ha perdido pequeñas partes de su revestimiento, y con ello, algunas partes del fresco. Este caso nos lleva a la búsqueda de la integración de frescos en bóveda, siendo necesario un estudio preciso y detallado de la bóveda, con su consecuente levantamiento. En este caso, el color real y la textura se convierten en un aspecto clave de gran importancia, cobrando así la fotogrametría un papel principal, por ser la técnica que mejores resultados da en cuanto a color en *rendering* foto-realistas en Modelos Digitales de Superficies (MDS). Se realiza un levantamiento con escáner láser y uno fotogramétrico. En la parte de fotogrametría se realizaron diversas pruebas para llegar al modelo más fiel, haciendo estudios para afrontar los problemas derivados de la distorsión de las fotografías (calibración de la cámara, distancia focal, apertura del diafragma...), la zona de solape entre éstas, la iluminación, ángulo de captura, etc.

El último estudio realizado, busca resolver el problema presente en casi todos los levantamientos arquitectónicos realizados hasta ahora: el levantamiento de cubiertas (no transitables) o zonas con imposibilidad de levantamiento por no ser accesibles para poder realizar la campaña fotográfica o el escaneado. Para esta monografía se ha utilizado la Iglesia de San Miniato en Marciana (Cascina, Pisa). En este caso, se introduce la fotogrametría aérea, mediante UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), llamados en español drone o VANT (*Vehículo Aéreo No Tripulado*). Estos instrumentos permiten hacer un levantamiento fotogramétrico aéreo para integrar en el modelo de escáner láser la parte faltante por tratarse de “una zona de sombra” y, por lo tanto, zona no escaneada. Se realiza a su vez una zona de la iglesia levantada por los tres sistemas, que permiten una comparación de precisión entre fotogrametría aérea, terrestre y escáner láser, pudiéndose medir el margen de error introducido en la cubierta.

Estos cuatro casos de estudio, por lo tanto, se presentan como aplicaciones que buscan demostrar la importancia de un levantamiento integrado por varias técnicas, para un buen estudio del patrimonio arquitectónico y arqueológico. Verdiani y Tioli, (2008: 564) afirman que se debe entender “*el levantamiento digital como el primer paso para investigar el monumento arqueológico y para crear su representación digital precisa. De esta manera todo el post-procesado de los datos, los análisis y los desarrollos gráficos se hará teniendo como referencia uno de los estudios más precisos que se ha hecho en esos monumentos, y que se puede hacer muy lejos del monumento*”.

Aunque también se debe tener en cuenta, que como dice Verdiani y Tioli, es solo el primer paso, que el levantamiento es “*La recolección de datos masivos se convierte en un modelo geométrico que paso a paso se analiza para investigaciones históricas, estudios de paisaje, como base para planificar nuevos proyectos para el diseño del museo, verificar las hipótesis y un punto de partida para nuevos y más precisos levantamientos de detalles arquitectónicos y hallazgos arqueológicos.*” (Verdiani y Tioli, 2008: 69) Después del levantamiento se debe hacer todo un proceso de elaboración de datos que permita llegar a verificar una hipótesis, diseñar un museo, etc.



Por otra parte, se busca una unificación de conceptos, de terminología, dentro del campo del levantamiento con herramientas avanzadas en la arquitectura y la ingeniería para solventar el problema citado por Guidi y Remondino (2012): “*At present even no common terminology exists for comparing sensors performances*” en el que se afirma que no existe una terminología común para la comparación de estos sensores; y por Amoroso, G., Apollonio, F.I., Remondino, F., (2010) “*Nel campo dell’acquisizione dei dati tridimensionali con metodologie e strumenti digitali moderni... una limitata disponibilità di informazioni e letteratura relativa agli standard, alle metodologie operative e ai dati di comparazione*” que afirman que en el campo de la adquisición de datos tridimensionales con metodologías e instrumentos digitales modernos existe una limitada disponibilidad de información y literatura relativa a los estándar, a las metodologías operativas y a los datos de comparación, convirtiéndose en un problema esencial que debe ser resuelto. Así se realiza un estudio serio y en profundidad de la terminología utilizada por los diferentes autores dentro del campo de la arquitectura, la ingeniería y la arqueología, presentándose un trabajo de análisis que finaliza con la elección de un término considerado el más adecuado, y la definición de éste, adjuntando el resto de los términos usados para nominarlo entre las diferentes figuras e idiomas. Este capítulo permite buscar cada uno de los términos utilizados en el campo del levantamiento arquitectónico con herramientas avanzadas, y relacionarlo con sus sinónimos. Además, permite conocer los autores que utilizan cada uno de los conceptos, los artículos o libros donde han sido mencionados y una clara definición del concepto, incluyendo aclaraciones que permiten ver las variaciones que se pueden encontrar entre autores que utilizan el mismo término, en algunas ocasiones, referidos a conceptos diversos o con ciertos matices.

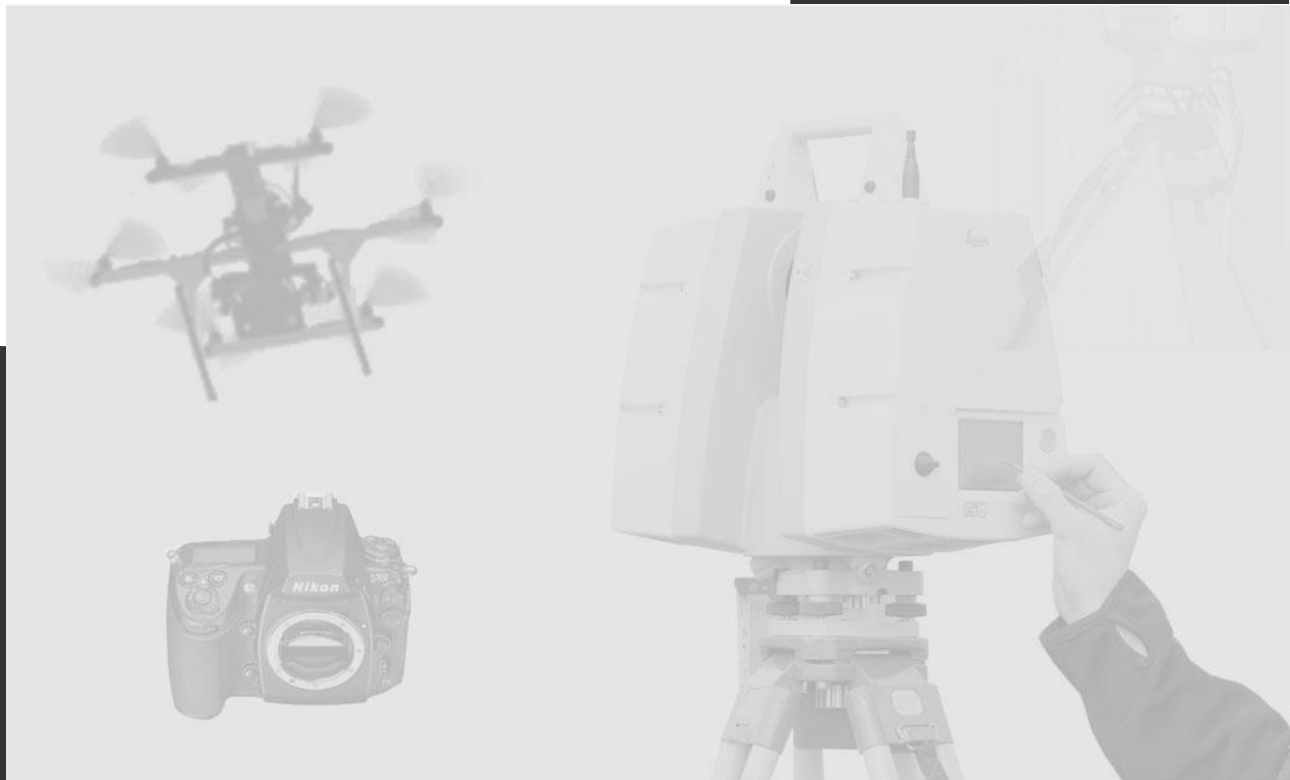


B. REFERENCIAS

- ❖ Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010. “Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione. Utilizzo di laser scanner su superfici marmoree di epoca romana” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 118-161.
- ❖ Casu, P. y Pisu, C., 2013. “Photo-modeling and cloud computing. Applications in the survey of late gothic architectural elements” en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 2013 3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*. 25 – 26 Febrero 2013, Trento, Italia, pp. 43-50.
- ❖ Mtnéz-Espejo Zaragoza, I., 2010. *La Iglesia de los Desamparados de Les Coves de Vinromá. Hipótesis y restitución virtual de la bóveda de la capilla mayor*. Tesina del Máster Oficial de Conservación del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia dirigida por Francisco Juan Vidal. Valencia.
- ❖ Verdiani, G., Tioli, F., 2008. “Villa Adriana in Tivoli: Four years of digital surveys and research growth” en *On the Road to Reconstructing the Past Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) Proceedings of the 36th International Conference Budapest*. Abril 2 – 6, Budapest, Hungría, pp. 564-570.



CAPÍTULO 3



Estado del arte de las metodologías de levantamiento arquitectónico y restitución



A. EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

Si se busca la definición sobre el levantamiento arquitectónico se pueden encontrar diferentes descripciones de expertos en el campo, Buill, Núñez y Rodríguez (2007: 15) que afirman: *“El término levantamiento es utilizado en el ámbito topográfico y se refiere a la toma de datos de un objeto y su representación gráfica, en tres dimensiones o utilizando algún sistema de proyección siendo el sistema acotado el más utilizado como representación final. En el caso arquitectónico y arqueológico el levantamiento se concreta en la recapitulación del proceso desarrollado por el arquitecto, las modificaciones posteriores y el deterioro que ha sufrido con el paso del tiempo (Cramer, 1986; citado en Buill, Núñez y Rodríguez, 2007). El levantamiento puede considerarse un método de investigación pues sus resultados nos permiten profundizar en el conocimiento de nuestro patrimonio, que es la base imprescindible para su conservación”*.

Benedetti, Gaiani y Remondino (2010: 17) lo definen como *“un elemento estructural primario de la disciplina que nos permite tomar consciencia de un objeto artificial, (...), y comunicar sus características a los potenciales utilizadores mediante su representación”*.

Interpretando estas definiciones podemos decir que el levantamiento arquitectónico es una metodología utilizada para copiar la información de un objeto de estudio, en nuestro caso arquitectónico, del plano real a su representación ya sea en papel o en modo digital.

El levantamiento arquitectónico es un procedimiento de conocimiento que se viene realizando desde hace siglos. Desde la antigüedad, el hombre opta por utilizar la herramienta del dibujo para documentar gráficamente sus propiedades terrestres (Juan Vidal, F., 2012), o para representar cuanto ha creado o modificado (Docci y Maestri, 1984: 17). En otros casos, la necesidad de conocer la situación de un edificio para realizar modificaciones o mejoras, o cualquier tipo de planificación, ha hecho siempre necesario realizar un proyecto previo, utilizando como base, los datos del edificio precedente. El levantamiento es, como afirman Docci y Maestri (1984: 7), un elemento indispensable en la restauración, el urbanismo, el análisis arquitectónico, la historia de la arquitectura, la arqueología, las controversias de carácter judicial, el censo de los bienes culturales y la didáctica en el ámbito de la facultad de Arquitectura e Ingeniería. Concretizando más, el levantamiento es necesario, en la restauración conservativa de un edificio antiguo o moderno, en el caso de la reutilización de un inmueble, en las excavaciones estratigráficas, etc.

Durante mucho tiempo, los croquis y la cinta métrica son utilizados como la metodología de levantamiento más preponderante, usándose en otros casos sistemas de telemedición o proto-instrumentos de medición topográfica, utilizados con provecho para mediciones arquitectónicas, desde la época de los egipcios (Docci y Maestri, 1984: 20-24). Será en el siglo XIX, cuando aparece la fotogrametría clásica arquitectónica, que supone toda una innovación en el mundo del levantamiento.

En las últimas décadas, han irrumpido nuevos instrumentos, sistemas y metodologías de levantamiento, que han supuesto un gran avance, permitiendo obtener en menos tiempo una



cantidad de información extraordinariamente mayor. Así los croquis y la cinta métrica, son desplazados por herramientas como el escáner láser 3D, o sistemas como el *Image-based modelling*, que sucede a la fotogrametría clásica permitiendo obtener, con procesos automáticos o semi-automáticos, objetos tridimensionales a partir de fotografías realizadas desde diferentes puntos de vista, siguiendo ciertos pasos que se comentarán en el apartado adecuado.

El Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) cita cuatro formas principales de expresión del levantamiento arquitectónico (CIPA-ICOMOS, 1980):

- Trazados en alzado, plantas y secciones
- Secciones horizontales y verticales
- Modos gráficos de expresión de las formas no planas
 - o Planta-alzado
 - o Cortes verticales
 - o Isolíneas (curvas de nivel-profundidad)
- Levantamiento gráfico completado con puntos acotados

Todos y cada uno de ellos son resultados finales fácilmente obtenibles con estas metodologías de levantamiento.

Las fases de levantamientos se pueden dividir en cuatro grandes etapas (Buill, Núñez y Rodríguez, 2007): La primera busca conocer el edificio objeto de estudio, fundamentalmente edad y estilo, los hechos que ha vivido y su evolución constructiva. La segunda es la toma de datos, los croquis de apoyo, las fotografías, acotaciones y medidas topográficas necesarias. La tercera etapa constituye la representación gráfica en la que se desarrollará el trabajo y, por último, la lectura de la obra, que debe examinar aspectos de tipo formal y compositivo (modulación, ritmos, simetría), dimensiones (escalas, errores) y constructivos (tipologías constructivas).

Durante el desarrollo de la tesis se verá reflejada cada una de las etapas en los cuatro casos de estudio que sirven como ejemplificación del tema que se está tratando.

Dentro del levantamiento arquitectónico se deben tener en cuenta algunos aspectos, como son la precisión y los métodos.

El tema de la precisión se convierte en un aspecto esencial, en el caso del levantamiento para la conservación del patrimonio arquitectónico, ya que, como se verá en los casos de estudio, los resultados vienen directamente ligados a dicha precisión.

Se debe aclarar que dentro del tema de la precisión, se deben considerar otros conceptos, asociados al tema de la precisión, como la exactitud y la tolerancia. Cuando se habla de la precisión, en realidad no se utiliza el término correcto, ya que el término correcto según la definición encontrada en el VIM (*International Vocabulary Metrology*), sería la exactitud. Éste la define como “*el grado de concordancia entre el valor de la magnitud medida y un valor de la*



*cantidad real de un mesurando*¹, mientras que la precisión es definida como “*el grado de concordancia entre las medidas o valores de cantidad medida obtenida mediante la réplica de medidas en el mismo o similar objeto, bajo condiciones específicas*”². Está claro que ambos conceptos están estrechamente unidos, pero el concepto del que se habla es el de la exactitud. Sin embargo, se decide dejar el uso del término “precisión” por ser éste el comúnmente usado, y considerarse por ello, más conveniente. La tolerancia, por otra parte, como la define la RAE, es “*la máxima diferencia que se tolera o admite entre el valor nominal y el valor real o efectivo en las características físicas y químicas de un material, pieza o producto*”.

Teniendo presente dichas ideas, se puede afirmar que la precisión y la tolerancia son dos conceptos muy importantes a la hora de decidir el método de levantamiento más adecuado, y dentro de los métodos, que se pueden considerar como grandes grupos, también la elección del sensor dependiendo de la precisión necesaria o establecida como base y, obviamente, su tolerancia. La elección de un instrumento sin considerar este factor puede suponer que el más sofisticado y potente instrumento genere una serie de datos no aprovechables. Sirva como ejemplo el levantamiento de una fachada de una iglesia. Para hacer la captura de datos, se podría utilizar un escáner láser (la profundización en este tipo de tecnología se realizará en el apartado adecuado). Sin embargo, dentro de la gama de escáner láser utilizados para la arquitectura encontramos tres tipos con precisiones muy diferentes en base a la distancia de captura. El escáner de triangulación alcanza una precisión igual a décimas de micrón, pero en el caso de la fachada de una iglesia, dicha precisión no es necesaria, el tiempo necesario para realizar la captura sería muy elevado convirtiendo el método en no adecuado. Se encuentran, sin embargo, otros tipos de escáneres como el de diferencia de fase o el de tiempo de vuelo, con precisiones cercanas al cm, que en un tiempo mínimo de levantamiento da una información de alta calidad, y óptima para el estudio. Ejemplos similares encontramos en el caso de la fotogrametría o la topografía.

Por otra parte, la precisión, y su tolerancia, también van ligadas a la escala de representación que se decida dar al objeto. Se debe tener conciencia que para un mismo objeto, dependiendo de la escala, necesitará un nivel de detalle diferente. Si se tiene en cuenta la tolerancia visiva, relativa a la agudeza visual, con el valor usado comúnmente de 0,2mm a escala de levantamiento para un plano a escala 1/E, la tolerancia será 0.2E mm. Siguiendo esta ecuación podemos observar la tabla de Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007: 17) donde se observan las tolerancias en las escalas de trabajo más empleadas:

¹ Traducción realizada por la autora.

² Traducción realizada por la autora.



<u>Escala</u>	<u>Tolerancia</u>
1/200	4 cm
1/100	2 cm
1/50	1 cm
1/20	4 mm
1/10	2 mm
1/5	1 mm
1/1	0.2 mm

Además de la precisión, otro elemento que deberá ser tenido en cuenta para la elección del instrumento de levantamiento es la capacidad del material a cooperar ópticamente con respecto a la señal emitida por dicho instrumento. Se pueden encontrar algunos estudios sobre dicho tema, como por ejemplo en el libro de Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (2010), en el que se realiza una comparación de diversos sensores activos aplicados sobre un mismo material, un fragmento de mármol. Los resultados son diversos unos de otros. No se trata solo de una cuestión de precisión unida a la densidad de la captura, sino también de la respuesta de los materiales a la señal emitida. En general cuando se realizan levantamientos arquitectónicos se realiza sobre materiales opacos, que no presentan ningún problema con la reflectancia de la señal. Sin embargo, cuando se debe hacer un levantamiento sobre un material traslúcido o transparente, algunos problemas aparecen para ciertos sensores activos. Esto se debe a que parte de la señal emitida es absorbida por el material. Como se comentaba en el ejemplo del mármol, este material es cristalino, y en el caso del escáner a variación de fase, parte de la luz emitida por el sensor es absorbida, y el resultado es inaceptable, ya que presenta una calidad deficiente.

Los métodos de levantamiento podemos dividirlos en 3 grandes grupos. El primero, el más clásico, engloba las técnicas tradicionales y los aparatos más sencillos utilizados de forma directa para medir el objeto. El segundo grupo estaría compuesto por los métodos y técnicas topográficas. Por último, un tercer grupo que incluiría los métodos basados en la fotografía.

- Métodos de medida directa. La cinta métrica utilizada como instrumento principal es el más frecuente de estos métodos y brinda una calidad apropiada si no se efectúan medidas encadenadas. La cinta metálica y el hilo de invar ofrecen en general mejores resultados, ya que soportan menores deformaciones por estiramiento. Se observa en la actualidad un creciente uso de los medidores láseres manuales sustituyendo a la cinta métrica, pero la metodología es análoga.
A parte de la cinta métrica, encontramos otros instrumentos de apoyo empleados comúnmente: como la plomada para la definición de verticales, el nivel de agua para la definición de horizontales y el peine de arqueólogo para la medición de molduras.
- Métodos topográficos. Se pueden catalogar en tres grupos según el tipo de coordenadas que representen: planimétricas (medida de abscisas y ordenados referenciadas a un sistema cartesiano, triangulación y/o trilateración, poligonación), altimétricas (mediante niveles topográficos o taquímetros) o la posición tridimensional directamente (levantamiento planimétrico más nivelación, teodolitos, estaciones totales, barridos láser escáner 3D).



Figura 3.01 y 3.02. Imágenes de dos instrumentos de medición altimétrica. A la izquierda un nivel topográfico fijo situado dentro de la torre de Pisa. A la derecha un nivel topográfico situado sobre un trípode.

- Métodos fotogramétricos. Dependiendo de los datos que proporcionen pueden dividirse en levantamientos planimétricos (métodos fotogramétricos monoscópicos, métodos estereofotogramétricos, rectificación simple, mosaico, ortofotografía) o tridimensionales (métodos fotogramétricos monoscópicos, métodos estereofotogramétricos, rectificación encadenada).

Entre todos ellos nos centraremos en el levantamiento tridimensional con herramientas avanzadas, y especialmente en dos tipos de levantamientos: El método “*Image-based modelling*” y el “*Range-based modeling*”, haciéndose esta elección por ser en la actualidad los dos procedimientos más usados para el levantamiento arquitectónico a partir de nueva tecnología, para obtener modelos poligonales de alto nivel de detalle.

Sin embargo, antes de introducirnos más específicamente en estos dos métodos, se debe hablar de lo que son los sensores tridimensionales. Basándonos en Guidi, Russo y Beraldin (2010: 9), podemos afirmar que los sensores tridimensionales son aquellos instrumentos que permiten generar una imagen 3D de la escena que encuadran. Estas imágenes 3D pueden ser, bien la representación de la superficie externa de un objeto; o bien, la representación de todo aquello que está en el interior de un volumen que tal superficie encierra. Atendiendo a sus características, los sensores tridimensionales pueden ser clasificados de forma diversa. Cabe destacar un tipo de sensores que usa radiaciones luminosas no ionizadas para explorar, sin ningún contacto físico, la superficie de un objeto. Dependiendo de la naturaleza de la luz usada para efectuar la medida encontramos sensores tridimensionales Pasivos y Activos. Los Pasivos son aquellos que utilizan la luz natural, presente en el ambiente abierto durante el día a causa de la irradiación solar, o en ambiente cerrado usando la acción de iluminadores genéricos situados de cualquier manera con respecto al objeto. Los Activos serán, sin embargo, aquellos que necesiten la luz codificada de tal modo que desarrolle un rol en el proceso de medida.

Dentro de estas técnicas para reproducir modelos tridimensionales se deberá elegir la más adecuada, como comenta Manferdini y Remondino (2010: 164) considerando: los objetivos de proyecto, el presupuesto disponible, las características y las dimensiones de los objetos a levantar. Asumiendo que un levantamiento debe siempre ser métrico y geo-referenciado, para elegir la técnica de levantamiento adecuada, se deberá tener en cuenta:

Levantamiento con sensores pasivos: Los datos se adquieren a través de sistemas poco costosos y fácilmente transportables. Las imágenes necesitan un modelo matemático para recabar la información sobre la posición espacial de los puntos del objeto desde las imágenes bidimensionales. Es necesaria una cierta experiencia en la adquisición de datos y en la elaboración de la información registrada.

Levantamiento con sensores activos: Los instrumentos activos levantan distancias y producen directamente medidas tridimensionales del objeto levantado. Ejemplos típicos son el escáner láser (*Time of Flight* o a triangulación) o sistemas de proyección de haces (*stripe projection system*). Los sensores de distancia permiten obtener detalles de un objeto con cierta precisión (desde decenas de micrón hasta el cm). Generalmente son de fácil utilización, pero presentan ciertas desventajas ya que son costosos, aparatosos, específicos para un intervalo de distancia y volumen determinado, y, presentan problemas con algunos materiales. A pesar de ello, los sensores de distancia representan una herramienta de trabajo empleada frecuentemente y conveniente, sobre todo, en caso de usuarios no muy expertos, ya que permiten el levantamiento de millones de puntos en pocos instantes.



Figura 3.03. Escáner láser a triangulación NextEngine Model 2020i. Figura 3.04. Escáner láser a Tiempo de Vuelo Leica C10.

Se hablará de los sensores activos y pasivos más extensamente en los próximos apartados.

i. *Image-based Modelling*³

La modelación tridimensional del patrimonio cultural partiendo de imágenes digitales a diferentes escalas ha obtenido recientemente una considerable atención por parte de la comunidad científica. Probablemente, esto se deba a dos aspectos: por un lado, el creciente interés por parte de la UNESCO y de otras organizaciones nacionales e internacionales hacia estas técnicas, y, por el otro, el desarrollo de nueva tecnología (hardware y software) para el registro, la elaboración, la gestión y la visualización de datos 3D.

Actualmente existen diversas tipologías de imágenes, que varían en función de la resolución geométrica, de la resolución espectral (número de canales espectrales) y de los costes. Para la adquisición de datos se utilizan diferentes instrumentos: imágenes de satélite a media y a alta resolución, cámaras digitales para el levantamiento aéreo, plataformas radar espaciales y aéreas, modelos de helicópteros (UAV) con cámaras digitales, cámaras panorámicas, video cámaras o teléfonos móviles. Además de estos instrumentos de adquisición, los sistemas GPS y INS/IMU permiten navegaciones y localizaciones precisas para la geo-referenciación de los datos.



Figuras 3.05 y 3.06. Imágenes de dos UAV, utilizados para hacer un levantamiento de la cubierta de una iglesia y el puerto marítimo de Marina di Pisa.

Paralelamente a la amplia variedad de imágenes digitales, en los últimos años se ha avanzado mucho en el desarrollo de software de fotogrametría y han aparecido nuevos procesos automáticos destinados, en particular, a la orientación de las imágenes y a la generación de modelos digitales de superficie (DTM o DSM).

Entre las diferentes plataformas de adquisición, cabe destacar un nuevo instrumento: los “*Unmanned Autonomous Vehicles*” (UAV), pequeñas plataformas (aeroplanos o helicópteros sin piloto a bordo) que pueden ser controlados desde una posición remota o que pueden volar automáticamente utilizando planos de vuelo pre-programados. Las tecnologías UAV se han

³ Manferdini y Remondino, (2010: 162-199), Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., (2010: 16 - 72), Cueli López, J., 2010 “<http://www.worldphotogrammetry.com/home/itemlist/category/6-cursos-gratuitos.html>” y Slama, CC., (1980).



utilizado tradicionalmente en tareas de vigilancia y en el ámbito militar. Sin embargo, en la actualidad se han empezado a utilizar en el campo arqueológico, documental y para el levantamiento.

La fotogrametría (Kraus, 1994) es la ciencia que permite determinar la posición y la forma de los objetos a partir de fotografías. Los resultados de las medidas fotogramétricas pueden ser: numéricos, dibujos o imágenes. Los numéricos son coordenadas de puntos objeto en un sistema de coordenadas tridimensionales (adquisición de datos numéricos); los dibujos son cartas topográficas representando detalles planimétricos y curvas de nivel, u otras representaciones gráficas de objetos; y las imágenes, son en general fotografías rectificadas (orto-fotoplanos) y mapas derivados de éstas, aunque también son en algunos casos imágenes digitales.

La fotogrametría, según Manferdini y Remondino, (2010: 167) tiene la capacidad de establecer una relación geométrica entre las imágenes y el objeto real en el momento de la toma fotográfica. Una vez reconstruida esta relación mediante el uso del modelo matemático (colinealidad), es posible obtener información métrica sobre el objeto a través de imágenes. En fotogrametría, sensores ópticos pasivos como las foto-cámaras son utilizadas para capturar la reflexión de la luz natural sobre la superficie del objeto a levantar. Al contrario, los sensores activos levantan la luz emitida por el instrumento mismo y reflejada sobre el elemento objeto de análisis. Análogamente a lo que ocurre en la visión humana, si un objeto se capta en al menos dos imágenes desde dos puntos de vista diferentes, las diferentes posiciones del objeto en las imágenes permite obtener vistas estereoscópicas e información 3D en las áreas sobrepuestas de las imágenes.

Tradicionalmente, se ha considerado un procedimiento largo y manual; sin embargo, el crecimiento experimentado por esta tecnología durante los últimos años ha tenido como consecuencia el aumento del rendimiento y la automatización de muchos procesos.

Actualmente, restituir un modelo completo, preciso y detallado, requiere la intervención manual de un operador en el proceso de modelado. Este hecho no es necesario cuando se busca crear un modelo 3D cuyo objetivo sea simplemente la visualización o para aplicaciones de realidad virtual, pues, en este caso es posible recurrir a procesos completamente automatizados (“*shape-from-motion*”).

Las ventajas de la fotogrametría son bastante evidentes (Manferdini y Remondino, 2010: 168):

- Las imágenes contienen toda la información para la restitución de modelos 3D (geometría y textura).
- Las operaciones de adquisición fotográfica son generalmente más simples y rápidas si se comparan con la medición directa de un objeto.
- El levantamiento mediante las imágenes evita eventuales daños al objeto.
- Un objeto puede ser reconstruido mediante imágenes de archivo aunque ya no esté disponible o esté dañado.

- Los instrumentos fotogramétricos (cámaras y software) son generalmente menos costosos, portátiles y fáciles de usar.
- Los recientes desarrollos en el modelado automático de superficies mediante las fotografías permiten obtener resultados comparables a aquellos obtenidos con sensores activos (Remondino et al., 2008; Manferdini y Remondino, 2010)

Como se ha explicado anteriormente, el objetivo primario de la fotogrametría es la adquisición de información métrica precisa y fiable. Ésta se basa en el principio de la colinealidad que establece como el centro de proyección de la cámara fotográfica, un punto P' sobre la imagen y su correspondiente punto P en el espacio deben encontrarse sobre una línea recta o rayo. Para calcular las coordenadas 3D de un punto identificado en al menos dos imágenes, se intersectan los rayos homólogos (triangulación fotogramétrica).

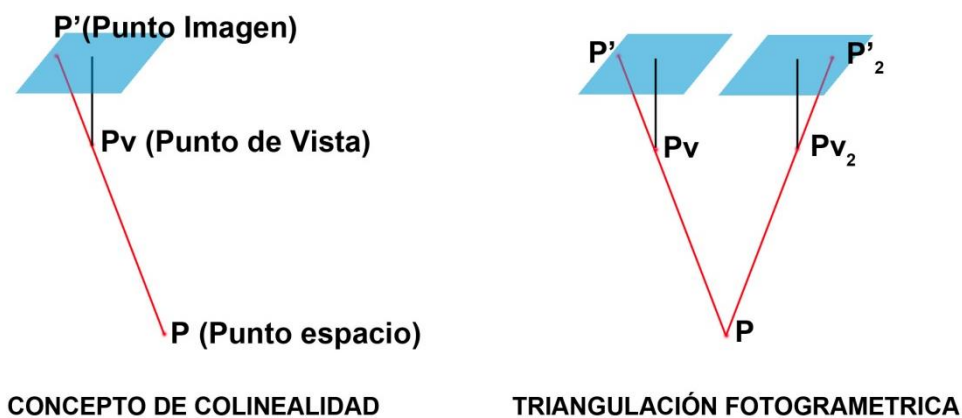


Figura 3.07. Imagen del concepto de colinealidad y triangulación fotogramétrica.

El conjunto de trabajos para derivar información 3D y métrica de una escena desde imágenes comprende la calibración de la foto-cámara, planificación y ejecución del reportaje fotográfico, orientación de las imágenes, medida y restitución 3D, generación de la superficie, “*texture mapping*” y visualización.

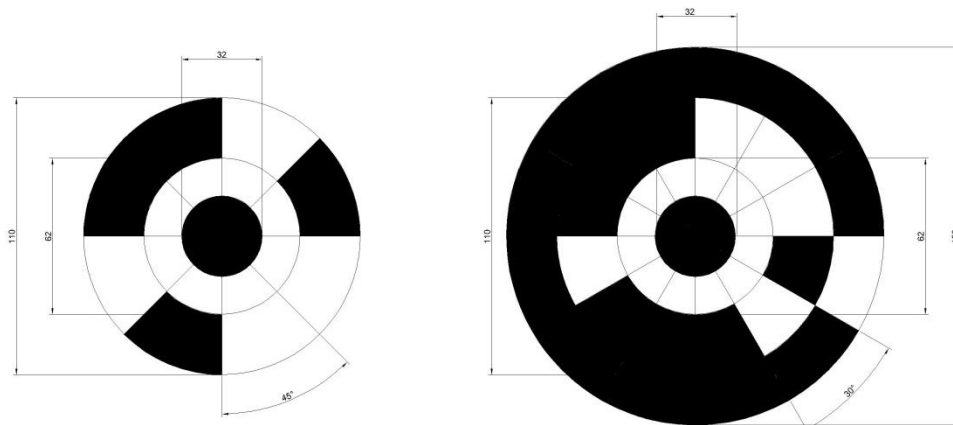
La calibración de la cámara y la orientación de las imágenes son procesos de fundamental importancia. En la fase de calibración es importante distinguir entre parámetros internos y externos de las cámaras. Los parámetros de orientación internos consisten: en la constante de la cámara (o longitud focal, f), posición del punto principal (x_0 , y_0) y algunos parámetros adicionales usados para modelar eventuales errores sistemáticos debidos, por ejemplo, a la distorsión de la lente. Los parámetros de orientación externos consisten en: las 3 coordenadas espaciales (posición en el espacio de la cámara, generalmente indicados con X_0 , Y_0 , Z_0) y en las 3 rotaciones del centro prospectivo de la cámara en el espacio. La obtención tanto de los parámetros internos como el de los externos se puede hacer, en general, utilizando dos imágenes (orientación relativa) o bien, mediante un set de imágenes (solución “*bundle*”).

Calibración

Para poder utilizar una cámara digital con fines métricos y para la correcta y detallada documentación y conservación digital, el instrumento debe ser calibrado. En muchas aplicaciones la fase de calibración de la cámara consiste en la sola determinación de la longitud focal, mientras que, para efectuar restituciones más precisas, es necesario calcular todos los parámetros de calibración citados anteriormente. Así, con el proceso de calibración se determina la desviación geométrica entre la realidad (colinealidad) y el sistema de adquisición de las imágenes.

Existen diversos algoritmos para calibrar las cámaras digitales. El método más difuso es el llamado “*self-calibration bundle adjustment*”, introducido en la fotogrametría a finales de los años setenta. El modelo matemático de base utiliza las ecuaciones de colinealidad con el fin de obtener los considerados parámetros adicionales (AP). Con ello se consigue eliminar posibles errores sistemáticos presentes en el interior de la cámara.

Uno de los métodos más comunes para realizar el proceso de calibración consiste en la adquisición de imágenes de un objeto tridimensional constituido por puntos señalizados (target o dianas) bien reconocibles, medibles y con elevada precisión en las imágenes. Los target suelen ser coordenadas 3D conocidas y, por lo tanto, pueden ser utilizadas como puntos de control en la solución del *bundle*. Existe también la posibilidad de utilizar puntos naturales pero su medida tendrá una precisión menor con respecto a aquella de los target.



Figuras 3.08 y 3.09. Targets del programa Photomodeler. A la izquierda diana de 8-bit y a la derecha diana RAD Coded (parte de una diana de 12-bit).

El algoritmo de *bundle adjustment*, restituye simultáneamente todos los parámetros desconocidos del sistema, además de la estimación de las precisiones y de las correlaciones de dichos parámetros. Los parámetros desconocidos del sistema son: la orientación de la cámara (interior y exterior), las coordenadas de los puntos homólogos entre las imágenes y los

parámetros adicionales (AP). Las observaciones son las coordenadas de los puntos homólogos medidos en las imágenes. Por cada observación se escribe una ecuación de colinealidad y el sistema de ecuaciones, alineado y resuelto iterativamente, produce las incógnitas buscadas.

Además de los 3 parámetros usados para calcular la longitud focal correcta y la posición del punto principal sobre el sensor, el modelo contiene 3 parámetros para modelar la distorsión radial (K_i), dos para la distorsión tangencial (P_i), un parámetro para definir la exacta dimensión del pixel sobre el sensor y uno para corregir el corte de los pixel sobre el plano de la imagen (S_x). Los últimos parámetros son, generalmente, poco usados en nuestro ámbito de estudio.

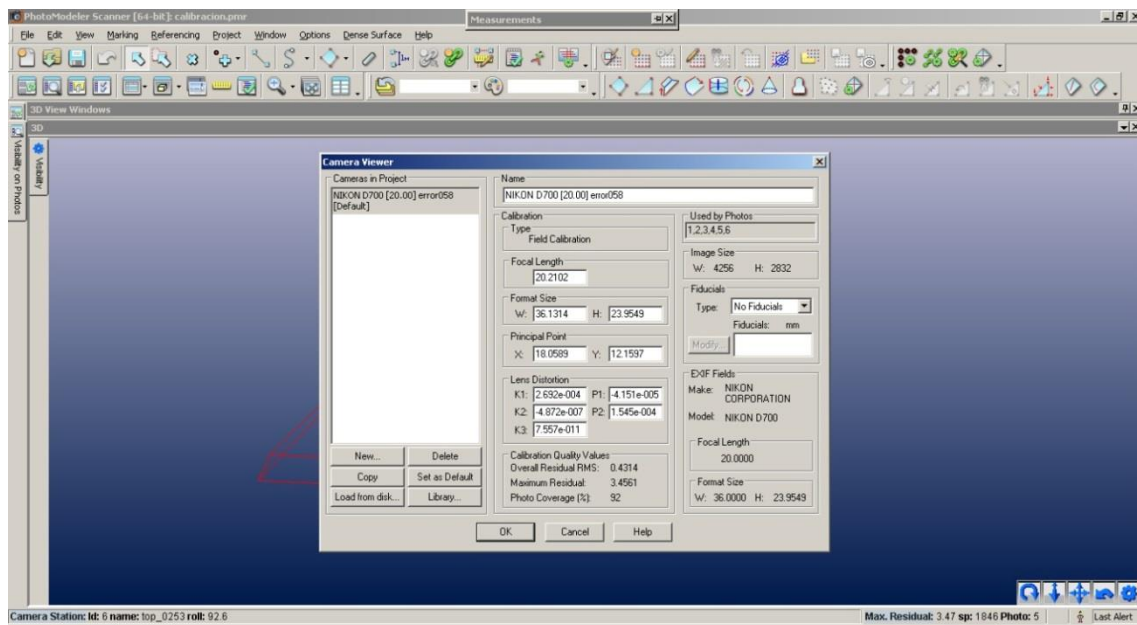


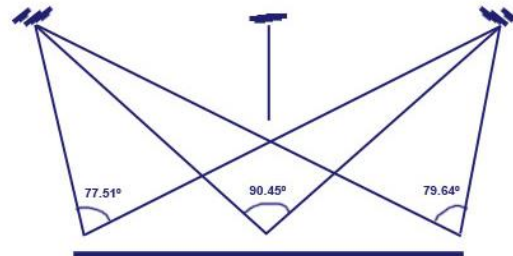
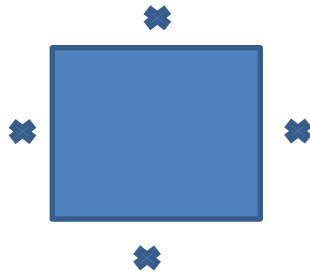
Figura 3.10. Pantalla de *Photomodeler* con los valores de los parámetros calculados de una cámara al realizar su calibrado.

Los tres parámetros adicionales responsables de la evaluación de la distorsión radial (Δr) se expresan mediante la ecuación polinomial:

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7$$

donde “r” indica la distancia radial. La distorsión radial varía en función de la longitud focal. Los coeficientes K_i están estrechamente correlacionados y la mayor parte del error se representa con el término $K_1 r^3$.

La distorsión tangencial es debida, principalmente, a la ausencia del alineamiento de la lente a lo largo del eje óptico. Debido a ello, los parámetros de distorsión tangencial (P_1 , P_2) están fuertemente relacionados con la posición del punto principal (x_p , y_p).



Figuras 3.11 y 3.12. Esquemas de las posiciones de la cámara para realizar una óptima calibración.

Para realizar una calibración correcta es preferible utilizar de imágenes que hayan sido capturadas a diferentes distancias del objeto, obtenidas rotando la cámara de ± 90 grados, convergentes y que, a su vez, los puntos presenten una distribución uniforme en las diversas imágenes. La calidad de la calibración está fuertemente influenciada por la geometría del objeto a levantar y por la configuración de las estaciones de captura. Diferentes estudios experimentales en el ámbito de la fotogrametría *close-range* han demostrado que (Remondino y Fraser, 2006: 269):

- La precisión de la calibración aumenta con la convergencia de las imágenes usadas y con la relación base/profundidad (B/D).
- La precisión aumenta al aumentar el número de rayos por cada punto levantado.
- La precisión aumenta con el número de puntos levantados por cada imagen, teniendo al menos una decena de puntos por imagen.
- La auto-calibración es fiable solo en los casos en los cuales la geometría favorece un buen levantamiento.
- Un objeto plano puede ser utilizado para calibrar una cámara solo en el caso en el cual las imágenes se adquieran con ángulos de rotación ortogonales al plano de levantamiento, sean a distancia variable del objeto y presenten un elevado grado de convergencia.
- Es siempre aconsejable tener imágenes rotadas y adquirir imágenes rotando la cámara en ± 90 grados.

Network: Planificación y ejecución del reportaje fotográfico

Para realizar una correcta restitución de un modelo geométrico tridimensional, se deben tener en cuenta una serie de factores, de los que en parte dependerá la calidad del modelo y la precisión máxima adquirible.

En primer lugar, es muy importante la configuración de la cámara cuando se van a realizar las fotografías. La cámara presenta una serie de parámetros que deben ser elegidos con conciencia:

- Velocidad ISO. El índice ISO determina la sensibilidad de la imagen hacia la intensidad de la luz que recibe. Este valor es clave para la correcta exposición de la imagen. En el caso de las imágenes para restitución cuanto más baja es la velocidad ISO es mejor. Cuanto menor es el ISO el grano es más fino y la nitidez mayor.
- Número f. Es la apertura del diafragma en el objetivo, o lo que es lo mismo la relación entre la longitud focal y el diámetro de apertura efectivo (f/d). Su ajuste permite modificar el tamaño de la pupila y regular la cantidad de luz que alcanza el sensor. Este factor, en práctica, gestiona la nitidez en los diferentes planos presentes en la imagen. Si el divisor de “f” es bajo, el resultado es una imagen nítida de los objetos presentes en el primer plano y una parte difuminada correspondiente a los planos secundarios. En el caso de la fotografía para la restitución, es interesante que toda la fotografía esté enfocada, por lo que se busca un “d” alto.
- El tiempo de exposición. Es el tiempo durante el cual el obturador permite pasar la luz al sensor. Éste varía en función de los parámetros anteriores. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que dependiendo del tiempo de exposición, existe un mayor riesgo de que las fotografías se presenten “movidas”. Este riesgo se elimina cuando se utiliza el trípode como elemento sustentante de la cámara.

A parte de los parámetros comentados, otro factor importante es el estudio de la posiciones de la cámara en el levantamiento con respecto al objeto de estudio. Para hacer posible que los mismos puntos del objeto sean capturados en dos fotogramas consecutivos, es necesario que estos presenten un área en la cual ambos contengan la misma porción de objeto (Cannarozzo, Cucchiari y Meschieri, 2012: 35). Un recubrimiento alto es importante para obtener un modelo de alta calidad.

El factor que permite obtener el recubrimiento deseado (generalmente llamado, μ) es la base de captura (B). En efecto, cuanto menor es el valor de “B” mayor es el recubrimiento entre capturas y mayor la precisión. En general, el valor óptimo es un 60% de recubrimiento entre dos fotografías consecutivas.

Por otra parte, la base de la captura “B” puede ser calculada mediante la siguiente fórmula (Cannarozzo, Cucchiari y Meschieri, 2012: 40):

$$B = L - \mu \cdot L = L \cdot (1 - \mu)$$

Así sabiendo que $L = l (A / p)$

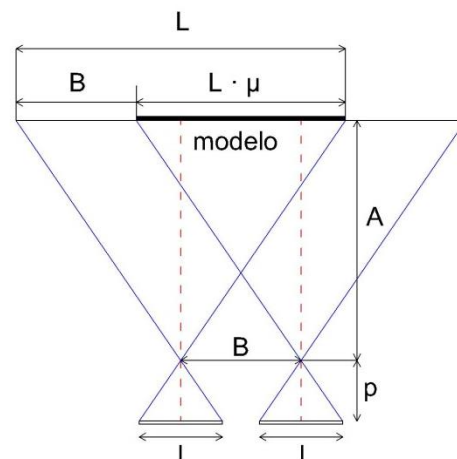


Figura 3.13. Relación entre la distancia entre dos capturas (B) y la distancia de la cámara al modelo (A).

Se puede llegar a:

$$B = \frac{H \cdot l}{p} \cdot (1 - \mu) = l \cdot E_f \cdot (1 - \mu)$$

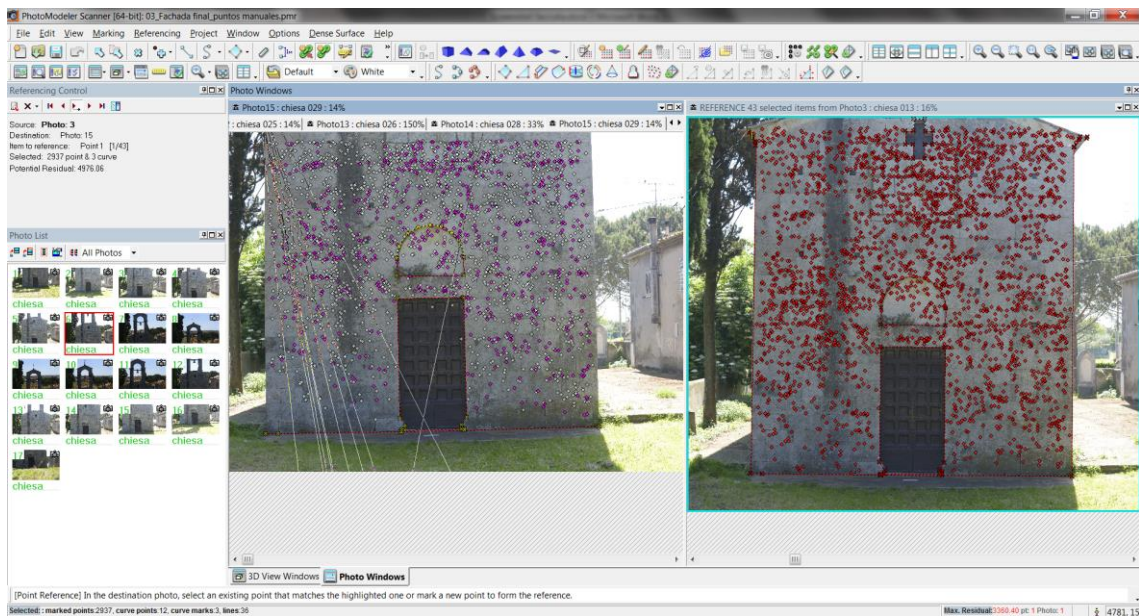
La base de captura es proporcional a las dimensiones del formato de la cámara y a la distancia del objetivo al modelo.

Orientación de las imágenes

La fase de orientación consiste en encontrar los parámetros de orientación externa (3 de posición y 3 de rotación) de cada imagen que se está utilizando.

La orientación externa de las imágenes se calcula siempre a través de un procedimiento que está compuesto por dos fases. En primer lugar, se realiza una evaluación e individualización de algunos puntos notables dentro de la imagen y una asociación a cada uno de ellos de la información más destacada presente en el entorno del punto.⁴ Tras esta primera identificación de puntos, utilizando el método *bundle-adjustment* y el principio de colinealidad se obtienen un conjunto de puntos homólogos entre las imágenes. Cada ecuación de colinealidad corresponde a un punto imagen. Tales ecuaciones forman un sistema que se resuelve con el método iterativo de los mínimos cuadrados (Gauss-Markov), el cual permite obtener las coordenadas tridimensionales de todos los puntos imagen, los parámetros externos de orientación de la cámara y los valores estáticos de estima de los parámetros desconocidos.

En la fase de orientación, los parámetros internos de la cámara ya no se consideran como incógnitas, sino fijos.



⁴ http://bias.csr.unibo.it/maltoni/v&r/DispensePDF/7_V&R_FeatureLocali.pdf (última fecha de consulta: 17/02/2014)

Figura 3.14. Imagen de dos fotogramas en las que se pueden observar los puntos homólogos encontrados en modo automático, dentro del programa *PhotoModeler Scanner*.

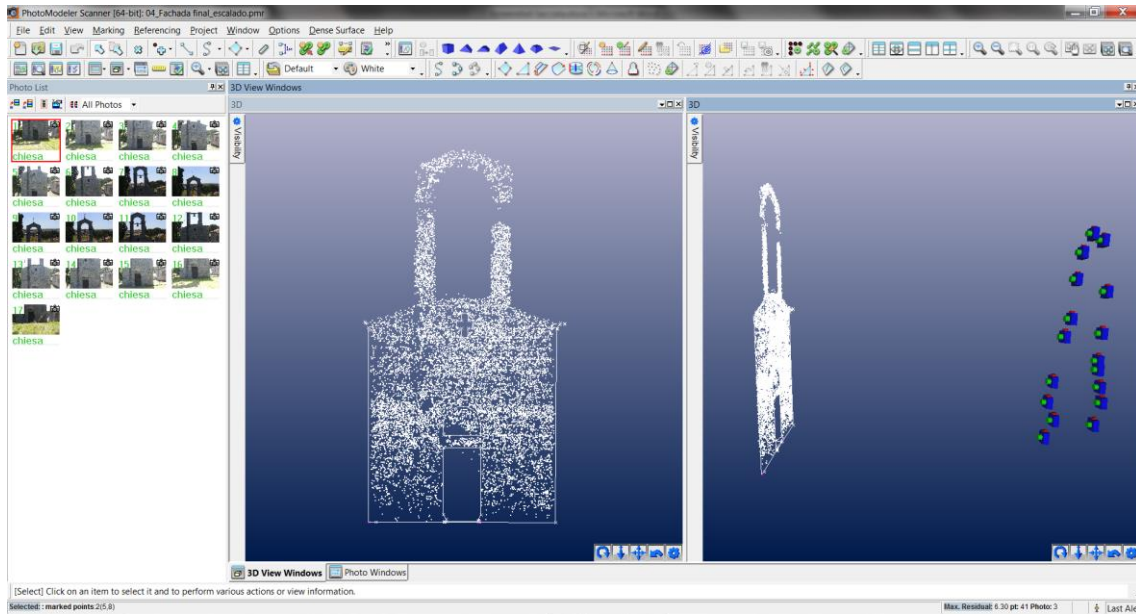


Figura 3.15. Imagen del software *PhotoModeler Scanner* en la que se pueden visualizar la situación de las cámaras orientadas.

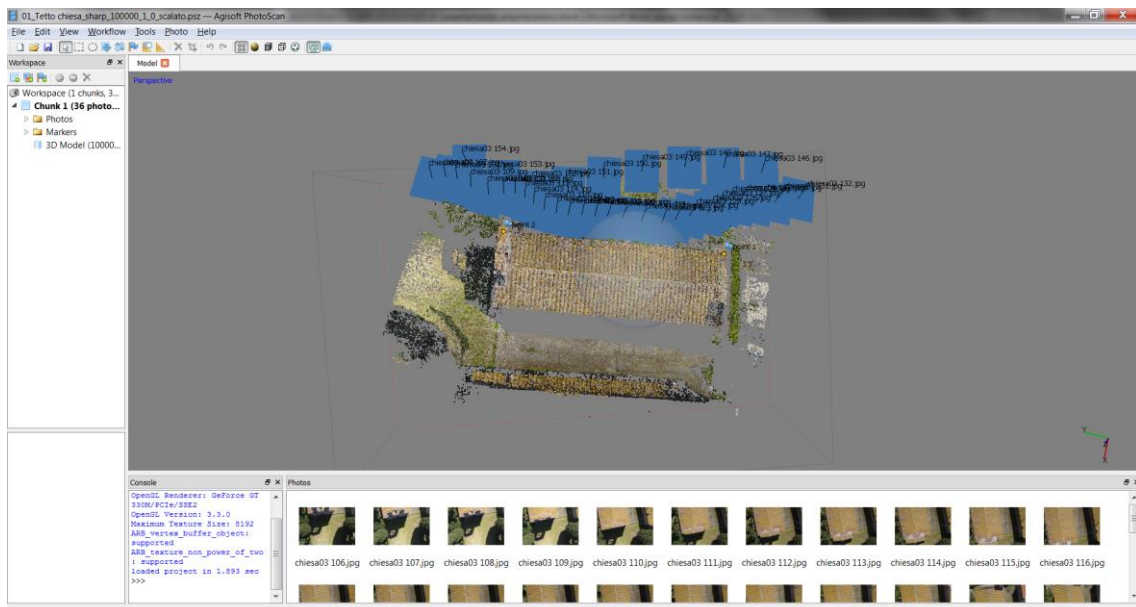


Figura 3.16. *Screenshot* del software *Agisoft PhotoScan* en el que es posible observar la situación de las cámaras con respecto al objeto.

Restitución 3D

Una vez realizada la calibración y la orientación de las imágenes se pasa a la fase de restitución del objeto mediante identificación de puntos homólogos entre las imágenes.

Los puntos se individualizan en las zonas más sobresalientes del objeto que se debe restituir, de modo que sea posible poder después definirlo a través de líneas y superficies.

Cuando la geometría del objeto puede ser determinada empleando pocos puntos se efectúan medidas manuales o semi-automáticas. Sin embargo, los procesos automáticos se utilizan para la adquisición de superficies irregulares en las cuales es necesaria una restitución detallada de las irregularidades superficiales como: bajo y alto relieve, excavaciones, terrenos, estatuas, etc. Según el número y la densidad de puntos restituidos, se habla de una nube de puntos densa o difusa.

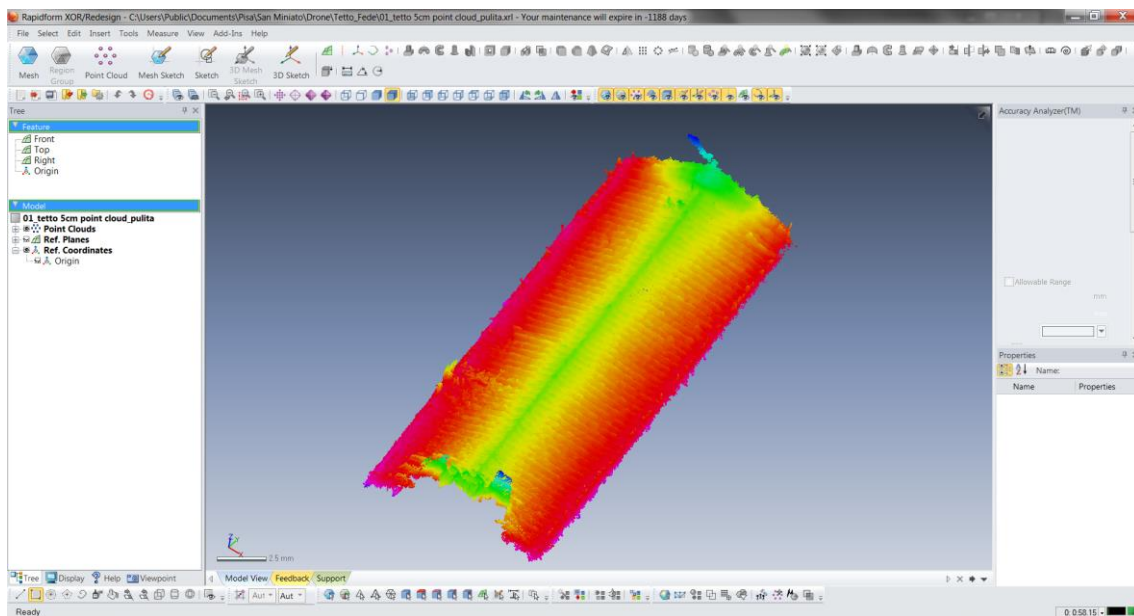


Figura 3.17. Screenshot del software *Rapidform XOR3*, en el que se puede ver la restitución de la nube de puntos exportada desde *PhotoModeler Scanner*.

El creciente desarrollo y los últimos resultados en el campo de la correlación automática de imágenes (*image matching*) (Remondino et al., 2008) testimonian la gran potencialidad del método fotogramétrico para obtener información 3D detallada y precisa a diversas escalas, comparable a aquella obtenida con sensores activos.

La correlación de las imágenes, sin embargo, continúa presentando algunos aspectos problemáticos, por ejemplo: la completa automatización, la oclusión de algunos puntos, la presencia de áreas sin textura o con elementos repetidos, objetos en movimientos, artefactos radiométricos, objetos transparentes, etc.



Generación de la superficie

Una vez extraídos los puntos más significativos para describir el objeto y sus detalles (nube de puntos densa o difusa), el conjunto de puntos en general se segmenta (en el caso de elementos arquitectónicos), se convierte en una *mesh* (superficie poligonal) o, se utiliza como una simple nube de puntos (para particulares aplicaciones).

Una *mesh*, en general constituida por triángulos, permite gestionar en manera muy flexible la superficie, restituyendo una descripción precisa.

El proceso de restitución de la superficie no puede garantizar la restitución exacta de la misma ya que se posee información solo sobre un número limitado de puntos.

Una correcta distribución de la información sobre una superficie se correspondería con una densidad de puntos que aumenta en las áreas de gran discontinuidad y disminuye en aquellas planas.

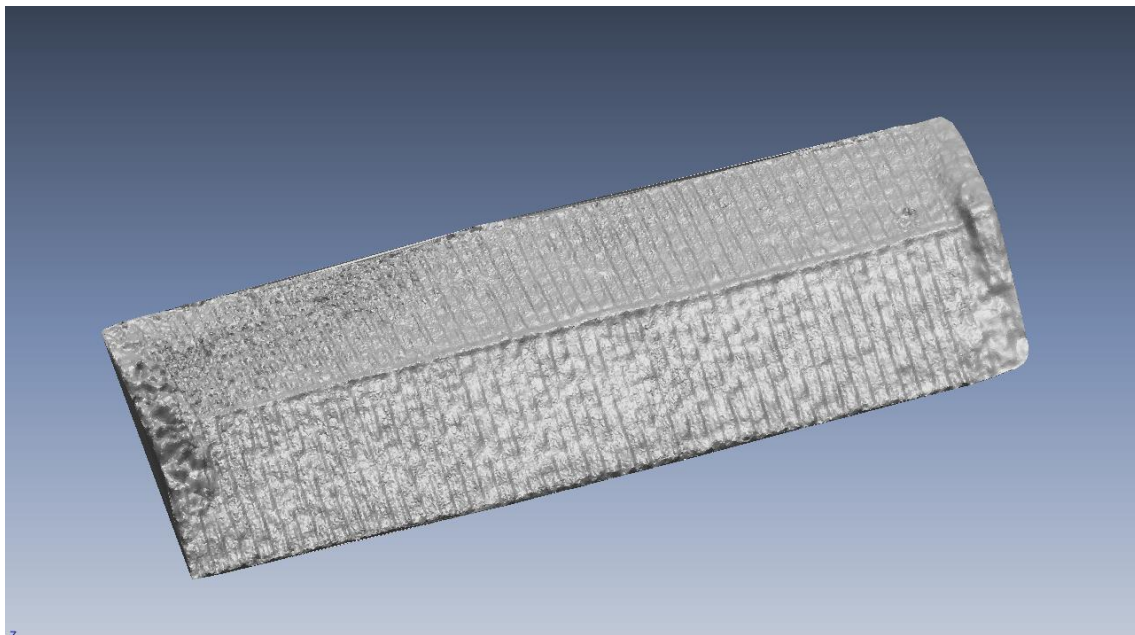


Figura 3.18. Imagen de la cubierta de una iglesia, convertida la nube de puntos en *mesh*, en el programa *Rapidform XOR3*.

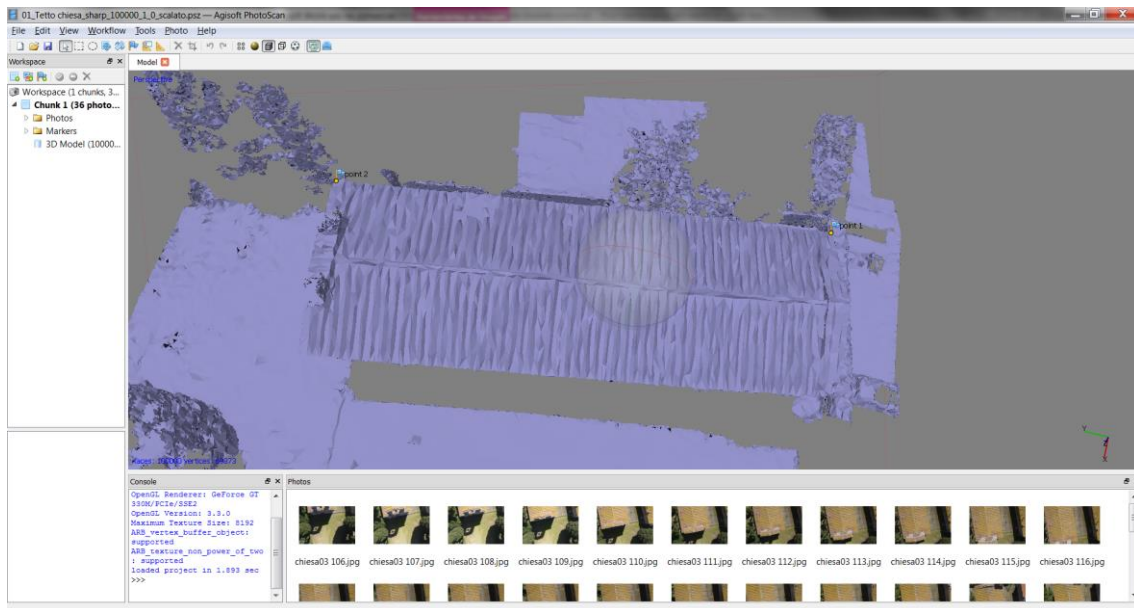


Figura 3.19. *Screenshot* de la malla de la figura 3.17, pero realizada con el programa *Agisoft PhotoScan*.

Si la información adquirida no satisface algunas propiedades del algoritmo de generación de la *mesh* (correcta distribución de los puntos, alta densidad, bajo ruido, etc.) los algoritmos producirán resultados no correctos.

Consideraciones sobre la calidad de un proyecto de restitución fotogramétrica

En fotogrametría, la calidad de las medidas y de la restitución tridimensional depende de la calidad de los datos capturados, pero también de la calidad del software disponible, de la experiencia y del tiempo y la energía utilizada en el proceso de medida de los puntos en las imágenes.

La precisión de la red de captura crece al aumentar la relación B/A y cuando se usan imágenes convergentes más que imágenes con eje óptico paralelo. Esto es debido a que la relación base - altura en las fotografías influye directamente sobre la profundidad de los objetos en la escena, y el uso de imágenes convergentes permite en muchos casos eliminar zonas de sombra debidas a ángulos agudos, a detalles con muchas molduras, etc.

La precisión de la restitución 3D mejora significativamente con el número de imágenes en las cuales es posible identificar el punto, sin embargo, llegado a un cierto extremo, la mejora es menos significativa. Se ha realizado modelos de un mismo objeto, utilizando primero muchas fotografías que daban un modelo bastante detallado, y después otros en los que se ha probado a utilizar menos fotografías. En las pruebas se observa que mientras al principio la introducción de una fotografía puede aumentar bastante el detalle, a partir de unas 6 fotografías que incluyen la misma parte, el modelo no mejora de forma apreciable.



La precisión de la restitución 3D aumenta si la configuración geométrica es adecuada y los puntos medidos están bien definidos (como target) y bien distribuidos en la imagen. Es importante distribuir los puntos por toda la imagen de una forma más o menos uniforme, si no puede producirse una mayor precisión en las partes más pobladas de puntos y encontrar pequeñas desviaciones entre las imágenes en las zonas que no presenten puntos homólogos.

La precisión de un punto 3D está ligada a la precisión de su localización en la imagen que varía principalmente en función del operador y de la presencia de target.

Se debe poner especial atención en: la proyección de las redes de captura, la elección del sensor a utilizar, las medidas de los puntos de las imágenes, la geometría de la red y, la calibración de la cámara usada. En los casos prácticos es muy útil, en primer lugar, calibrar la cámara, elegir una longitud focal y proyectar una red lo mejor posible. El siguiente paso consistiría en recuperar la geometría de los objetos utilizando los parámetros de calibración con la misma regulación de la cámara.

***Texture mapping* y visualización**

Un modelo digital 3D texturizado no sólo consiste en su representación geométrica si no que, además, proporciona una visualización foto-realista. Para obtener dicha visualización, se emplean imágenes a color, las cuales son proyectadas sobre la superficie poligonal del mismo modelo. En las aplicaciones terrestres, cada cara individual de la *mesh* poligonal se colorea con el color correspondiente presente en la foto con mejor visibilidad y mayor perpendicularidad. Este proceso se realiza de forma automática ya que, en una fase anterior del mismo, se ha obtenido la relación entre las imágenes y el objeto 3D.



Figura 3.20. Malla de la cubierta con la incorporación de la textura foto-realista realizada en el software *PhotoModeler Scanner*.

Se debe hacer una distinción entre textura aplicada, que es un pasaje realizado por algunos programas de foto-modelización, efectuado como último paso del proceso, y puntos colorados, o coloreados. Esto se refiere a que los modelo 3D pueden ser texturizados mediante dos sistemas diferentes, uno generando un sistema de proyección particular UV al que se le proyectan las fotografías previamente orientadas (habitual en programas de foto-modelización,



como por ejemplo, *Agisoft PhotoScan*) y el otro, generándose en una fase intermedia en la conversión de la nube de puntos a *mesh*, debido a que los puntos presentan ya una información RGB asociada a los individuales vértices que formarán en una segunda fase la estructura de la *mesh*.

La calidad de la textura en el primer método, o mejor dicho la apariencia del color, es mejor, ya que presenta una resolución mucho más elevada. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que es necesario corregir la topología del modelo, ya que mejorando la calidad de la *mesh* se mejora también el texturizado. La razón es debida a que el programa efectúa antes de la aplicación de la textura en sí, una operación llamada *parametrización*. El “*Texture mapping*” es la operación que consiste en la toma de una imagen y su aplicación sobre la superficie del modelo, por lo tanto el paso de un mapa en 2D aplicado a un modelo 3D, llamado también “mapeado”. La *parametrización*, es el sistema que permite asociar un vértice (y de consecuencia polígonos) del espacio 3D a un espacio bidimensional (Fantini, F., 2012: 314). Sin embargo, como los modelos poligonales no nacen para una “*parametrización natural*”, como sucede por ejemplo con los modelos *NURBS*, realizados a través del mapeado en 3 dimensiones de cualquier cosa realizada en 2 dimensiones, éstos deben realizarse mediante programas de “*entertainment*” como el *Luxology Modo*, *Autodesk 3D Studio*, etc. En dicho caso, debe ser el usuario el que realiza dicha *parametrización*, aunque existan métodos automáticos o semiautomáticos, debe éste ejecutar el comando.

En el caso concreto de *Agisoft PhotoScan*, para la realización de texturas se realiza en primer lugar la parametrización, y en segundo lugar la proyección de las fotos. Las fotos son mezcladas o elegidas, según la modalidad “*average*” o *mosaic*”, y proyectadas sobre el modelo. De consecuencia, como estos modelos han sido previamente parametrizados, las imágenes converge en el espacio el espacio UV, y por lo tanto sobre el modelo parametrizado. Así, se obtiene un modelo a su vez mapeado; un modelo que primero se parametriza, se abre en 2D, y después sobre éste se aplican en su espacio 2D las fotografías, a través de una relación proyectiva que permita relacionar el modelo de 3 dimensiones en aquel de 2 dimensiones (proyección en 2D), una vez obtenida esta textura, el modelo es re-mapeado.

Aclarados los pasos para la texturización del modelo, es posible comprender la importancia de la eliminación de los errores topológicos, ya que la presencia de éstos, genera errores en la fase de parametrización trasportándolos en la fase de mapeado. Los errores topológicos generan en la parametrización polígonos aislados, que comportan un desperdicio abundante del espacio UV, y por lo tanto, un uso improductivo de algunos píxeles.

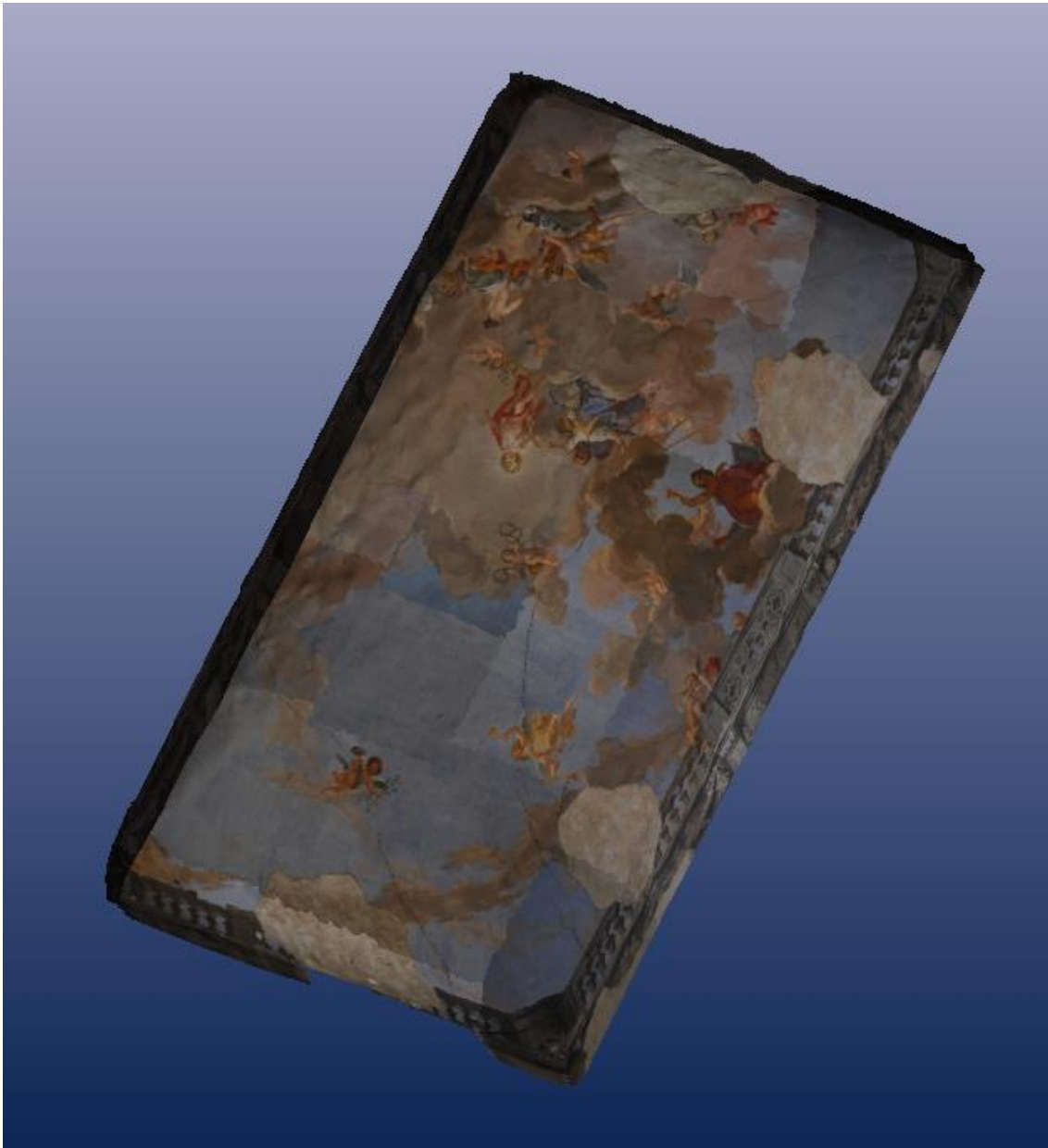


Figura 3.21. Bóveda levantada con *Image-based Modelling* con textura foto-realista en la que se puede observar las partes tomadas de cada foto por el cambio de iluminación entre una y otra, pero presentando una continuidad entre las imágenes que la decoran.

ii. *Range-based Modelling*⁵

Los instrumentos activos, normalmente empleados para levantar objetos y producir modelos 3D, son generalmente llamados “*range camera*” o, para aquellos que utilizan luz láser, escáner láser 3D.

Actualmente, al igual que en el caso de la fotogrametría, se observa un uso frecuente de Escáneres láser 3D para el estudio del patrimonio arquitectónico. A la hora de llevar a cabo investigaciones dentro de este campo, el escáner láser se ha erigido como una de las herramientas básicas. En la página de CIPA (*International Committee for Documentation of Cultural Heritage*), uno de los comités internacionales de ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*), el escáner láser aparece como una de las ramas de especialización dentro de las investigaciones.⁶

En el caso de los sistemas activos, las coordenadas espaciales de los puntos de una porción de objeto encuadrada por el escáner pueden ser adquiridas en modo automático.

El proceso de adquisición no discierne entre los puntos de relleno y las líneas arquitectónicas que definen la geometría del objeto, comportando un grado de detalle constante, tanto para las partes planas como para aquellas más articuladas. Esto conlleva que, para garantizar un buen detalle en las partes más complejas, se tenga que hacer también un levantamiento inútilmente detallado también en las superficies planas.



Figuras 3.22 y 3.23. Imágenes de un escáner láser a triangulación en las que se puede observar el proceso de adquisición de datos.

⁵ Apollonio y Remondino (2010: 94-117), Guidi, Russo y Beraldin (2010: 77-114) y Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2010.

⁶ CIPA http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/pdf/Cipa_Brochure.pdf (última fecha de consulta: 17/02/2014)



Las *range camera* se basan sobre principios de funcionamiento que varían dependiendo de las dimensiones del objeto a levantar:

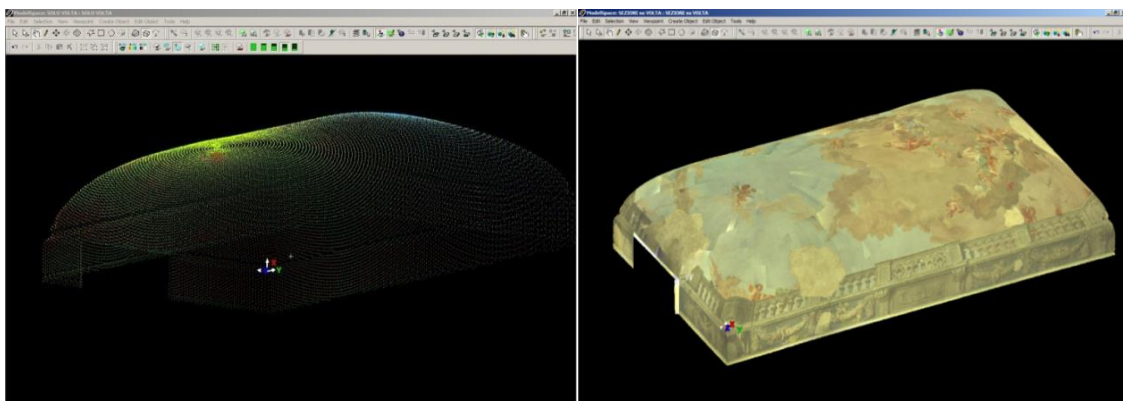
- Sensores a triangulación: Se utilizan para objetos pequeños y medios, entre 0,1 y 500 cm., o sea, fragmentos o restos arqueológicos, estatuas, pinturas, etc. El principio de medida sobre el cual se basan estos instrumentos es el de la triangulación, combinando una fuente luminosa (luz láser o estructurada) con un sensor digital que recoge la luz proyectada. Se caracterizan por una precisión del orden de pocas decenas de micrón y permiten realizar escaneados muy densos con tiempos de escaneado en general muy bajos (pocos segundos para cada adquisición). Conocida la distancia entre el sensor y la fuente de luz y los ángulos de proyección y adquisición, a través de relaciones trigonométricas se obtiene la distancia entre el sensor y el objeto a levantar. La fuente luminosa genera un haz de luz que produce sobre el objeto a levantar, dependiendo del sensor empleado, un solo punto, una línea o un área. Desde las fuentes láser, que se mueven para cubrir toda la superficie a adquirir en general, se producen puntos individuales o perfiles.
- Sensores a tiempo de vuelo (ToF) y a diferencia de fase: son empleados para objetos de dimensiones del orden de metros o decenas de metros, como edificios, excavaciones, paredes rocosas, etc. El principio de medida que usan es el “tiempo de vuelo”, es decir, la media del tiempo empleado por una fuente luminosa para ir del instrumento al objeto a levantar y volver al instrumento. El tiempo de vuelo es directamente proporcional a la distancia entre el instrumento y el objeto. Un instrumento de estas características contiene un motor capaz de cambiar en intervalos de tiempo regular la dirección de la mira y, por lo tanto, conocido el ángulo de dirección, se puede medir automáticamente el objeto entero gracias al movimiento mecánico de la fuente. La fuente luminosa emite generalmente luz láser, la cual, requiere instrumentos de medida del tiempo muy precisos, pues viaja a la velocidad de la luz. Ello introduce una incerteza en la medida de la distancia de 20-30 veces mayor respecto a los sistemas de triangulación. La estimación del tiempo de vuelo es seguida en modo directo, es decir, calculando el intervalo de tiempo entre el inicio del impulso luminoso y su vuelta; o, modulando la radiación luminosa emitida (CW, *Continuous Wave*) y calculando el desfase entre la onda de ida y la de vuelta (modo indirecto). Debe aclararse que el modo de medida, es el que generalmente diferencia dos grupos de escáner, llamando “escáner a tiempo de vuelo” a los que realizan la estimación del tiempo de vuelo de forma directa, y “escáner a diferencia de fase” a aquellos que realizan dicha estimación de modo indirecto. A los sensores a tiempo de vuelo se les llama también LIDAR (*Light Detection And Ranging*) y pueden ser empleados sobre plataformas en movimiento (avión, helicóptero, tren, auto) o en modalidad estática (levantamiento clásico terrestre).



Figuras 3.24 y 3.25. Escáneres a Tiempo de Vuelo, a la izquierda Scanner Láser Leica C10, a la derecha Scanner Láser Leica HDScanStation 2.

Los escáneres a triangulación generan una geometría ya compuesta por triángulos. Pueden operar solo a distancias reducidas de los objetos a levantar y por lo tanto la parte encuadrable es limitada. Además tienen serios problemas de empleo al exterior con luz diurna intensa.

Los escáneres a tiempo de vuelo, en cambio, general nubes de puntos que deben ser, sucesivamente, convertidas en *mesh*. Tienen la ventaja de permitir levantamientos de superficies a distancias notables en un tiempo relativamente breve.



Figuras 3.26 y 3.27. A la izquierda podemos ver la nube de puntos de una bóveda esquifada del Palacio Roncioni, a la derecha la misma bóveda convertida en *mesh*.

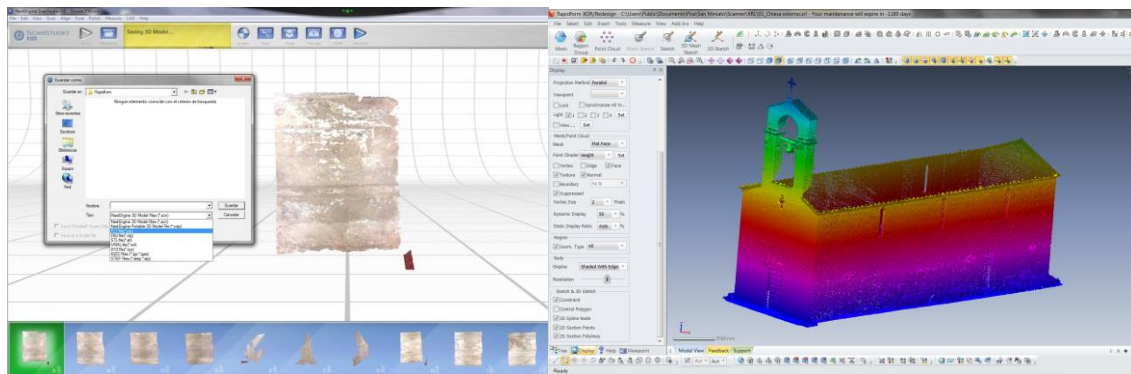
Los escáneres poseen una serie de características metrológicas de “resolución”, “precisión” y “exactitud” que, normalmente, varían según las modalidades operativas respecto a la distancia de trabajo o la inclinación de las superficies. Un procedimiento de levantamiento tridimensional incluye no solo métodos para la extracción de datos relativos a superficies 3D, sino también el algoritmo de proceso, que permite transformar el conjunto de datos en coordenadas calibradas; las características medidas, y los modelos o medidas que puedan ser visualizadas y analizadas.

Adquisición de datos

La fase de adquisición de datos 3D se caracteriza por el número de escaneados efectuados, desde puntos de vista diversos, destinados a levantar todo el objeto.

Los escaneados pueden variar desde decenas hasta centenas, en función de la complejidad del objeto a escanear y sobre la base del proyecto en la fase de planificación. Aun así, durante la fase de adquisición se pueden definir nuevos puntos de escaneado, destinados a resolver particularidades que puedan ponerse de manifiesto sobre el campo.

El producto de cada escaneado singular, en particular para sistemas de triangulación, se llama *range map*, y consiste en una matriz de puntos en pseudo-3D⁷. Para el sistema de tiempo de vuelo se utiliza nube de puntos, es decir un conjunto de puntos en 3D.



Figuras 3.28 y 3.29. A la izq., “Datos brutos” del escáner a triangulación en el levantamiento de una dovela. A la drcha., nube de puntos obtenida de una iglesia a partir del escáner a Tiempo de Vuelo, una vez se han eliminado los puntos externos del objeto de interés.

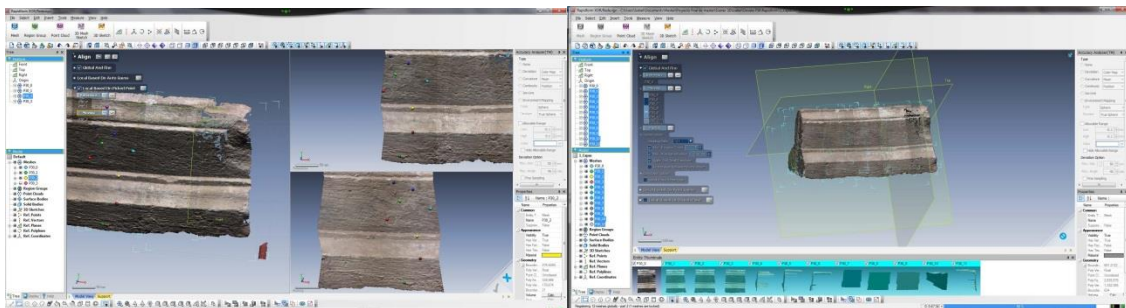
Cada escaneado tiene un sistema de referencia centrado en el sensor, por ello, para modelar enteramente el objeto, los múltiples escaneados deben ser transformados y alineados en un único sistema de referencia. Para permitir una correcta alineación de los escaneados, cada adquisición debe tener un buen recubrimiento con la precedente y la sucesiva, si no la alineación podría converger hacia una solución errónea.

⁷ Guidi, Russo y Beraldin (2010: 94) lo definen con el termino 2,5D, y se entiende como una medida de superficie donde en correspondencia a cada punto del plano horizontal (plano del sensor), haya un solo punto sobre el eje vertical (eje del sensor). Una estructura plenamente 3D, que contiene por ejemplo un rebaje, no tiene por qué cumplir esta condición

Registro de los escaneados

El objetivo de la fase de registro consiste en buscar la relación espacial exacta entre una serie de nubes de puntos (o *mesh*, en el caso de los escáner de triangulación) relativas a un objeto adquirido desde varios puntos de vista, con el fin de representarlo sobre la base de una vista tomada como referencia.

Generalmente, el registro se subdivide en una primera fase de alineación preliminar de los escaneados (*coarse registration*), seguida de un afinado del registro (*fine registration*). La fase de registro requiere que los escaneados presenten una buena superposición entre ellos. Es por esto que debe ser considerado en las fases precedentes de planificación y adquisición.



Figuras 3.30 y 3.31. Procesos de registro. A la izquierda se puede observar el alineamiento preliminar, mediante puntos homólogos seleccionados por el usuario, y a la derecha el registro fino, que se realiza de modo automático.

La estrategia de registro puede diferir por el hecho de que la alineación de todas las tomas se realicen simultáneamente (*multi-view registration*) o a parejas de imágenes en cada interacción (*pair-wise registration*).

La mayor parte de los métodos utilizan la distancia punto-punto; mientras que, otros utilizan la distancia entre un punto dado en la primera toma y el correspondiente plano tangente en la segunda. El problema de la distancia punto-punto surge cuando el punto individualizado en la primera vista puede no existir en la segunda, por la limitación del número de puntos adquiridos por el sensor. Esto es fácilmente detectable en el caso de superficies levantadas a baja resolución.

Para resolver este problema, algunos autores utilizan la distancia punto-plano. En este caso, en la segunda vista se computa un plano tangente en la posición individualizada del punto homólogo de la primera. El método punto-plano converge más rápidamente que el método punto-punto. Para resolver este problema, el método para el alineamiento final de los escaneados más usado comúnmente es el del algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*).

El algoritmo ICP se compone de dos pasos. En el primero, se identifican parejas de hipotéticos puntos correspondientes en el área de superposición de dos *range map*. Sucesivamente se realiza el proceso de optimización que computa una transformación rígida que reduce la distancia (por mínimos cuadrados) entre los dos conjuntos de puntos. El proceso es

reiterado hasta que los criterios de convergencia sean satisfactorios. El algoritmo ICP permite obtener buenos resultados aun en presencia de ruido gaussiano.

La fase de alineación preliminar generalmente prevé que el usuario defina manualmente al menos 3 puntos homólogos entre una pareja de escaneados. Este proceso iterativo puede ser reducido o eliminado poniendo target en la escena a levantar.

El uso de target para realizar alineaciones es frecuentemente empleado en el ámbito del levantamiento arquitectónico levantándolos, eventualmente, con sistemas topográficos que permitan, a su vez, una georeferenciación de los datos 3D escaneados. La ventaja mayor de este enfoque es la mayor precisión que permite garantizar en cada condición, si se consigue distribuir los target en modo correcto en el interior de la escena.



Figura 3.32. Imagen de un target en el momento del rastreo de su posición.

Una de las desventajas del registro semiautomático es que éste solo es posible si la superficie levantada es rica en modelado o relieve. En el caso de superficies planas o privadas de relieve, las partes de *range map* parcialmente superpuestas pueden ser simétricas y deslizar la una sobre la otra durante la fase automática de alineación (ICP).

Fusión de las nubes de puntos y generación de la *mesh*

Tras la fase de alineación, se presenta un conjunto de escaneados alineados entre ellos, en forma de nubes de puntos (a excepción del caso del escáner por triangulación, cuyos resultados son directamente una *mesh* poligonal), que representan el objeto levantado. A continuación, se procede a su fusión. La nube resultante, sin embargo, presenta datos redundantes y/o sobreabundantes en las zonas de superposición de los escaneados individuales.

Por otra parte, si la fase de adquisición no ha cubierto todo el objeto y la sucesiva alineación no se ha realizado correctamente, la nube de puntos presentará un “ruido” o “rumor” de cierto nivel y, a menudo, desviaciones y/o lagunas debidas a zonas de sombras no alcanzadas por los escaneados. Por este motivo, los datos, con frecuencia, deben ser filtrados para reducir los datos en las zonas redundantes o reordenados para tener una distribución uniforme de los puntos. Realizada esta acción, la nube de puntos puede convertirse en *mesh*, teniendo una mayor garantía sobre su calidad.

Mesh editing

En el modelo poligonal, producido a través de la fusión de los diferentes escaneados y la sucesiva generación de la *mesh*, aparecen comúnmente pequeñas anomalías topológicas, lagunas

o imperfecciones, que deben ser eliminadas. Por ello, es conveniente seguir una serie de fases que permiten la eliminación de tales imperfecciones y mejoran la calidad de la superficie poligonal, buscando preservar, en la medida de lo posible, la geometría y la forma original.

Las principales operaciones son:

- Corrección de errores topológicos: corresponde a la eliminación de todos los polígonos de la *mesh* que presentan conexiones anormales, que no tienen razón de ser, generadas en fase de fusión y triangulación. Típicos problemas topológicos a corregir son: triángulos degenerados (dos o tres vértices de un triángulo coinciden y el triángulo se convierte por lo tanto en un borde o vértice), triángulos duplicados (dos triángulos de la misma *mesh* tienen los mismos vértices), bordes degenerados (un borde está dividido por más de dos triángulos), bordes inconsistentes (un borde está dividido por dos triángulos con dirección de la normal opuesta)
- Cierre de lagunas presentes en la superficie: la ausencia de datos en zonas de sombra presentes en el objeto en el momento de la adquisición (o aquellas partes de superficie no alcanzables por el instrumento), problemas de adquisición debidos a la particular característica de reflexión del material o una baja densidad de la nube que no permite al algoritmo de triangulación generar una *mesh* completa pueden derivar en eventuales lagunas en la *mesh*. El cierre de los huecos generalmente se realiza con una nueva triangulación de las áreas faltantes aprovechando la información dada por los triángulos que definen el borde de la laguna.

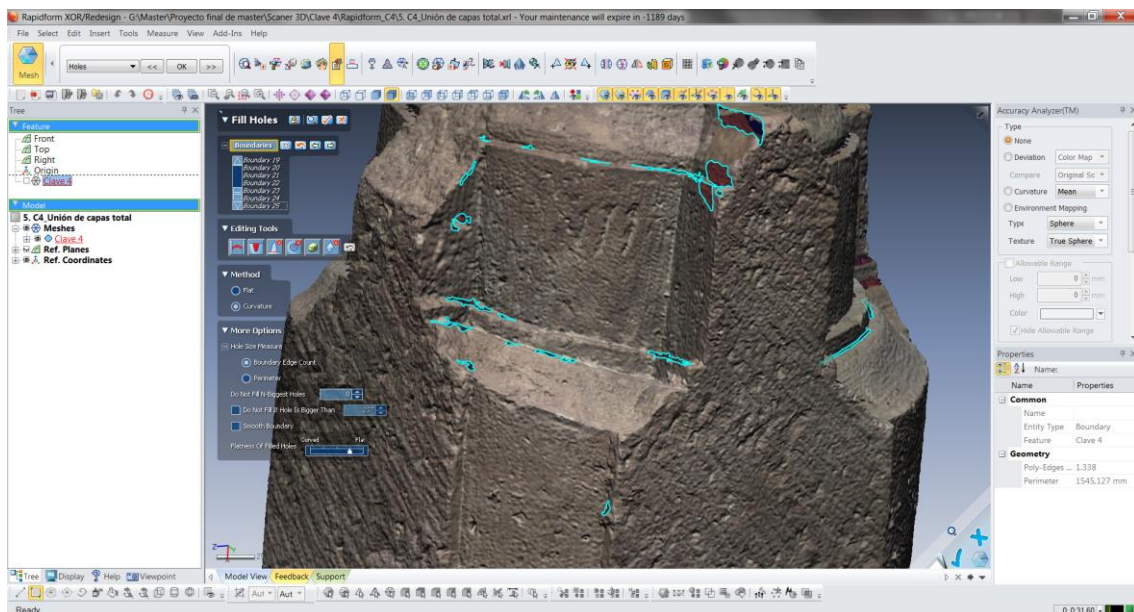


Figura 3.33. *Mesh* en el momento de edición, en el cuál se están eliminando las lagunas causadas por zonas de sombra.

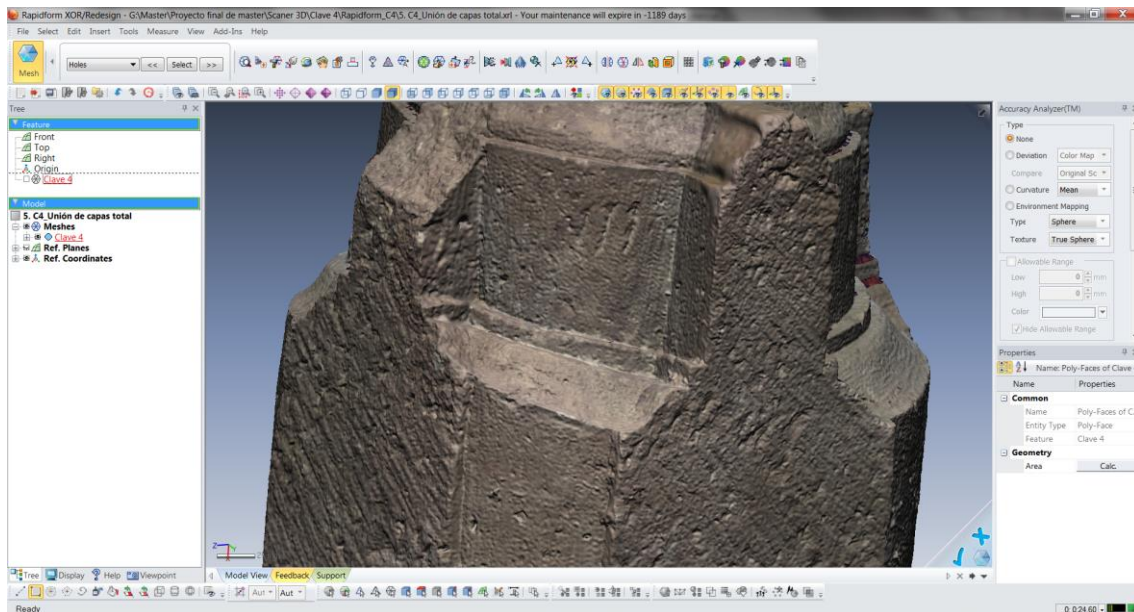


Figura 3.34. Imagen de la figura anterior una vez eliminadas las lagunas.

Post-processing de la mesh

El modelo digital obtenido en las fases precedentes debe, a menudo, ser sometido a un posterior *post-processing*, con la finalidad de adaptarlo a las aplicaciones a las que se está conduciendo. Éste puede presentar una cantidad de detalle mayor o menor, y, por ello, ser un modelo digital directamente no utilizable para aplicaciones interactivas. Por esto es muy importante conocer a priori la finalidad del modelo digital, para poder decidir el nivel de detalle, y por lo tanto, el número de polígonos que debe caracterizar el modelo.

Si el número de polígonos es excesivo, es posible efectuar una disminución de éstos, a través de un proceso llamado “*decimation*” de la *mesh*, que reduce sensiblemente la complejidad geométrica del modelo, eliminando vértices y manteniendo, aun así, bajo control las variaciones introducidas respecto a la precisión inicial.

Por otro lado, en ocasiones se encuentran zonas en el modelo mallado muy ruidosas, y es posible aplicar procesos de mejora que permiten alisar la superficie. El objetivo es reducir estos “defectos” de manera que la forma global, sea garantizada. El proceso normalmente se denomina “*smoothing*”, y actúa tomando en consideración un área alrededor de cada vértice dentro de la zona donde se debe reducir las diferencias de cota entre los puntos en base a una tolerancia indicada.



- *Smoothing*

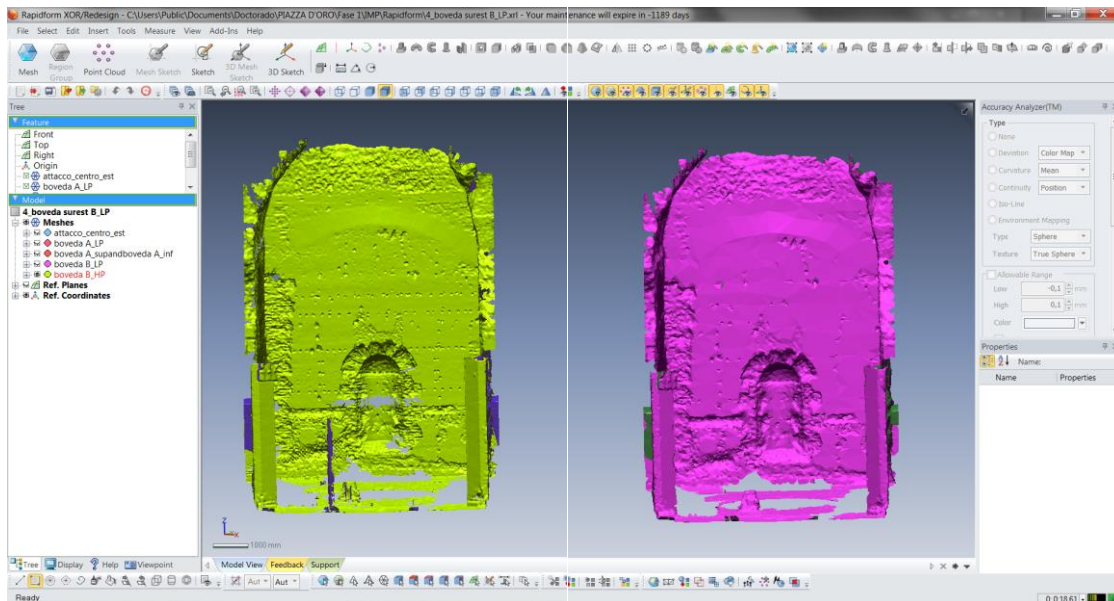
El alisado de la *mesh* representa un instrumento central en la elaboración de la geometría. En los software comerciales han sido introducidos, por ahora, solo técnicas lineales: la llamada “*smoothing laplaciano*” y a influjo de curvatura media. Su principal aplicación es la eliminación del ruido y la generación de adecuadas superficies con el fin del modelado en multi-resolución.

Un requisito posterior es, a menudo, la conservación de algunas características de la superficie, como bordes agudos y ángulos que no pueden ser definidos en una manera “vaga”.

- *Decimation*

La *decimation* describe una clase de algoritmos que transforma una inicial *mesh* poligonal en otra con un número menor de caras, bordes y vértices. El proceso es generalmente controlado por el usuario, una vez definidos los criterios de calidad que caracterizan la *mesh*, con el fin de preservar las propiedades específicas de la original, por cuanto sea posible. Los típicos criterios incluyen la distancia geométrica o la apariencia visual. Todos los algoritmos de simplificación de polígonos usan combinaciones de varios operadores de simplificación. Estos son primariamente funciones subsidiarias o métodos para realizar la reducción del número de vértices o polígonos. Los operadores más comunes son los siguientes (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010: 108-109):

1. Normalización: Eliminación de los polígonos redundantes o degenerativos. No tiene sentido mantener polígonos que son meramente una subdivisión de un área idéntica más grande, o son definidos en modo no correcto.
2. Simplificación de los vértices: Unión de todos los puntos dentro de algunos volúmenes predefinidos.
3. Simplificación de los bordes: remoción de todos los bordes más cortos de un predefinido umbral.
4. Simplificación basada en los ángulos: Eliminación de los bordes formando ángulos más cerrados, bordes alineados y bordes unidos.
5. Simplificación de las dimensiones de la cara: Remoción de las caras más pequeñas de una dada área de umbral.
6. Simplificación de las caras según las normales: fusión de las caras adyacentes con normales casi paralelas.



Figuras 3.35 y 3.36. Imagen de la mesh antes y después del proceso de “decimation”.

Existen diferentes enfoques conceptuales con respecto a la “decimation” de una *mesh*. Sobre todo basándose en la interpretación de la reducción de la complejidad como una operación singular o como un procedimiento iterativo.

- Error de aproximación

Garantizar una tolerancia de aproximación durante la “decimation” es el requisito más importante para la mayor parte de las aplicaciones.

La utilidad principal de los instrumentos de medida del error es evaluar si una simplificación es apropiada, determinando si las diferencias con el modelo original están dentro de las tolerancias preestablecidas.

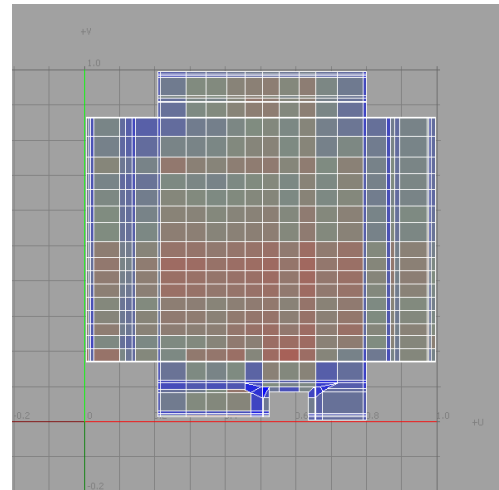
Al fin de controlar la simplificación, el error de aproximación es medido localmente, pero el usuario debe especificar un vínculo global sobre el error.

- *Remeshing*

El objetivo del *remeshing* consiste en un aumento de la calidad de la *mesh* con el fin de un uso de la superficie poligonal misma como *input* en aplicaciones diversas. El *remeshing* se puede definir del siguiente modo (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010: 113): “*dada una mesh tridimensional, determinar una nueva superficie poligonal cuyos elementos constitutivos sean capaces de satisfacer requisitos de calidad, dando una buena aproximación de la mesh inicial*”. El término deber ser entendido tanto en relación a la posición, como a la orientación de las normales y a otras propiedades de orden superior.

Realización de modelos 3D foto-realistas

El modelo poligonal obtenido después de las operaciones de edición constituye, en los límites de la resolución y de la precisión definida en la fase de proyecto del levantamiento, una copia fiel al original desde el punto de vista cuantitativo (o geométrico), y por lo tanto, en aquello que concierne a la forma, dimensiones espaciales y proporciones. Queda por definir, sin embargo, su aspecto cualitativo, la considerada “apariencia visual”, o lo que es lo mismo, la posibilidad del modelo 3D de representar el objeto real reproduciendo en la manera más fiel posible, también el comportamiento de la superficie con respecto a la reflexión de la luz, incluyendo las características del color y de acabado de la superficie misma. Tal propiedad es en general definida como textura de la superficie. La textura puede incluir descripciones relativas a la geometría de la superficie de escala fina, como por ejemplo, mapeados a alta resolución espacial de las normales a la superficie o texturas bi-direccionales. La mayor parte de los escáneres 3D no poseen una cámara digital adecuada para adquirir imágenes digitales de alta resolución para la textura del modelo geométrico. Las imágenes por lo tanto son adquiridas con foto-cámaras y después utilizadas para crear un modelo foto-realista. Las imágenes deben ser registradas y alineadas al modelo geométrico a través de procesos iterativos, identificando puntos homólogos entre ellos.



Figuras 3.37 y 3.38. A la derecha, imagen de la bóveda realizada con escáner láser, a la cual se le ha introducido una textura foto-realista mediante fotografías. A la izquierda la *UVmap* de dicha bóveda a través de la cual ha sido posible aplicar dicha textura mediante imágenes individuales.



B. LA RESTITUCIÓN

El término restitución, según la RAE significa “*restablecer o poner algo en el estado que antes tenía*”. Ana Calvo (1997: 198), sin embargo, hace una definición más extensa describiendo la restitución como “*Reintegración de partes perdidas o desmembradas. Sinónimo de reintegración.*” Definiendo reintegración (p. 188) como “*Acción y efecto de reintegrar o restituir una parte perdida. Técnica de restauración que permite integrar estéticamente una obra completando sus pérdidas, ya sean de soporte de decoración o de policromía. Con independencia del criterio estético seleccionado, se limita exclusivamente a las lagunas existentes en la pieza, y se realiza con materiales inocuos, reversibles y reconocibles con respecto al original. La reintegración no siempre es necesaria para la conservación del objeto y, generalmente se trata de una intervención de tipo estético. En algunos objetos, sobre todo en piezas arqueológicas como cerámicas o metales, es necesario a veces reintegrar para poder unir fragmentos o piezas sueltas sin suficientes puntos de apoyo, o para equilibrarlas. (...) El tema de la reintegración ha sido siempre polémico, existiendo diferentes modas, según las épocas, y se ha llegado, en algunos casos, a posturas extremas. Actualmente el criterio es bien claro, la conservación de los objetos es prioritaria, sin falsificaciones o reintegraciones que puedan llevar al engaño, con un respeto absoluto por la obra como documento histórico, y valorando adecuadamente su aspecto estético*”.

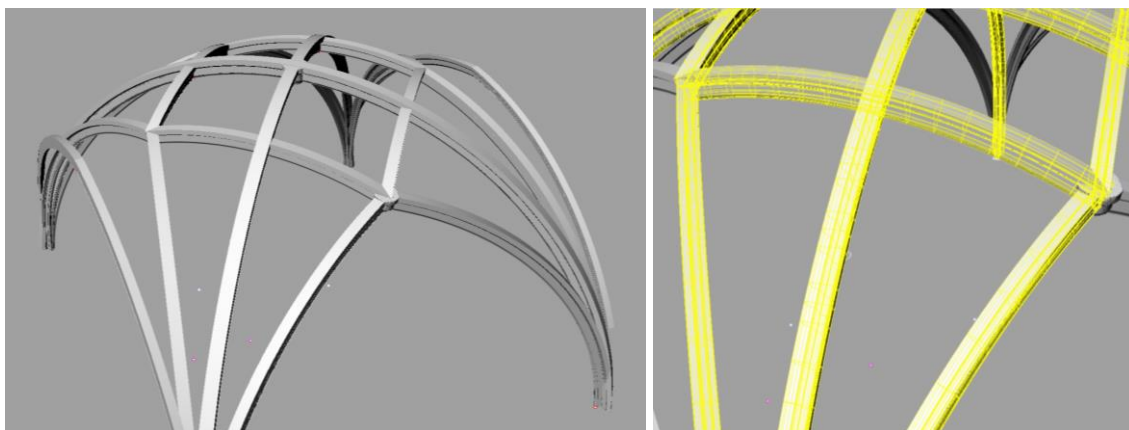
Estas definiciones de restitución, se refieren en todo caso, a una restitución física. En ella, los criterios de intervención son variados y algunos de ellos regulados por la normativa del país. Sin embargo, en este apartado, la restitución, de la cual se va a hablar, va a ser siempre una restitución virtual, por ello, será siempre el usuario quien decidirá los criterios a seguir para su realización, y el tema de estudio se centrará en los tipos de restitución tridimensional realizables según los diferentes modeladores geométricos que existen en la actualidad para el modelado arquitectónico.

La modeladores geométricos digitales, según Fantini, F. (2012a: 215), son programas que tienen como finalidad la construcción de figuras geométricas en el espacio, mediante varias formas de representación que, a lo largo de este apartado, se reagruparán a lo largo de este apartado en dos ramas: la matemática y la numérica.

Utilizando una similitud se puede afirmar que estas dos categorías indican el material constructivo, empleado para realizar un modelo informático utilizable en la representación de la arquitectura y de los productos de “*design*”. A primera vista, las dos formas de representación pueden parecer iguales, al menos cuando se visualizan sobre la pantalla, pero en el fondo difieren significativamente desde el punto de vista de las potencialidades expresivas, así como de las metodologías que se aplican al realizar sendos tipos de modelos. El porqué de tales diferencias se puede comprender mejor si se observa la historia del “*computer aided design*”: los modeladores matemáticos han sido desarrollados para resolver problemas específicos de representación y gestión de proyectos en el campo de la ingeniería (mecánica, aeroespacial, etc.), y más recientemente, con el desarrollo de las tecnologías de levantamiento con escáner láser 3D, han irrumpido en el campo de la documentación de los bienes culturales.

En realidad, cuando se habla de modelo numérico y de modelo matemático se está afrontando el tema más general de la cantidad de información transmitida a través de una restitución: de un lado los modelos numéricos describen las formas en el espacio a través de una aproximación, ya que emplean un poliedro para reproducir la frontera de un objeto real. Por otro lado los modelos matemáticos definen la frontera de un objeto gracias a la unión de más superficies continuas (*patch* o piezas) cada una de las cuales viene descrita a través de una función paramétrica en “u” y “v”. Una diferencia muy importante es que los modelos numéricos presentan un detalle geométrico establecido por parte del operador o sobre la base de un muestreo instrumental y por lo tanto, se bloquean en una resolución concreta (y en consecuencia a una escala de representación), al contrario que los modelos matemáticos, que presentan la importante característica del detalle variable, después que las “*patch*” individuales de un modelo así constituido puede ser incrementado o disminuido de resolución.

Se deben evaluar atentamente las ventajas e inconvenientes de los unos y de los otros a la hora de planificar las operaciones necesarias para la construcción de un modelo digital correcto. De hecho, en este apartado, aparte de la exactitud topológica, es interesante, en general, la gestión racional de los recursos disponibles: en definitiva un modelo realizado correctamente no debe prescindir de las previsiones de los tiempo de elaboración que dependen de la capacidad del diseñador CAD, pero sobre todo se debe tener en cuenta la potencialidad y los límites constitutivos de programas y calculadores. La planificación de los pasajes necesarios para la obtención de los modelos digitales es parte integrante de la honestidad con la cual se realiza un modelo: elegir una aplicación inapropiada puede generar residuos y retrasos que muy a menudo no son visibles en el modelo digital una vez acabado, pero, la lentitud del “*iter*” utilizado habrá supuesto una carga de trabajo para el operador, que convierte en incorrecto al proceso en su conjunto.



Figuras 3.38 y 3.39. Imágenes de un modelo matemático, en el cual como se observa en el detalle de la derecha se ha utilizado perfiles dibujados en 2D, y se han convertido en 3D mediante su extrusión en el software Rhinoceros.

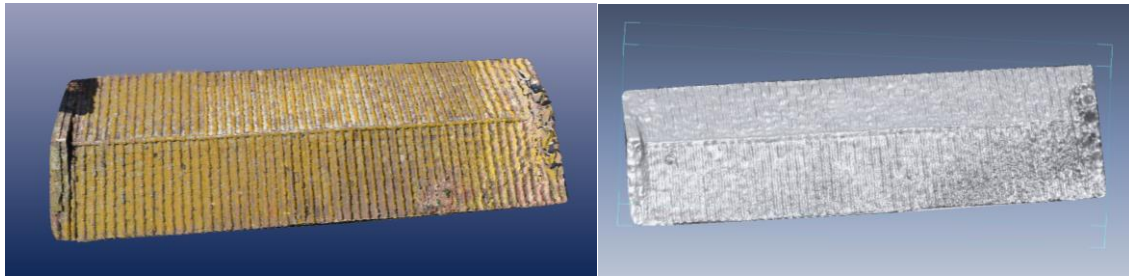
Sobre la base de cuanto se ha dicho acerca de los campos de proveniencia de las dos categorías de aplicaciones, se puede afirmar que los modelos matemáticos se prestan mayormente en la generación de superficies lisas caracterizadas por curvaturas simples o dobles



y tendencia continua, como ocurre en las cúpulas y espacios abovedados en general; los modelos numéricos, se presentan mayormente cuando se busca resolver problemas de representación pura más que de un estudio métrico y morfológico y por ello vienen empleados en los sectores de videojuegos, de animación digital y, en general, en el sector de la creación de imágenes de *rendering*.

Muchos aplicativos admiten la coexistencia de ambas formas de representación, pero se mantienen siempre mayormente unidos a un sector, más que al otro, y por lo tanto presentan instrumentos más eficientes para trabajar con los modelos matemáticos o con los numéricos, pero raramente con ambos al mismo nivel. A menudo es necesario aprovechar las dotes de un programa para obtener ciertos resultados y seguidamente pasar a otros para el “*output*” conclusivo de un trabajo: es por este motivo que los modeladores geométricos pueden dialogar entre ellos a través de formatos estándar que a menudo implican la conversión de los modelos numéricos en matemáticos y viceversa. Pero tales operaciones de exportación, suelen presentar cierta complejidad y es necesaria una cierta experiencia por parte del operador que debe conocer las características de los formatos de intercambio y evaluar atentamente su utilización.

Existen formatos estándar para los modelos matemáticos (Fantini, F., 2012a: 216) como el .SAT (*Standard ACIS Text*) y el formato .IGS (*Initial Graphics Exchange Specification*, IGES), así como los formatos .OBJ (Alias: *Wavefront Object*) y el .3DS (*3D Studio object*) para los numéricos, pero el problema es que cada aplicación lee y reinterpreta esta información sobre la base de sus propias potencialidades y, al mismo tiempo, de sus propios límites. Un operador concienciado deberá planificar las operaciones de modelación en conformidad y con objetivos precisos de representación, evitando en la medida de lo posible el empleo de aplicaciones inapropiadas, ya que la importación/exportación conlleva siempre la corrección automática del fichero. Por ejemplo, el formato, .obj, que de por sí garantiza el transporte de un gran número de información, no evita disfunciones: si el modelo a exportar es una *mesh*, del tipo constitutivo de una malla de polígonos cuadrangulares y dotada de parametrización, es decir de un sistema capaz de mapear la superficie interna con una única imagen, debemos constatar que un gran número de aplicaciones, aun leyendo esos ficheros, no soportan integralmente sus características. Por lo tanto es posible que en el nuevo ambiente de modelación los cuadrángulos hayan sido convertidos automáticamente en triángulos, o que el mapeado venga reinterpretado o no reconocido. Para resolver este género de problemas, se propone una serie de posibilidades estratégicas para meter en campo para la realización de modelos informáticos que puedan responder a objetivos específicos, y simultáneamente a las propias características base.



Figuras 3.40 y 3.41. En la imagen 3.40 se puede observar la cubierta resultado del completo proceso de levantamiento mediante *Image-based modelling* con textura foto-realista. Sin embargo, en la imagen 40, se observa dicho modelo sin textura foto-realista debido a una exportación en formato .obj del *PhotoModeler* al *Rapidform XOR3*.

i. Tipos y su utilización

Dada la cantidad de aplicaciones presentes en el mercado, es difícil hacer una lista de modo exhaustivo de los modeladores geométricos, sin embargo, se proporcionan aquí unas indicaciones generales para orientarse en el interior de un panorama vasto y en continuo movimiento.

1. Los modeladores geométricos que pertenecen al sector del “*entertainment*” están basados en su gran mayoría sobre modelaciones numéricas, pero a veces presentan un sector de modelación matemática, en algún caso, muy avanzado. No obstante, el objetivo de estas aplicaciones es principalmente el de realizar personajes u objetos de fantasía que no necesiten de un control métrico y formal comparable al ofrecido por los CAID. Las más difusas aplicaciones pertenecientes a este sector son (Fantini, F., 2012a: 216): *Autodesk 3D Studio Max*, *Maxon Cinema 4D*, *Newtek Light Ware 3D*, *Blender Foundation Blender*, *Luxology Modo*. Estos últimos pertenecen a un sector medio alto del mercado y, aunque son usados para la producción de efectos visivos y videojuegos, se prestan fácilmente a un empleo en el sector de la arquitectura y del *design*. Generalmente proporcionan un set de instrumentos de modelación NURBS bastante elemental, ya que en el curso de los años en los “*software house*” han priorizado las sub-D como forma de representación matemática, dada su mayor versatilidad en el sector de la animación de personajes. A un extremo superior del mercado pertenecen programas como: *Autodesk Maya*, *Autodesk Softimage* y *Side Effects Software Houdini*. Estas últimas son aplicaciones muy potentes, capaces de generar y gestionar tanto modelos numéricos como modelos matemáticos a altos niveles; están pensadas para trabajar en grupo en el ámbito de grandes producciones cinematográficas y, de hecho, ofrecen instrumentos incluso excesivos respecto a la necesidad común de los arquitectos.

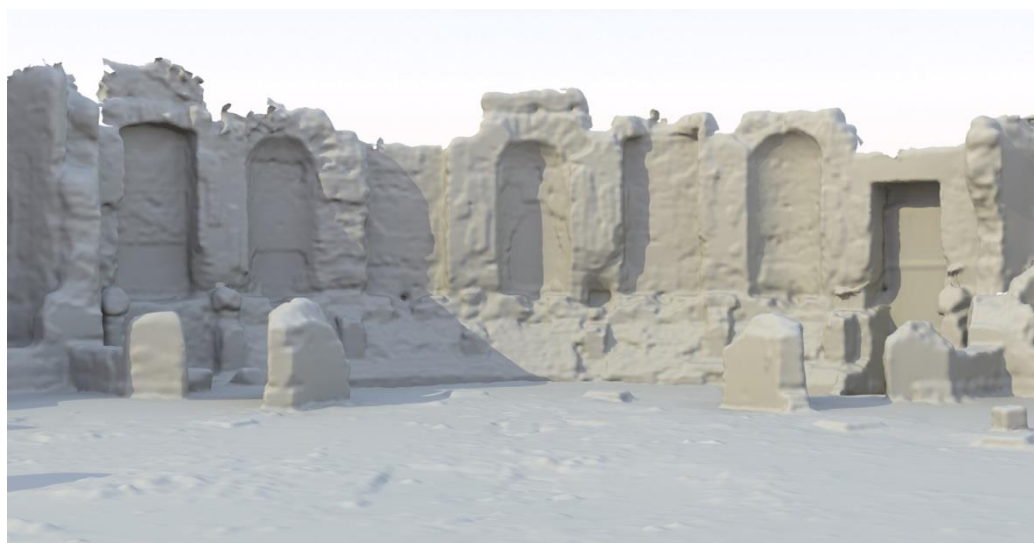


Figura 3.42. *Render* realizado en el software *Luxology Modo* de un modelo de superficies sub-D.

2. Los programas de *reverse modeling* gestionan modelos matemáticos y numéricos a partir del levantamiento con el escáner láser. Las aplicaciones más difusas son: *Raindrop Geomagic*, *Inus Rapidform* y *Innovmetric PolyWorks*. En general permiten seguir las operaciones de introducir en registro los escaneados, creación de la *mesh* y conversión en modelo matemático, evaluación de varios géneros sobre los modelos basados en cálculos de superficie, volumen y desviación entre proyecto y ejecución, etc.
3. Un tercer tipo es aquel al cual pertenecen programas largamente empleados por arquitectos y diseñadores que aun entrando en el sector CAD, han demostrado su flexibilidad operativa allanando el sector de la restitución de los levantamientos arquitectónicos en 3 dimensiones. El más utilizado en este sector es el *McNeel Rhinoceros* que ofrece un amplio set de instrumentos de modelación NURBS y una limitada sección de modelación *mesh*, pero dada su similitud operativa con *Autodesk Autocad* y la capacidad de exportar en un gran número de formatos, se ha ganado la confianza de un amplio número de usuarios. A esta categoría de programas pertenecen también otras aplicaciones que ofrecen instrumentos de modelación NURBS también más potentes como por ejemplo *AutoDesSys FormZ*. A un sector del mercado aún superior y, en ciertos casos, más unida al sector de los BIM, pertenece *Dassault Systèmes Catia*, programa dividido en varios módulos que le permite de extender la ya alta potencialidad de base hacia otros sectores productivos. Ha demostrado la propia eficacia también en el ámbito del diseño arquitectónico, permitiendo la representación y la gestión de proyectos de gran complejidad.
4. El tipo de los modeladores sólidos es muy popular entre los arquitectos gracias al hecho de que el muy notable programa *Autodesk Autocad* se basa propiamente sobre esta forma de modelación. Sin embargo, ese género de aplicaciones no siempre se presta a la restitución en 3D de arquitecturas históricas o arqueológicas. Otros programas basados sobre tal forma de representación matemática son: *Siemens Solid Edge*, *Parametric Technology Corporation (PTC) Pro/Engineer*, *Dassault Systèmes Corporation*



SolidWorks. Entre las características principales de estas aplicaciones, hay una que puede introducir vínculos dimensionales sobre los cuales basar la construcción de un modelo matemático (longitud, área, volumen, etc.). Con la variación de estos parámetros, el modelo se reconfigura para adaptarse a las diferentes exigencias. El problema es que esta versatilidad no se presta tanto a la documentación de los bienes culturales como en el diseño en el sector mecánico.



Figura 3.43. Imagen de la sección longitudinal una iglesia de Coves de Vinromá (Castellón). Maquetación realizada en Autodesk Autocad.

5. Un tipo de aplicación de alta programación y que se desarrolla para resolver específicas exigencias en el sector de la proyección arquitectónica, son los llamados BIM (*Building Information Modeling*): en realidad este acrónimo define el proceso que lleva a realizar y gestionar una serie de información asociada a un elaborado representado bajo la forma de modelo digital. La característica principal de estas aplicaciones es la de proporcionar al diseñador una serie de componentes técnicos típicos de la edificación, en lugar de las clásicas primitivas geometrías abstractas que se encuentran en los paquetes de baja programación. La ventaja de estas aplicaciones que, de hecho, introducen en el sector de la arquitectura los cánones del modelado paramétrico, está constituido por la gran facilidad con la cual se realizan en ellas cálculos métricos y cálculos en general (comprobación, análisis, etc.), así como la elaboración de plantas, secciones y detalles a partir del modelo digital. El problema de esta categoría de programas está generalmente unido a la dificultad de representar condiciones avanzadas de degrado, morfologías complejas privadas de regularidad, y otras situaciones típicas de la arquitectura histórica y de la arqueología. Sin embargo, existen diferentes ejemplos que demuestran cómo es posible, partiendo de un levantamiento con escáner láser, transferir a un *building information model*, que evidentemente presenta una larga serie de ventajas respecto al levantamiento geométrico puro.

ii. Objetivos de los diferentes modelos para el levantamiento

Es importante aclarar una cuestión terminológica que en ciertos casos constituye aún un motivo de debate a nivel académico. Se refiere al término “modelo geométrico” que a veces se sobrepone a los precedentes (numérico, matemático) confundiendo el objetivo de la representación con su “sustancia” en los términos de la informática gráfica. Es necesario



establecer que, a parte del material constructivo del modelo informático (como se ha llamado precedentemente), que puede ser de tipo numérico o matemático, existe una posterior y en algunos casos más importante cuestión que apunta a la cantidad de información transmitida a través de las elaboraciones tridimensionales que constituyen la razón por la cual se ha decidido de introducir el término “modelo geométrico”. Éste modelo es una figura geométrica que representa arquitectura resultado de una operación efectuada por un usuario en la que se decide omitir o adjuntar información buscando un objetivo comunicacional.

Dado que los modelos informáticos de los cuales se ha estado hablando, constituyen algunas de las posibles restituciones de un levantamiento (junto a las clásicas plantas, secciones, etc.), resulta importante especificar cuál debe ser la relación entre “detalle” del levantamiento y su restitución tridimensional; en otras palabras, cuál debe ser el equilibrio entre los siguientes factores:

- Toma de datos realizada sobre la arquitectura para documentar la forma (levantamiento).
- Resultados de la restitución tridimensional; en particular el soporte (video, sitio web, impresión, etc.) y la escala de representación.
- Peculiaridad de la forma de restitución elegida (numérica o matemática).

El hecho de que un modelo matemático presente detalle variable puede inducir a creer que una representación LOD garantiza mayor flexibilidad respecto a las escalas de restitución, pero en realidad no es siempre verdad, visto que los “*patch*” que constituyen los elementos de base de los modelos matemáticos pueden representar a su vez una versión muy simplificada del levantamiento de partida. Al mismo tiempo, si el objetivo para el cual se realiza un modelo digital es el de obtener una animación exploratoria, no es estrictamente necesario emplear la precisión de un modelador matemático para construir todo el modelo, de hecho, este último, antes del *rendering*, debería ser siempre teselado y por lo tanto convertido en *mesh* (a nivel de detalle bloqueado). En otros términos, la posibilidad de incrementar el detalle antes de seguir cualquier *rendering* necesario para la animación, presenta sus ventajas, pero también sus costes en términos computacionales dado que para mantener la resolución “flexible” las aplicaciones son grabadas por una pesada fase de teselado que en muchos casos sería más conveniente seguir antes y no a través de software por medio de parámetros generales (punto de vista de la telecámara, distancia al objeto, curvatura, etc.) Considerando el tiempo necesario para calcular varios millones de “*frame*” y el carácter divulgativo de una animación, puede ser más cómodo modelar directamente en polígonos las partes más simples del modelo como, por ejemplo, aquellas obtenidas por extrusión simple, revolución, etc.

Una vez expuesto que no existe una verdadera y propia jerarquía cualitativa entre modelos numéricos y matemáticos, y que debe ser el operador quien establezca, en cada caso, que forma de representación resulta mejor, a continuación, enumeramos a modo de ejemplo, las categorías de los posibles output de los modelos informáticos: investigación y búsqueda sobre la forma y generación de las fábricas, imágenes sintéticas y animaciones con fines divulgativos, elaboraciones gráficas tradicionales (plantas, alzados, perspectivas, secciones, proyecciones

acotadas), modelos para presentar en “*restyling*” en el sector del “*design*”, análisis estructurales, cálculo de superficies, volúmenes, centros de gravedad, producciones de modelos físicos a través de prototipos, realización de partes integrativas en el ámbito por ejemplo de restauraciones virtuales para la evaluación comprensiva de las propuestas proyectuales, aplicaciones *real-time*.

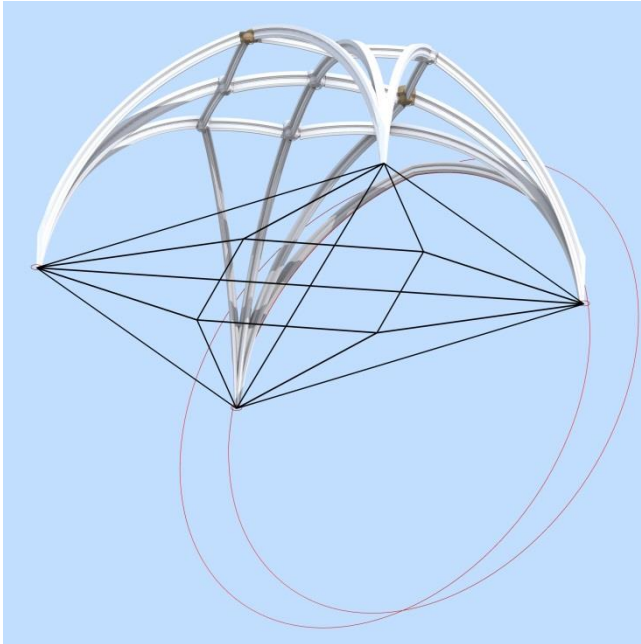


Figura 3.44. En esta imagen se puede observar el uso de modelos matemáticos y numéricos para realizar el estudio de una hipótesis de restitución de una bóveda que se perdió en la Guerra Civil española.

En el ámbito de estas nociones preliminares, que deben considerarse como un “*a priori*” respecto a las estrategias de modelación, debe tenerse presente que los modelos matemáticos permiten fácilmente recabar diseños vectoriales en proyecciones ortogonales o centrales y por ello se prestan a un diálogo con los CAD destinados a la realización de tablas técnicas, lo que los hace generalmente compatibles con documentos gráficos proyectuales de tipo tradicional. Los modelos matemáticos permiten recabar mucho más eficazmente, respecto a los modelos numéricos, curvas producidas de la intersección de una superficie o mediante operaciones booleanas (adiciones, intersecciones, sustracciones) y por lo tanto agilizan los estudios sobre la concepción geométrica de las fábricas. Sin embargo, se recuerda que las aplicaciones unidas al “*reverse modeling*” presentan instrumentos muy potentes para recabar en automático desde modelos *mesh*, secciones, proyecciones acotadas y contornos aparentes (sea en forma de polilíneas o de curvas *spline*) y por lo tanto no es estrictamente necesario desarrollar un modelo entero NURBS de una arquitectura para recabar las vistas canónicas de la representación. Por otra parte, si se quisiese generar una imagen sintética o una animación de una cúpula para ser sometida a una simulación de sombras propias, portadas y claroscuro, sin duda, los programas para el “*entertainment*” resultarían más apropiados a tal objetivo, gracias a la mayor flexibilidad en la gestión en el interior de las mismas imágenes a alta resolución para emplear como textura. La conclusión es que el diseñador/modelador debe saber aprovechar los puntos fuertes del



modelador matemático (control numérico y morfológico de las superficies, empleo de planos de construcción personalizables para diseñar directrices y generatrices, etc.) y del numérico para el output final (vasta gama de instrumentos para el mapeado y el texturizado, control avanzado para la simulación de luces y materiales, instrumentos de optimización y contenido de tiempos de cálculo). En la práctica se puede afirmar que, según el tipo de output buscado, existen diversas aplicaciones, a partir de las cuales es más conveniente y apropiado comenzar el trabajo de modelado. Estas coinciden en muchos casos con los modeladores matemáticos, pero dada su naturaleza prevalentemente destinada al *design*, adolecen de un problema muy importante que es necesario tener en cuenta. La referencia es inevitable a la sobrecarga que hace inmanejables modelos de arquitectura de gran complejidad: se debe pensar por ejemplo en la pérdida de energía (software y hardware) como resultado de la réplica de elementos seriales como columnas, molduras, capiteles realizados con la pericia métrica propia de las NURBS.

Como se ha dicho ya, muchas de las aplicaciones de modelado NURBS empleadas en el sector de la arquitectura, provienen del campo del *design* y, por lo tanto, tienen como finalidad la representación precisa de objetos individuales de uso, también muy complejos, pero que en ningún caso son comparables con la complejidad debida a la gran cantidad de anomalías presentes en la arquitectura histórica (el número de detalles, el degrado, las lagunas, las adiciones, la no perfecta ejecución de algunos elementos, etc.). A un nivel de complejidad aún más elevado se sitúa la restitución de un levantamiento arqueológico por medio de un modelo digital que, a parte que el grado de simplificación que se debería adoptar, implica problemas superiores de naturaleza práctica y conceptual.

Es así que en el caso de output de tipo divulgativo es preferible utilizar programas de modelado poligonal, proveniente del sector del “*entertainment*” que gracias a tácticas como las instancias (replicas no modificables) permiten generar y gestionar fácilmente elementos seriales que se repiten dentro de una arquitectura. En este caso se sacrifica la fiabilidad métrica del modelo, pero se gana en integridad de la representación. Existe de todas formas un inconveniente que está constituido por el tipo de output que necesariamente deberá ser de tipo *bitmap* y no vectorial, ya que los programas para el “*entertainment*” en general no permiten convertir un modelo en diseño CAD. Si por el contrario el objetivo es realizar un diseño CAD es evidente que no será necesario dividir el modelo, sino simplemente proyectarlo sobre un plano gracias a los cómodos instrumentos de dibujo presente en los modeladores legados al sector del diseño industrial. Se puede pensar, solo por poner un ejemplo, en la comodidad de poder seguir la proyección ortogonal con un modelo NURBS de un pórtico semicircular constituido por un gran número de columnas dotadas de capiteles: cada capitel presentaría en proyección ortogonal una mínima variación de los propios contornos aparentes sea visto en sección que en perspectiva y si se decidiese dibujar todo dentro de un CAD 2D (o manualmente con papel y lápiz) es evidente que la cantidad de horas de trabajo sería realmente conspicuo; pero gracias a un modelo matemático bien construido y simples instrumentos de “*array*” polar es posible obtener estos elaborados vectoriales en una fracción del tiempo de otra manera impensable. También en este caso se vuelve a repetir que no es necesario realizar el modelo matemático de toda la arquitectura, sino solo de las partes destinadas funcionalmente a asistir las proyecciones de las partes más complejas del dibujo en 2D.



A este respecto, las cuestiones de base para definir una metodología que se adapte a los output antes enumerados, comienza a definirse: por un lado existen aplicaciones que permiten, a través de los modelos matemáticos, controlar rigurosamente la forma del objeto, su construcción geométrica mediante el diseño de curvas generatrices y directrices, etc. Por el otro están los modelos numéricos que aun ofreciendo una representación a detalle bloqueado (producida a través de divisiones de un modelo matemático, directamente generada en programas de modelado numérico, o desde mallado de nubes de puntos), permiten realizar imágenes, es decir, *bitmap*, de fuerte impacto visivo, capaces de producir una descripción fiel del mismo modo en el cual un objeto arquitectónico se presenta en el mundo real a un observador.

iii. Primera rama: Los modelos matemáticos

Entrando en las ventajas de las formas de la representación numérica y matemática, a continuación se proporciona una síntesis de los aspectos más relevantes de ambas, con la finalidad de que se puedan comprender mejor los argumentos a través de ejemplos.

A esta familia pertenecen 3 tipos de modelos: los de tipo sólido, los de tipo NURBS y las superficies de subdivisión, o sub-D. Los primeros son más difundidos dentro de los mecanismos CAD, los segundos en el sector del *design*, mientras que los últimos prevalentemente se usan en la animación de personajes (*character animation*).

- Los modelos solidos

Los modeladores sólidos son a menudo empleados para restituir los levantamientos (escáner láser o tradicionales) que están basados sobre protocolos operativos típicos del dibujo más que del levantamiento. En otras palabras, se puede afirmar que tal categoría de aplicaciones está mayormente concentrada en la aplicación de medidas a objetos sólidos, más que en la utilización de medidas adquiridas en modelos digitales. La distinción quizás puede parecer sutil, pero en realidad, si se piensa en la cantidad de información que se necesita para las prácticas de gestión y de restauración en el campo de la arquitectura histórica, es posible darse cuenta como los instrumentos de modelado basados sobre sólidos resultan extremadamente limitados respecto a la restitución en tres dimensiones. Piénsese en la gestión de lesiones, alteraciones superficiales como las exfoliaciones, los lavados, etc. El motivo base para la utilización de estas aplicaciones basadas en motores de modelado 3D de tipos ACIS en el sector del levantamiento es principalmente debido a la gran popularidad de la que gozan tales sistemas de representación entre los arquitectos. Hecha la excepción de casos muy esporádicos, se considera desaconsejable emplear este género de instrumentos para restituir en las 3 dimensiones un levantamiento, a menos que no se trate de modelos fuertemente esquematizados que no tengan el propósito de reproducir fielmente la gran cantidad de información adquirida mediante levantamientos con escáner láser, y muy a menudo también con técnicas tradicionales. Los modeladores sólidos ponen a disposición del operador una serie de instrumentos para la creación de modelos digitales que van desde la creación directa de primitivos sólidos, a su combinación y modificación; además gracias a la utilización de perfiles bidimensionales utilizados como directrices y generatrices es posible



obtener modelos digitales cada vez más complejos. Los comandos disponibles en tales ámbitos de modelado son:

- Extrusiones (recta y según binarios) y revolución de perfiles en 2D
- Contribución de espesores a superficies (Shell)
- *Fillet*/bisel (accesorios circulares o lineales)
- Operaciones booleanas (adiciones, sustracciones, intersecciones)

- **Los modelos NURBS**

Los modeladores NURBS son muy flexibles y permiten restituir formas complejas con gran precisión y elegancia (se piensa en los órdenes arquitectónicos, cúpulas y bóvedas morfológicamente complejas). A diferencia de los modelos sólidos, las NURBS no definen objetos sólidos verdaderos y propios, sino que permiten, a través de la unión de más superficies llamadas *patch*, (literalmente piezas) representar los límites externos de un modelo geométrico. Por esto se utiliza la expresión *boundary representation*, o *B-rep* (Fantini, F., 2012a), ya que las piezas, no teniendo espesor, crean sólidos en sí: es por esto que a veces se utiliza la expresión “*waterproof*” para indicar un modelo matemático o numérico privado de lagunas entre una *patch* y la otra, o entre un polígono y el otro. Si esta condición no se verifica, la representación no será correcta; no solo teóricamente, sino también en la práctica, dado que los output del modelo presentan errores evidentes: desde el dibujo vectorial 2D, o el modelado rápido, al *rendering*, etc.

En realidad, hoy la distinción entre modelos sólidos y *B-rep* no es tan importante como años atrás, de hecho muchas aplicaciones admiten la interacción entre sólidos y superficies, sin embargo, se considera más apropiado en este apartado profundizar el tema de las NURBS dado que se ha consolidado en muchos sectores como la solución más eficaz para restituir de forma precisa un levantamiento con escáner láser. Los programas de *reverse modeling*, empleados sobre todo en el sector de ingeniería mecánica y del dibujo, tienen como principal objetivo obtener un modelo de superficies NURBS desde un levantamiento digital y para hacerlo emplean articulados procedimientos automáticos o semi-automáticos. En realidad en la arquitectura y en el sector arqueológico es posible adoptar estas técnicas *tout court*, y para comprender por qué resultará útil que se entiendan algunos aspectos fundamentales de este género de modelos matemáticos.

Antes de que se consolidasen como estándar, la industria del software había efectuado varias tentativas, más o menos conseguidas, que después condujeron a las NURBS como forma de representación general. De algún modo, es posible afirmar, que cada letra de este complejo acrónimo “*Non Uniform Rational Basis Spline*” (Migliari, R., 2009: 18) representa uno de los múltiples pasos evolutivos de los modeladores matemáticos. Sin embargo, es necesario aclarar un aspecto terminológico que puede ser fuente de equivocaciones sobre el significado de “representación matemática” en relación a las NURBS: una curva o superficie descrita con tal metodología no equivale a una representación analítica de una línea, una



cónica, una hélice, etc. De hecho, mediante las NURBS, los lugares geométricos no son expresados a través de centros, anillos, rалlos, etc., sino que son, de hecho, representaciones aproximadas fruto de complejos algoritmos. Si se secciona un cono NURBS no se obtiene una cónica, se obtiene una NURBS: evidentemente la distinción entre apariencia y sustancia no afecta solo al ámbito teórico, sino que reside también en la práctica. Cualquier operación de manipulación o de análisis que se quiera hacer sobre una curva presupone que será el operador quien la reconocerá como una figura geométrica conocida y quien sabrá, en consecuencia, aprovechar la propiedad.

En algunos casos, los dos mundos del modelado numérico y de las matemáticas acaban por parecerse: solo que en un caso, la naturaleza discreta de la representación es explícita, mientras en el otro el operador debe recordar que una superficie o una curva NURBS no pueden ser consideradas de la misma manera que una representación analítica.

Un cono *mesh* se describe a través de un número discreto de elementos: los vértices, conectados a través de los bordes, determinan porciones de planos concatenados. Un cono representado mediante NURBS, es un producto a través de otros entes, unidos por relaciones matemáticas más complejas dotadas de otras propiedades, pero de hecho, en la base de ambas formas de representación, se tiene una lista de elementos que contribuyen a describir numéricamente las formas en el espacio.

Aclarados estos aspectos de fondo que muy a menudo se dan por descontados, se puede afrontar más en detalle el significado del acrónimo NURBS y las matemáticas que las sustentan.

Como se ha mencionado precedentemente, en el ámbito de las NURBS, las curvas son expresadas en forma paramétrica, es decir se definirán a través de una fórmula explícita respecto a una variable:

$$(A) \quad F = F(x).$$

Donde el parámetro “x” varía entre 0 y 1. Además, las ecuaciones son expresadas a través de polinomios y por lo tanto una curva *spline* en forma vectorial se escribe así:

$$(B) \quad \vec{F} = F(x) = \vec{a}x^3 + \vec{b}x^2 + \vec{c}x + \vec{d}$$

En las NURBS, igual que para formas precedentes formas de representación matemática como *Bézier* y *B-Spline*, las coordenadas de los poli (o vértices de control) se sujetan a una media ponderada obtenida gracias a estas funciones paramétricas que, en el curso de los últimos años, han ido evolucionando para enfrentarse a la mayor necesidad de ergonomía e intuición en el dibujo asistido por ordenador.

En las etapas de evolución del dibujo CAD, las curvas de *Bézier* juegan un rol fundamental, pero, aun ofreciendo óptimos resultados, eran demasiado difíciles de controlar y por ello, a partir de éstas, se desarrollaron las *B-Spline* (funciones de Base de las *Spline* o *Basis-Spline*) que en la práctica permiten unir en una única curva más trazos curvilíneos de



tipo Bézier contralando la continuidad en los puntos de unión. El adjetivo *Rational* del acrónimo NURBS se refiere, sin embargo, a un problema muy interesante de representación que debe ser resuelto por los programadores: las curvas cónicas como la circunferencia, las parábolas, etc., no pueden ser descritas a través de simples polinomios, sino que deben hacerse a través de relaciones de polinomios (de ahí *rational*).

La “No Uniformidad” significa que a cada parte de la curva pueden corresponder valores del parámetro no uniformes: esto significa que si en la fórmula (A) se asignan como valor de parámetro $x=0,5$ (recordando que los valores del parámetro varían entre 0 y 1) no quiere decir que éste recaiga sobre el punto medio de la curva: esta relación que une el valor del parámetro a su longitud correspondiente en la curva se le llama “parametrización”.

Las consideraciones hasta aquí expuestas tienen correspondencia en el pasar de las curvas a las superficies, que se deben entender como el producto de dos curvas: como cuando se sigue la traslación de una curva generatriz sobre una directriz, solo que en las NURBS, una será una función paramétrica de “u” y la otra de “v”:

$F = F(u,v)$ En la cual tanto “u” como “v” se encuentran entre 0 y 1.

Así como las curvas NURBS son gobernadas por polígonos concatenados, que a veces se llaman *control polyline*, también a las superficies se le asocia un *control polygon* (o *control cage*) cuyos vértices son el equivalente en tres dimensiones de los poli en la base de las curvas.

Las NURBS presentan además una serie de propiedades notables, que las convierten en entidades extremadamente útiles (Migliari, R., 2009: 18):

·Posibilidad de controlar la flexibilidad a partir del grado (que en el caso de las curvas de Bézier coincide con el número de puntos menos 1)

·Facilidad en las transformaciones espaciales: para roto-trasladar una curva basta roto-trasladar los polos. Esto vale para todas las transformaciones afines y por lo tanto: translaciones, rotaciones, escalados, reflexiones.

·Envolvente convexa: la curva siempre se encuentra dentro del polígono convexo de los polos.

·Control de las tangentes: la tangente inicial a la curva tiene siempre la dirección de la línea entre el primer y el segundo polo y la final entre el penúltimo y el último.

·Control flexible: la curva no tiene más puntos de inflexión de cuantos cambios de concavidad tiene el polígono de los polos.

Muchas de las nociones apenas expuestas, aun no siendo esenciales en el conjunto de conocimientos de un operador, pueden contribuir a hacer comprender los límites constructivos de los modeladores geométricos basados en NURBS; una de las limitaciones principales respecto a la creación de modelos matemáticos para la arquitectura, depende de



la propia naturaleza “cuadrangular” de las partes individuales generadas mediante los modeladores NURBS. Sin depender del modo usado para crearlas (*loft*, *sweep*, *revolve*, etc.), las “*patch*” se mantendrán siempre como el producto de las dos direcciones paramétricas “u” y “v” y por lo tanto es una labor del operador descomponer mentalmente el modelo geométrico en un conjunto de “*patchwork*” (operación llamada “despieze”), a menos que no se pueda recurrir a las llamadas superficies “*trimmed*”, o sea, recortadas (Fantini, F., 2012a). Un simple pentágono no puede ser dibujado mediante una sola *patch* en dos direcciones a menos que no se construya como la suma de más *patch* cuadrangulares unidas.

Por cuanto respecta a la relación de las NURBS con la restitución a partir de campañas de levantamiento con escáner láser, la tendencia, en arquitectura (y a menudo también en arqueología), es extraer secciones rectas de una nube de puntos y, eventualmente, curvas caracterizadas en el caso de conversión de la nube en modelo *mesh*.

Las polilíneas o las curvas NURBS así obtenidas se emplean para especificar la necesidad de técnicas que van de la producción de objetos clásicos bidimensionales (únicamente acompañados de *screenshot* de la nube de puntos), útiles en las prácticas de gestión y documentación de un bien, hasta la construcción del “telar” *wireframe* desde el cual se desarrolla el modelo matemático.

- Los modelos sub-D

Inicialmente se ha hecho mención de otro tipo de modelo matemático llamado superficies de subdivisión, afirmando que, en realidad, no entra en el ámbito de la representación de la arquitectura dado que está principalmente ligado a la industria de los videojuegos y de los efectos cinematográficos. Sin embargo, gracias a los instrumentos de conversión de los modelos a alto detalle geométrico (modelos HP) en especial *bitmap* aplicadas a las *sub-D* es posible aplicar el detalle de los escaneados láser a tales representaciones LOD que entre otras cosas ocupan un espacio irrisorio de memoria.

Es importante saber que para el paso de la *mesh* original a sub-d existen diversos criterios. En práctica, hay algoritmos de subdivisión de tipo aproximativo como el Catmull-Clark y el Loop y otros de tipo interpolación como el *Doo-Sabin*, el *Butterfly* y el *Kobbelt* (Migliari, R., 2009: 76-78). La recaída en términos aplicativos de esta distinción es de gran importancia en el ámbito de la modelización a partir de imágenes de referencia, así como de modelos numéricos derivados de escaneados con láser. Es fácil imaginar, como en ambos casos, la exactitud de la modelización dependerá exclusivamente de la conciencia del operador que a través del recalco, llegará a la forma deseada. En todo caso, cuenta sobre todo la experiencia y la pericia del operador que deberá superar la falta de instrumentos en grado de garantizar y cuantificar la adherencia de la sub-d con el objeto a reproducir.

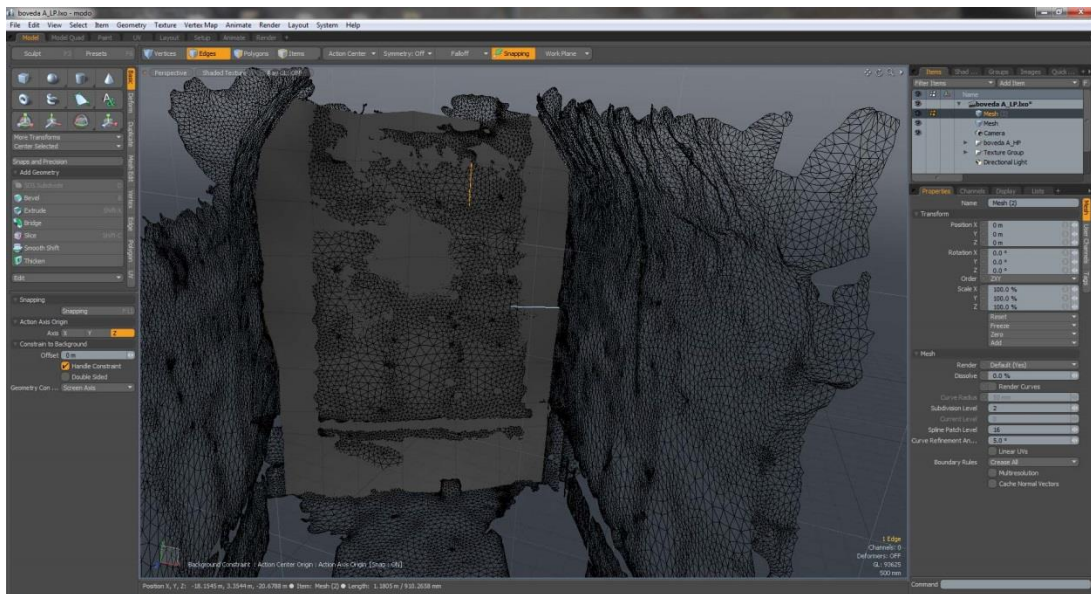


Figura 3.45. Imagen del software *Luxology Modo* en la cual se está realizando un “retopology” para generar un modelo de superficies de sub-D.

Uno de los principales límites de la modelación NURBS es constituido de la necesidad de trabajar solo con piezas cuadrangulares. El diseño de una superficie plana puede por tanto comportar problemas también en el caso de formas elementales. Un simple pentágono regular, por ejemplo, en el ámbito de tal forma de representación, debe ser realizado a través de una serie de *patch* cuadrangulares oportunamente definidas por el operador. Además, la ventaja constituida de la arbitrariedad topológica soportada por las CC presenta algunos límites ya que en algunas zonas del modelo sub-d no es posible verificar la continuidad de G_2 . La continuidad deriva de la derivada segunda, es decir, de la función que describe la curva de una sub-d, que no es verificable en proximidad de los así llamados “puntos excepción” (*extraordinary point*). Estos puntos son fácilmente reconocibles ya que en ellos converge un número de bordes diverso de cuatro. Tal número exprime la valencia de un punto y equivale al número de bordes que en este convergen. Si es diversa de cuatro, algo que ocurre inevitablemente en los polígonos triangulares y en los *n-gons* convertidos en cuadrángulos, entonces es posible que la continuidad de la curvatura no sea verificable. En todo caso, *Catmull y Clark* (Carmull, E. y Clark, J., 1978) proporcionaron una concreta alternativa a las NURBS para representar superficies morfológicamente complejas. La fortuna de este algoritmo en el ámbito del software para el “entertainment” ha sido determinada también en las sucesivas implementaciones en obras de *Pixar Animation Studios* que desarrolló las llamadas *Catmull-Clark* mismas, en grado de definir ángulos vivos sobre la base de una variación local del criterio de subdivisión.

La metodología de construcción de las sub-D no difiere de la que se utiliza en los modeladores *mesh* para obtener un modelo poligonal, con la diferencia que en este caso la *mesh* se utiliza como *control polygon* (o *control cage*) de una *patch* de tipo *B-Spline* uniforme y bicúbica. Como en el caso de las NURBS, también las sub-D son el producto de



una media seguida sobre los vértices de control, pero con algunas importantes diferencias: en el caso del algoritmo de subdivisión de *Catmull y Clark* (CC), el software crea una subdivisión de los polígonos de la *mesh* de control (de ahí el nombre de superficies de subdivisión) para determinar la nueva superficie más densa que, en un proceso iterativo, lleva a obtener una superficie límite teórica llamada σ :

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} (M)^n$$

Con M^0 se indica la *control cage* de inicio y con M^n la *n*-ésima *mesh* sobreexpuesta a subdivisión: la reiteración de las subdivisiones transforma M^0 en una superficie cada vez más lisa (*smooth*) y continua, y es por ello que las sub-D se prestan en modo eficaz a representar superficies complejas a curvatura simple o doble. Los CC son el criterio de subdivisión más difundido en los programas dedicados al *entertainment*, pero, como se comentaba, existen también el *Doo-Sabin*, el *Loop*, el *Kobbelt*, etc., que presentan ventajas y limitaciones dependiendo del tipo de finalidad. El CC presenta la ventaja de poder subdividir la *mesh* desde una topología arbitraria, es decir, polígonos triangulares, cuadrangulares o *n-gons*, lo que naturalmente constituye una seria ventaja con respecto a las *NURBS* que al contrario, por analogía, trabajan con *patch* de forma exclusivamente triangular. Los únicos inconvenientes de este método de representación son:

- La, ya comentada, presencia de puntos llamados “excepciones”, o sea de vértices de M^0 que presentan valencia diferente de 4. Utilizando el algoritmo de subdivisión de CC se obtiene, en los vértices de valencia 4, la continuidad de la derivada primera y segunda de la superficie. En todos los otros casos, esta condición no es verificable y entonces el modelo, en el entorno de estos vértices, podría presentar errores de sombreado (*shading*).
- El otro problema es que el criterio de subdivisión CC es de tipo aproximado. La recaída más problemática, bajo el perfil de la restitución es que, una vez generada una M^0 a través del recalco (*retopology*) de una *mesh* de alta densidad o *point cloud*, los puntos de σ no coincidirán con aquellos de M^0 , y mucho menos con aquellos obtenidos tramite el levantamiento.

Esta última consideración parecería relegar las *sub-D* a un ámbito de pura representación, sin pretender una documentación precisa. Sin embargo, eso se resuelve gracias a apropiadas texturas de desviación (*displacement*) ya que calculadas a partir de modelos de alta resolución, permiten obtener resultados de gran eficacia tanto bajo el aspecto de la representación como de la documentación de un objeto, en particular en el sector arqueológico.

Con los años las reglas de subdivisión dada por Catmull y Clark han sido desarrollada autónomamente por individuales *software house*, para dar a los usuarios soluciones más ergonómicas y apetecibles, sin embargo las impostaciones dadas en 1978 por los investigadores se mantiene eficaz para comprender en términos geométricos el funcionamiento de las sub-d: una vez realizado un poliedro M^0 (con topología arbitraria), el algoritmo de subdivisión lo convierte en M^1, M^2, M^3, \dots y así. Conforme la *mesh* viene subdividida presentará, además de una mayor resolución, también la interesante propiedad



que la nueva topología estará totalmente constituida de cuadrángulos. Cada cara de n -bordes se subdivide en “ n ” cuadriláteros cuyos vértices son obtenidos a través de una media ponderada que se basa sobre las coordenadas de los vértices de M^0 , de los puntos medios de cada borde, los baricentros de los vértices de cada cara. ¿Pero por qué se ha afirmado que existe una desviación entre teoría de las sub-D y las aplicaciones para la representación? La respuesta nos la proporciona por el modo con el cual se representa la superficie límite obtenida con este proceso interactivo de subdivisión. En realidad el operador trabaja siempre sobre una *mesh* de bajo detalle que continuamente convierte en una “representación ficticia” de M^∞ al fin de evaluar el recorrido. En otras palabras, trabajar con las sub-D no implica engrosar el detalle de un modelo numérico de salida convirtiéndolo en denso y liso, significa más bien trabajar sobre un modelo *mesh* muy simplificado y modificarlo continuamente hasta llegar a la forma deseada. El resultado es visualizado como si fuese un modelo matemático LOD equivalente a uno constituido por *patch b-spline* bi-cúbico uniforme.

iv. Segunda rama: Los modelos numéricos

Los modelos numéricos, contruidos a partir de muestreo instrumental, o gracias a comandos de modelación directa, son poliedros que aproximan la frontera del objeto real utilizando porciones de plano delimitadas por secuencias concatenadas de bordes (de tres, cuatro, n bordes). Los polígonos son entes privados de espesor, así como las *patch* NURBS, y por lo tanto también los modelos *mesh* entran en el ámbito de la *boundary representation (b-rep)*, ya que definen unos límites que debe separar, sin error, los puntos del espacio del interior del modelo de aquellos del exterior.

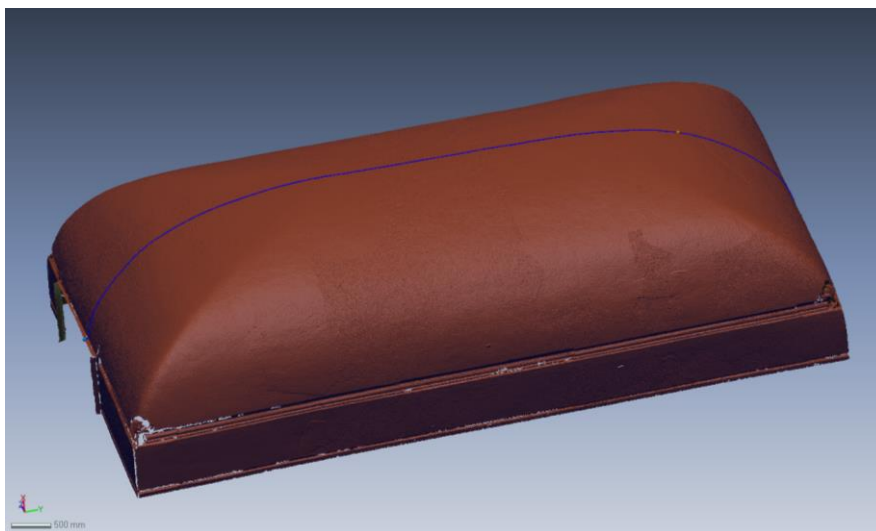


Figura 3.46. Modelo numérico resultado de la transformación en *mesh* de una nube de puntos obtenida con un escáner láser de ToF.

Las *mesh* son la forma de representación tridimensional que desde hace mucho tiempo se usa en el campo del *computer graphic* y, sin embargo, el proceso de evolución y de actualización que los envuelve no muestra señales de pararse. El motivo principal de esta “longevidad” es debido al hecho de que en las tarjetas video y en los motores de *rendering* en general, calculan



mucho más rápido los polígonos respecto a los modelos matemáticos, ya que estos, deben ser divididos antes del *rendering*.

En cualquier caso los campos de aplicación de los modelos *mesh* no están solo unidos a la visualización, entre los principales output permitidos a partir de estas formas de representación se encuentran:

- La foto-simulación y la animación;
- Las maquetas seguidas a través del modelado rápido;
- El análisis a los elementos finitos (FEA);
- Las aplicaciones real-time.

Indudablemente el sector de la visualización es el que hace mayor uso de los modelos numéricos, tanto de aquellos realizados en apropiadas aplicaciones de modelación geométrica, como de los que deriven de modelos NURBS o sólidos.

Como se ha dicho, los modeladores matemáticos permiten un mayor control en la fase inicial de construcción del modelo y por lo tanto su uso es a menudo imprescindible. Por ello, el problema de la conversión desde NURBS a *mesh* resulta prioritario para poder obtener un output de calidad.

La calidad de la conversión depende de la atención con la cual se sigue la división y, por lo tanto, se considera oportuno hacer sobre ella algunas consideraciones de orden práctico con la finalidad de que resulte clara la importancia. Es evidente que en el momento de llevar a cabo el *rendering* de un modelo matemático, el operador se encuentra con el problema de decidir si la división deber ser realizada mediante software o si conviene hacerla a priori antes del *rendering* bloqueando definitivamente la resolución del modelo. Los motivos para efectuar esta elección pueden ser de diferente naturaleza, pero en cada caso se recuerda que a menudo la adición de algunos detalles es más fácil sobre un modelo numérico que sobre uno matemático. Por ejemplo, entre los elementos que añaden realismo existen los llamados *micro-bevel* (literalmente micro-biselado) que se añaden a lo largo de los bordes de modelos de bajo detalle (*low-poly*) para mejorar el aspecto y hacerles parecer menos artificiales y abstractos.

Evidentemente no tendría sentido tratar de someter a *micro-beveling* un modelo de alta resolución (*high-poly*) obtenido mediante mallado de nubes de puntos, dado que presenta el problema opuesto (el excesivo detalle geométrico respecto a las posibilidades de visualización de muchos hardware). El peso, en términos computacionales, de este micro-biselado si se realiza mediante modelados NURBS sería muy alto y por lo tanto es aconsejable convertir en *mesh* y sucesivamente aportar estas modificaciones a nivel local.

Existen varios algoritmos que permiten la conversión de una superficie NURBS en *mesh* (*Delaunay*, paramétrica adaptiva, espacial, curvatura, etc.), sin embargo aquí no se busca tratar específicamente las características de los unos o de los otros, sino dar una serie de indicaciones generales. En este contexto, se recuerda que si el output de un modelo NURBS deber ser una imagen de *rendering*, es preferible exportar hacia los programas para el “*entertainment*” *mesh*



formadas por polígonos cuadrangulares. Este aspecto no es de menor importancia y por lo tanto en el momento de la exportación desde modeladores matemáticos puede convenir tener en cuenta, no solo por la mayor facilidad de los modelos a cuadrángulos, recibir la adición de los detalles de los cuales se ha hablado precedentemente, pero también porque permite una más fácil selección de los bordes concatenados a lo largo de lo que en las NURBS eran las direcciones “u” y “v”. Obviamente no todo un modelo puede ser dividido a cuadrángulos, pero el operador consciente podrá exportar separadamente las superficies más complejas del modelo, recordando entre otras cosas, que si los vértices de mallas cuadrangulares presentan valencia igual a 4, admiten una perfecta conversión en sub-D con las ventajas que esto puede determinar.

Por lo que se refiere al texturizado si se utilizan los formatos .OBJ y .3DS es posible guardar en el modelo *mesh* la parametrización del modelo NURBS; también este aspecto es muy importante ya que evita el molesto y complejo proceso del mapeado UV del modelo numérico.

En cuanto a los modelos *mesh* obtenidos del muestreo, el tipo de problema que habitualmente se debe resolver es un poco diverso con respecto a la división de las NURBS, dado que el material de base del cual se parte es extremadamente más denso bajo el perfil del detalle geométrico. En el caso de los modelos digitales obtenidos con el escáner láser, las revisiones que se pueden controlar en el ámbito de las aplicaciones de *mesh processing* son de naturaleza general y se refieren a decenas de miles de triángulos a la vez. En su conjunto, los instrumentos puestos a disposición de estos programas tienen el objetivo principal de crear topologías correctas y un detalle adecuado respecto a la finalidad del operador.

Los instrumentos de *mesh processing* facilitan la obtención de tales objetivos, individuando y reparando con soluciones semiautomáticas y automáticas todas las imperfecciones presentes en un modelo. Permiten además optimizar las superficies en base a diversos criterios (curvatura, número final de triángulos, longitud media de los bordes, etc.). En cada caso las tres principales categorías de errores son las siguientes:

- Todos los polígonos son dotados de una normal, es decir de un vector perpendicular a la porción de plano definida por una serie de bordes concatenados; si la normal está dirigida hacia el observador, el polígono es visible, en el caso contrario no lo es, a menos que no se “fuerce” al programa a visualizar el polígono por ambos lados. Es evidente que en el conjunto de la *mesh* debe presentar una tendencia de estos vectores que sea congruente y no presente contradicciones, por ejemplo, las seis caras de un cubo: no pueden ser dirigidas tres hacia el exterior y tres hacia el interior, pues la frontera del modelo, aunque sin lagunas, aparecerá incompleta. Trabajando con modelos de bajo detalle es fácil evaluar y reparar manualmente estos errores a través de comandos del tipo “*flip polygon*”, que se encuentran también en los programas para el “*entertainment*”, pero en el caso de modelos muy densos, es necesario utilizar instrumentos más potentes puestos a disposición por los programas de *reverse modeling*. Lo importante es evitar el recurso de instrumentos que fuercen la visualización de los polígonos por ambos lados, por lo menos en el ámbito del



- rendering*, dado que este género de soluciones aumentan de un modo desmesurado los tiempos de cálculo necesarios para la simulación de la relación luz-materia.
- Cada borde de cada polígono de un modelo *mesh* deberá ser compartido por solo otro polígono, si no la representación presentará ambigüedad. Este fenómeno llamado *dangling face* (cara colgante) está identificado y corregido por los programas de *reverse modeling*. De hecho estos polígonos no suponen ninguna contribución respecto al conjunto principal desarrollado por la *mesh*, es decir, dividir el espacio en puntos internos y externos a la b-rep.
 - Los poliedros *mesh* son complejos de células concadenadas las unas con las otras. En términos prácticos significa que en un modelo digital correctamente construido, los polígonos no deben simplemente “tocarse” los unos con los otros a lo largo de los bordes sino que deben compartir los entes geométricos de contacto. En otros términos, si dos polígonos triangulares parece que tengan en común un borde, no quiere decir que este elemento geométrico sea único, podrían ser dos bordes sobrepuestos cada uno perteneciente a uno de los dos polígonos: lo que parecen dos puntos (los extremos de los bordes) en realidad son cuatro, solo que, dos a dos, presentan las mismas coordenadas (x,y,z). En términos topológicos este género de situaciones no es diferente a un agujero en una *mesh*. Afortunadamente existen comandos a propósito para fundir juntos los vértices de un modelo numérico que presenta las mismas posiciones y que pertenecen a un entorno infinitésimo. Dependiendo de las aplicaciones, tales comandos vienen indicados con diferentes nombres (optimización, *merge*, fondos, etc.)

La corrección de estos problemas a través de un software encuentra fundamento teórico en las fórmulas de Euler para los poliedros: indudablemente es importante tener constantemente bajo control los diferentes elementos geométricos presentes en esta importante fórmula (vértices, bordes, caras), dado que en general evita la presencia de errores topológicos (a excepción de las *dangling face*), sin embargo se recuerda que es posible emplear también los modelos no sólidos, y las superficies. Pensando por ejemplo en un modelo digital que represente un territorio (Modelo Digital Terrestre, MDT), a veces no es necesario convertirlo en un volumen cerrado, sino utilizarlo simplemente como superficie privada de espesor, en el caso que se debiese realizar simplemente un *rendering*. La fórmula de Euler aplicada a este género de modelos no estaría verificada. Sin embargo, prescindiendo del resultado numérico de la fórmula, se debe observar que para obtener un output de tipo *bitmap*, puede no ser necesario cargarse de operaciones necesarias para el cierre del modelo.

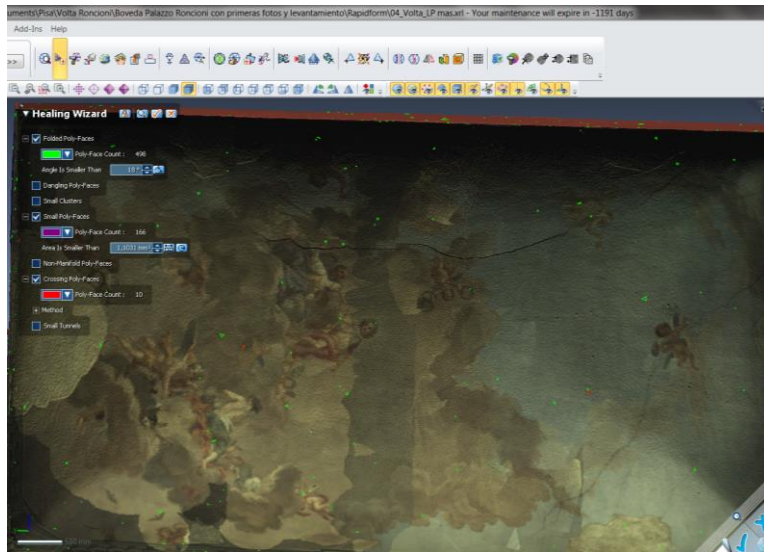


Figura 3.47. En esta imagen se puede observar un programa de *Reverse modelling* (*Rapidform XOR3*) en el cual se está realizando la eliminación de errores topológicos con un proceso semi-automático.

Al contrario los output físicos de los modelos numéricos y matemáticos, es decir los prototipos, las maquetas, y los modelos de estudio, realizados a través de máquinas para el modelado rápido (tecnología 3D *print*, estereolitografía y sintetización) necesitan modelos perfectamente cerrados y privados de errores topológicos. El formato de file más comúnmente empleado en estos sectores como input para el proceso de trabajo es el .STL que soporta caras trianguladas para aproximar la forma del objeto. El mismo rigor en la construcción de modelos se realizan también en el ámbito de los análisis FEA (*Finite Element Analysis*) llamados “a elementos finitos”, usados en el campo de la ingeniería para seguir simulaciones físicas.



C. REFERENCIAS

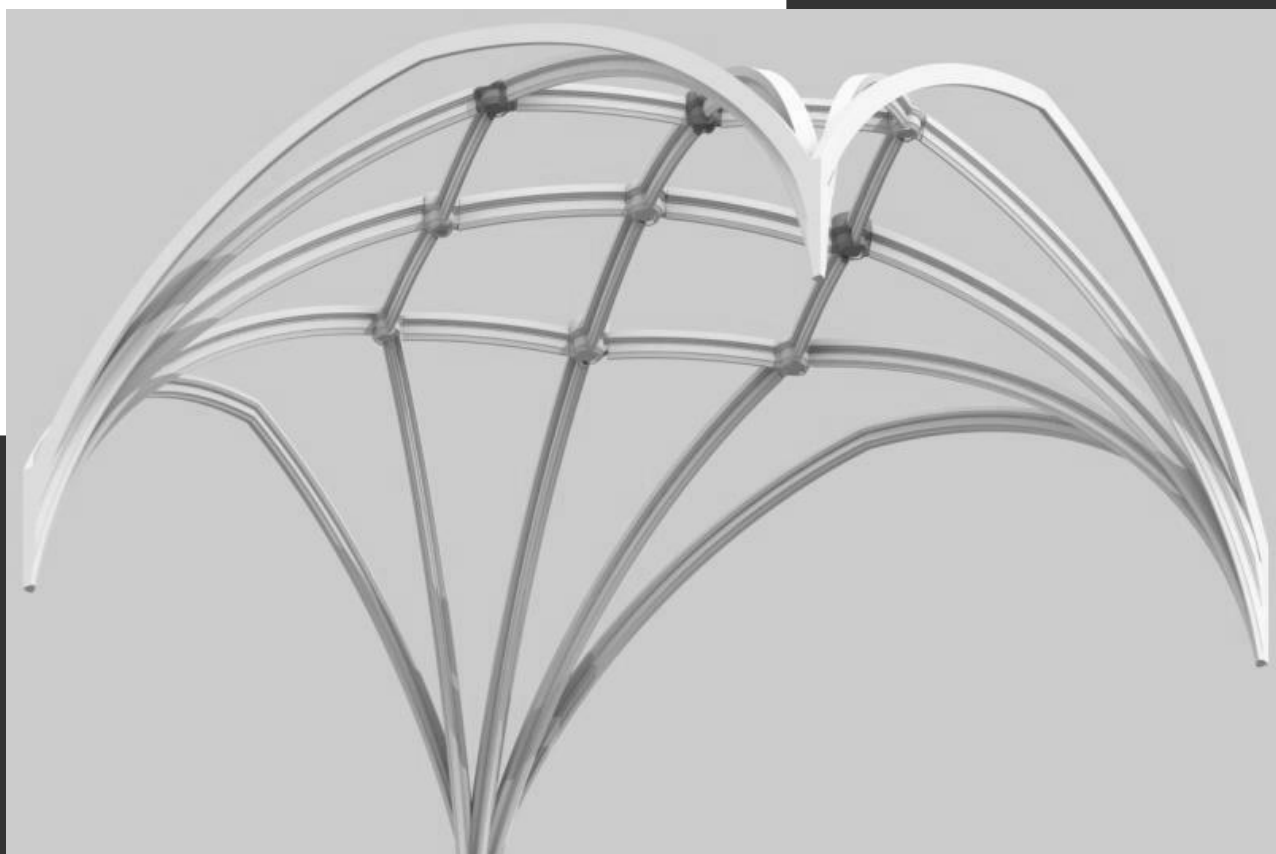
- ❖ Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010. “Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 94-117.
- ❖ Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.), 2010. *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa
- ❖ Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007. *La fotogrametría arquitectónica*. Edición UPC. Barcelona.
- ❖ Calvo, A., 1997. *Conservación y restauración. Materiales, técnicas y procedimientos. De la A a la Z*. Ediciones del Serbal. Barcelona.
- ❖ Docci, M. y Maestri, D., 1984. *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*. Ed. Laterza. Roma
- ❖ Fantini, F., 2012a. “La modelazione digitale” en Bertocci, S., Bini, M. (ed.) *Manuale di rilievo architettonico e urbano*. CittàStudi Edizioni. Novara, Italia, pp. 215-232.
- ❖ Fantini, F., 2012b. “Modelos con nivel de detalle variable realizados mediante un levantamiento digital aplicados a la arqueología” en *Revista EGA (Expresión Gráfica Arquitectónica)*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, pp. 306-217.
- ❖ Fantini, F., 2009. “Teorie e tecniche della rappresentazione numerica o poligonale” en Migliari, R. (ed.) *Geometria descrittiva, volume II, tecniche e applicazioni*. Città Studi edizioni-De Agostini Scuola. Novara, pp. 60-94.
- ❖ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. McGraw-Hill. Italia.
- ❖ Juan Vidal, F., 2012. Applicazioni del rilevamento avanzato. "Conferencia" impartida en el *Seminario Internazionale di Museografia Premio Piranesi. Prix de Rome*, realizado en la Casa dell'Architettura di Roma. 29 de agosto.
- ❖ Juan Vidal, F., Benlloch Castellò, A. y Fantini, F., 2010. Nuevas metodologías para divulgación del patrimonio disperso. *Revista Arché*. Publicación del Instituto universitario de Restauración del Patrimonio (IRP) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Valencia, pp. 319-324



- ❖ Kraus, K., 1994. *Fotogrammetria. Vol. 1. Teoria e applicazioni*. Libreria universitaria Levrotto & Bella. Torino.
- ❖ Kraus, K., 1997. *Photogrammetry. Vol. 2. Advanced Methods and Applications*. Dümmler Verlag. Bonn.
- ❖ Mandelli, E. y Velo, U., 2011. *Il modello in architettura. Cultura scientifica e rappresentazione*. Editorial Alinea. Italia.
- ❖ Manfredini, A.M. y Remondino, F., 2010. “Modellazione 3D da immagini Perperline fotogrammetrica” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 162-199.
- ❖ Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2010. *La iglesia de los desamparados de les Coves de Vinromá. Hipótesis y restitución virtual de la bóveda de la capilla mayor*. Tesina del Máster oficial de Conservación del Patrimonio Arquitectónico de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- ❖ Merlo, A. y Fantini, F., 2012. “I sistemi di ottimizzazione image based per la gestione dei modelli digitali 3D a scala urbana” en Merlo, A. (ed.) *Il castello di Pietrabuona, Quaderni di Rilievo Urbano n° 2*, Edizioni ETS, Pisa, pp. 159-165.
- ❖ Migliari, R., 2009. “Geometria descrittiva. Volume II – Tecniche e applicazioni”. CittàStudi Edizioni. Novara, Italia.
- ❖ Remondino, F., Fraser, C., 2006. “Digital camera calibration methods: considerations and comparisons” en *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, part 5*. ISPRS Commission V Symposium, Dresden, Alemania, pp. 266-272.
- ❖ Slama, CC. (ed.), 1980. *Manual of Photogrammetry. Fourth Edition*. American Society of Photogrammetry. Virginia.
- ❖ Verdiani, G., 2011. *Il ritorno all'immagine. Nuove procedure image based per il Cultural Heritage*. Editore: www.lulu.com. Italia.



CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO 1



Restauración virtual: El caso de una bóveda gótica en Coves de Vinromá¹

¹ Mtnez-Espejo Zaragoza, I, 2010.



A. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

LES COVES DE VIMROMÁ²

El origen del poblamiento de les Coves de Vinromá se sitúa, a partir del 6000 a.C., en el gran conjunto del denominado “arte rupestre levantino” del barranco de la Valltorta, declarado Patrimonio de la Humanidad. Se encuentran cuantiosos restos de poblamientos ibéricos en el término de les Coves: el de la Morería, el de la partida del Molí Consell y el dels Tossalets, donde se encontró un fragmento de lápida; pero, sobre todo, según Francesc Esteve, “*el más importante quedaba en el áspero roquero de la parte vieja del pueblo*” (Esteve i Gálvez, F., 1992: 597-618).

Durante la época romana, Coves era cruzada longitudinalmente por la Vía Augusta. Se conservan numerosos restos, entre ellos un relieve funerario hispano romano procedente del poblado de les Fontanelles o dels Tossalets, de la ocupación que se produjo al comenzar la época de Augusto, entre el s. II y la primera mitad del siglo III.

Tras el periodo de la ocupación musulmana, del que no se sabe nada, Jaime I conquistó les Coves, en la segunda mitad de agosto de 1233, convirtiéndose en un lugar de realengo, hasta el 11 de mayo de 1235, cuando el rey le cedió los castillos de les Coves y de Culla al noble aragonés Balasc d’Alagó. La propiedad de este castillo no permaneció durante mucho tiempo perteneciendo a Don Balasc, ya que en el año 1240, lo vendió a la Orden de Calatrava, para poder pagar sus deudas, según García Edo². Sin embargo, unos años después, el 2 de junio de 1275, la propiedad del castillo volvió al apellido d’Alagó, pues los calatravos cedieron, por permuta, la potestad del castillo de les Coves a N’Artal d’Alagó, bisnieto de Balasc. El 11 de noviembre de 1281, N’Artal otorgó a les Coves carta de población, (el documento que se conoce es una copia de 1496).



Figura 5.01. Cruz de Calatrava, emblema de la orden³

En 1293 el rey Jaime II compró la Tenencia de les Coves a N’Artal por 135.000 sueldos; pero no fue muy largo el dominio del rey, puesto que el 15 de septiembre de 1294 firmó con los templarios el cambio de la ciudad de Tortosa por los castillos de Ares, de Olleros (Tarragona), de Peñíscola y de les Coves. La Orden del Temple conservó la Tenencia de les Coves hasta el año 1312, cuando desapareció. Así les Coves permaneció en poder del rey hasta el año 1319, fecha en la que fue cedida a la Orden de Montesa, bajo el gobierno de la cual quedó, de hecho, hasta la desamortización de Mendizábal (1836), y de derecho, hasta la II República (1931).

En el reinado de Pedro IV el Ceremonioso, la villa de les Coves intervino en la guerra de la Unión (1347-1349), pero apoyando a los enemigos del rey y de su señor natural, lo que le costó un grave castigo de 37000 sueldos reales.

² Información obtenida de la página web: www.lescovesdevinroma.es (última consulta 06/09/2013)

³ Imagen obtenida de la página web: www.wikipedia.org (última consulta 06/09/2013)



El 31 de mayo de 1421, y durante cuarenta y dos días, las Cortes de Valencia se reunieron en les Coves para recaudar un subsidio de 22000 libras para el rey Alfonso V el Magnánimo, que permanecía en Italia, convocadas por la reina María, su esposa.

La participación de la villa de les Coves en la revuelta de las “Germanías” (1519-1522) no debió de ser significativa, ya que solo trece vecinos fueron penados.

Durante la Guerra de Sucesión (1702-1713), les Coves, al igual que todo el maestrazgo, apoyó al Archiduque Carles, por lo que los covarxins intervinieron en la defensa de Sant Mateu, asediada por los Borbón, a principios de enero de 1706.



Figura 5.02. El Portalet de Coves de Vinromá⁴

En la primera guerra carlista (1833-1840), entre los días 3, 4 y 5 de julio de 1835, la villa de les Coves fue asediada por los carlistas, siendo finalmente entregada por sus defensores, que estaban bajo las órdenes de Baptista Vidal. La tercera guerra carlista (1872-1876) asumirá en la villa de les Coves, por su situación, uno de los escenarios naturales, dado que al capitoste xivertí Pascual Cucala tenía un alto conocimiento de esas tierras; y además, los covarxins Pascual Villalonga y el «Arbolero» eran sus compañeros inseparables.

La etapa que se da en les Coves entre los años 1890 y 1936, fue muy positiva económica y socialmente. En 1921 el pueblo tenía 4594 habitantes, el máximo número alcanzado, y varias fábricas de abonos minerales, de jabón, de aguardientes y de tejas y ladrillos. Durante la Guerra Civil, les Coves quedó en zona republicana hasta el 11 de junio de 1938, cuando los soldados republicanos, tras 45 días de ataques por parte de las tropas franquistas, abandonaron el pueblo. Antes había comenzado una dramática migración de la población covarxina hacia la Huerta de Valencia. La posguerra y las grandes heladas de los años 1946 y 1956 fueron la causa de la gran caída de les Coves. En la actualidad parece que poco a poco va recuperándose de esa situación.

⁴ Imagen obtenida en la página web: www.ruralcoves.com (última consulta 06/09/2013)



LA IGLESIA VELLA O DE LOS DESAMPARADOS DE COVES DE VIMROMÀ⁵

Datos y evolución histórica

No existen muchas referencias documentales sobre la iglesia vieja de Les Coves. El documento más antiguo es de diciembre de 1248 y se trata de una sentencia arbitral, dada por el arzobispo de Tarragona entre las partes del obispado tortosino y la Orden de Calatrava, por cuestiones de diezmos, primicias y otros derechos eclesiásticos de les Coves, Polpís y la Salzadella⁶. La sentencia dispone que el obispo de Tortosa tiene que recibir la tercia parte del diezmo y la cuarta de la primicia, siendo el resto para la Orden de Calatrava, señora de estas tierras. Sin embargo, se piensa que se trataría de una iglesia anterior a la que con las naturales modificaciones, se conoce.

Mateo y Llopis, al tratar de las contribuciones de la décima (es decir la décima parte de los frutos de los beneficios eclesiásticos) correspondiendo a los años 1279 y 1280, habla de una parroquia, al señalar que paga diecinueve sueldos y nueve dineros para tal requerimiento. Si se compara esta cantidad con los cincuenta y cinco sueldos que se sacaban de los beneficios de la Salzadella y los veinticinco de Albocasser, no resuelta difícil pensar que el pueblo era entonces muy pequeño (si es que no estaba constituyéndose como tal por esas fechas) y que la iglesia, por lo tanto, contaría, como mucho, con un rector y un solo benefactor (Mateu y Llopis, F., 1946: 494-501).

La visita pastoral que hace el obispo Paholac, en el año 1314-15, solo proporciona el nombre del rector parroquial, un tal Domingo Porquet, y añade que la iglesia estaba provista de libros litúrgicos, además de ofrecer otras informaciones, también curiosas, pero que no hacen referencia directa al edificio como tal.

Ya hasta el último tercio del siglo XIV no aparecen más noticias. En el año 1374, Pere de Thous, mestre de Montesa, autoriza a Pere Çarreal, para edificar una capilla en la mencionada iglesia, que estaría puesta bajo la advocación de San Pedro apóstol. La capilla se construiría al lado del evangelio "es a dreita part de la eclesia en ves tremontana..." en un callejón que bordeaba toda la iglesia por la parte norte, hasta llega el cementerio. De este callejón el maestro de obras podía tomar el espacio que le hiciera falta "*aytant com per a la construccio de dita capella ne haurets mester...*"

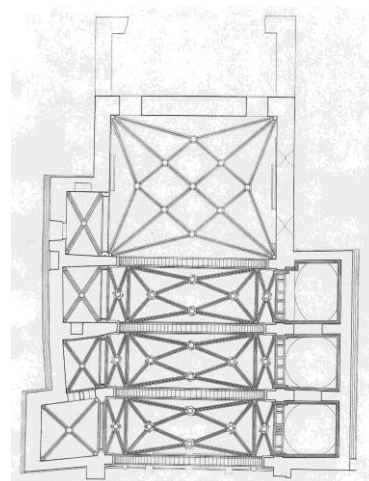


Figura 5.03. Planta actual de la iglesia⁷

Para realizar la capilla, se invade como se comentaba parte del callejón. Se cree que se trata de la primera capilla (desde los pies de la iglesia) hoy existente junto al evangelio, la que tiene

⁵ DIAZ MANTECA, E. "*Les Coves de Vinromà. Una vila del maestrat històric*". Col.lecció Universitària. Diputació de Castelló. 2002, pp.87-94.

⁶ A.H.N., Secció Ordens Militars, Montesa. Manuscrit 543-C. fol. 100 v.i següents.

⁷ Imagen proporcionada por los arquitectos Francisco Grande Grande e Ignacio Gil Mascarell.

el bello arco que tanto tiempo estuviera puesto al inicio de las escaleras de casa la villa. Si se observa el actual plano de la iglesia, se puede comprobar, efectivamente, que esta capilla sobresale de las otras, invadiendo parte de donde debió estar un primitivo callejón, que conduciría al viejo cementerio, situado junto al actual depósito del agua.⁸

Esta capilla tuvo que ser la que sirvió de modelo al maestro picapedrero Bertomeu Duran (1377-1407), el cual era de la ciudad de Tortosa, quien trabajaba en el año 1377 en la construcción de la capilla de Sant Miquel i Sant Pere, de la iglesia parroquial de Catí, según testimonia Joan Puig (1947: 99-100): "*Donam a construir e obran a vos, Berthomeu Duran, vey de la ciutat de Tortosa, present, una capella de pedra piquada dins e de fora, ab croes de pedra piquada, segons que los croes de les capelles de les Coves o del loch de Onda son construyts e he dificats...*".

En el año 1921, aparece en el Boletín de la Sociedad Castellonense de Cultura, en uno de los suplementos escritos por algunos de los fundadores de la institución, una nota titulada "*Un día en el maestrazgo*", en la cual Lluís Revest, autor del reportaje, escribía de les Coves, una noticia de la iglesia vieja (1921:VI-VII): "*Huroneamos en su viejo templo gótico, oculto bajo la apariencia vulgarísima de una fachada frontera, sin más signo religioso que un buen retablo de azulejos modernos, con la imagen de la Virgen, con un afiligranado pinaculillo gótico por*



Figura 5.04. Imagen de las reliquias pétreas que se conservan en la iglesia

montera y su buena ménsula pareja, pétreas reliquias que incitan a penetrar en aquel interesante típico, ruinoso templo gótico. Es tan atractivo de simpatías en su sencilla y decorosa vetustez, que su recuerdo perdura como el encuentro con una viejecilla honorable, limpia y de noble prestancia que aun viste galas añejas, reliquias de sus años mozos, allí en su altar mayor nos atrae las miradas una vieja gótica escultura de San Pedro y bajo la mesa del altar escudriñamos una imagen de la Virgen de la Aurora, allí arrumbada por su vetustez y digna de un museo de arte gótico...". La escultura de San Pedro, a la que Revest se refiere, se presume que sería la que presidiría la capilla que

se comentaba en precedencia. Sin embargo, se debe agregar que de las dos imágenes, la expuesta de San Pedro y la de la Virgen de la Aurora, no queda nada.

Tampoco a los investigadores les ha interesado demasiado el tema de la vieja iglesia, aunque las fuentes bibliográficas clásicas, señalan siempre la existencia de esta "*vieja iglesia*", a veces para contraponerlo al "*nuevo y amplio templo*", comenzado a edificar en la segunda mitad del siglo XVIII.

Sólo con motivo de la primera fase de restauración, empieza a hacerse por parte de los arquitectos, Francisco Grande e Ignacio Gil Mascarell, un exhaustivo estudio arquitectónico-

⁸ El documento de la contratación de esta capilla se puede ver en Díaz manteca, E. y Olucha Montins, F. (1991: 29-35).

arqueológico, que acompaña como memoria del proyecto de intervención.⁹ También el arquitecto de Patrimonio, Arturo Zaragoza Catalán (1990: 9-19), publica en el BCEM un artículo con sus apreciaciones personales sobre tan interesante como abandonado edificio.

Evolución constructiva

Los autores del proyecto, comentado anteriormente, Francisco Grande e Ignacio Gil Mascarell, apuntan como hipótesis que la iglesia hubiese tenido cuatro fases constructivas. Una primera, correspondiente a los siglos XIII y XIV, en la que sitúan la edificación de las capillas cuarta y tercera del lado del evangelio, los arcos de diafragma y los muros del presbiterio. Como elementos que la identifican, arcos diafragmáticos, ventanas del muro del ábside, arcos formeros y cruceros, plementerías y claves de las capillas. Una segunda fase, que abarcaría los siglos XIV y XV, con la edificación de las capillas segunda y primera del lado del evangelio. En la tercera fase, correspondientes a los siglos XV-XVI, se construiría la bóveda de la nave central y el presbiterio, con idénticas molduras en las dovelas, la misma iconografía de las claves y los arranques que se conservan. Finalmente, una cuarta fase, siglos XVII-XVIII, con la construcción de las capillas del lado de la epístola, con una serie de elementos identificativos: casetones, impostas corridas, bóvedas vaídas, esgrafiados, etc.¹⁰

Adosada la construcción a la muralla por su cabecera, al realizar las obras de consolidación aparecieron testimonios de los fundamentos del primitivo edificio, una iglesia de las llamadas "de reconquista", de planta rectangular, arcos formeros y techo de madera a dos vertientes. Este tipo de cubierta debió mantenerse, según señala A. Zaragoza hasta la reforma del siglo XVI, cuando fue sustituido por unas bóvedas de crucería.

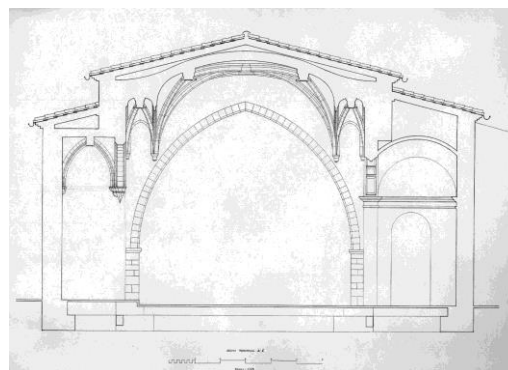


Figura 5.05. Sección transversal de la iglesia actual en la que se pueden observar las bóvedas de crucería¹¹

De cuatro tramos, además del presbiterio y muy posiblemente con acceso lateral, quizá porticado con un "nártex", tal y como aún hoy se puede ver la iglesia de San Cristofol de Castellnovo (Rodríguez Culebras, R. y Olucha Montin, F., 1998: 8), sería a partir de la segunda mitad del siglo XIV cuando se abrirían al lado del Evangelio tres capillas, cubiertas con crucería simple, una de ellas la de Pedro Çarreal, que como se ha comentado antes estaba dedicada a San Pedro. La portada, orientada hacia el mediodía, junto a la epístola era de factura muy sencilla, de medio punto, con impostas y una filigrana doselete, recuerdos de la imagen gótica que debió haber. Cuando se derribó este tramo, donde estaba la portada, ya no existía el menor rastro de dicha figura, de la Virgen muy probablemente, y en su lugar figuraba, según permiten comprobar las

⁹ Agradecer a los autores del proyecto el que hayan permitido la consulta de toda la documentación y de los materiales aparecidos durante los trabajos, así como la autorización para publicar los planos y dibujos.

¹⁰ Proyecto básico y de ejecución para la restauración de la iglesia vieja de los Desamparados de Cuevas de Vinromá (Castellón), 2ª fase, pp. 6 i 7 de la Memoria Constructiva y de materiales.

¹¹ Imagen proporcionada por los arquitectos que llevaron la restauración de la iglesia D. Francisco Grande e Ignacio Gil Mascarell.

fotografías, un pequeño retablo de azulejos, relativamente moderno, con la imagen de la Virgen de los Desamparados, la última titular de la Iglesia.

En estas capillas del lado del evangelio se conserva, aunque en precarias condiciones, parte de la primitiva decoración mural, restaurada parcialmente por el Servicio de la Diputación Provincial. Se trata de una ornamentación basada en dibujos de tipo geométrico y floral, en tonos ocres, bermellones y negros. Resulta difícil determinar a qué época concreta corresponden, aunque algunos de los motivos parecen góticos del siglo XV.

A finales del siglo XVI y principios del XVII fue objeto de reformas: ampliación de la nave por la cabecera, añadido de un tramo más a los pies; apertura de tres capillas junto a la epístola y sustitución de la cubierta de madera por bóvedas con nervaduras simples, con terceletes. Se conservan en bastante buen estado una serie de excelentes esgrafiados, decoración bastante frecuente en algunas iglesias castellanenses de esta época (la de la Sangre de Nules, sería sólo un ejemplo de otros muchos existente en estas tierras).

De la descripción que nos hace Luis Revest, puede deducirse que ya por los años veinte, seguramente herencia de todo el siglo XIX, la iglesia vieja estaba prácticamente abandonada, aunque quedaron todavía muchos testimonios de su origen medieval. Lo que quedaba de aquellos restos (imágenes, altares, etc.), acabaría por desaparecer durante la guerra civil. Sólo se salvarían, algunos de los objetos litúrgicos que en su momento habían sido llevados a la nueva iglesia.

Durante la guerra civil el edificio sufrió considerablemente en su estructura. Incluso se perforó parte de la bóveda de alguna capilla para instalar nidos de ametralladoras. Los bombardeos afectaron a la totalidad del presbiterio y dependencias anexas, y apenas terminada la guerra, ante lo que parecía inminente peligro de derrumbarse, se tomó la opción de volar la bóveda con dinamita. Después, y durante muchos años, la iglesia se ve convertida en un auténtico vertedero de escombros, hasta que finalmente, en 1983, le llega la hora de su recuperación.

Hoy, aún sin terminar la última fase de rehabilitación (proyecto que incomprensiblemente está parado), el edificio ha recuperado gran parte de su primitiva estructura convirtiéndose en un local destinado a usos culturales.



Figura 5.06. Esgrafiados conservados en una de las capillas de la iglesia.



Figura 5.07. Parte de las piezas que formaban la bóveda que cubría el presbiterio situadas en el interior de éste en el suelo.



B. OBJETO

La restauración siempre ha generado muchos conflictos, ya que a lo largo de la historia ha habido múltiples corrientes muy diversas y en general bastante opuestas. Un ejemplo claro de ello fueron la “restauración en estilo” (Restauo Estilístico) y la “restauración arqueológica”, que si bien se dieron en la misma época, las ideas eran totalmente opuestas. Sin embargo, dejando a un lado las ideas de conservación y restauración, la normativa es clara, y las cartas que se han ido realizando a lo largo de los años para orientar a los profesionales de la restauración también lo son. Así se llega a la carta de Cracovia del 2000, que presenta como una de sus ideas bases la reversibilidad.

Algo también reflejado, anteriormente, por Cesari Brandi: *“El tercer principio (de la restauración), hace referencia al futuro y prescribe que toda intervención de restauración deber ser tal que no imposibilite, sino más bien facilite, las posibles intervenciones futuras”*

Así, manteniendo este principio como una de las ideas bases, se desarrolla un proyecto que permite experimentar y estudiar la solución de una hipotética intervención sin necesidad de ejecutarla in situ. De este modo se conocen cada una de los riesgos y se sabe el resultado final, antes de intervenir. El procedimiento consiste en hacer una serie de estudios previos, y partiendo de éstos, se realizan hipótesis de reconstrucción con técnicas informáticas, que permiten comprobar la viabilidad de la solución, sin necesidad de intervenir en el edificio.

En este caso el estudio se ocupa de una bóveda del siglo XVI, perteneciente a la iglesia de los Desamparados de Les Coves de Vinromá: la antigua bóveda de su Capilla Mayor o Presbiterio. Esta bóveda fue derribada durante la Guerra Civil. Sin embargo, gran parte de las piezas que la formaban todavía se encuentran en el suelo, recuperadas de entre los escombros. Para este estudio se busca realizar una anastilosis virtual de la bóveda, utilizando tanto métodos tradicionales (mediciones con metro, peine de arqueólogo, croquis...) como métodos modernos (escáner láser de dos diferentes precisiones).

En la propuesta, se plantea efectuar la anastilosis virtual, realizando una ficha exhaustiva a cada una de las piezas que se han encontrado, para después comprobar si sería posible la reconstrucción de la bóveda, siempre y cuando, el número de piezas conservadas fuera suficiente. Además de este estudio con métodos tradicionales, se buscaba introducir una nueva tecnología que aumentase la precisión en dicha investigación. Para ello, se necesitaba realizar el escaneado de la capilla mayor, de todas las claves conservadas y de algunas dovelas.

La cantidad de piezas conservadas es muy elevada. Todas han sido identificadas, dibujadas y medidas con métodos tradicionales. El estudio pormenorizado, utilizando la información obtenida con el escáner láser, se ha ceñido a todas las claves, y a alguna dovela de cada uno de los tipos de nervios identificados. Con todo esto, ha sido posible replantear digitalmente los ángulos y las trazas de la bóveda, siguiendo los tratados y las tipologías de entonces.¹²

¹² Para dicho estudio se ha consultado a un experto en el tema, el profesor Juan Carlos Navarro Fajardo.

La hipótesis sobre la traza de esta bóveda evoluciona desde el estudio realizado por el profesor Francisco Grande e Ignacio Gil, deducida con la toma de datos directa que se realizó en el momento en que intervino en la iglesia, hasta la conclusión que se alcanza con este trabajo, al utilizar instrumentos avanzados de mayor precisión.

Así, finalmente se presenta el proyecto, obteniéndose una solución final, generada como fusión de esas dos ramas, el estudio y la evolución de trazas de una manera teórica y el análisis de éstas mediante instrumentos manuales geométricos e informáticos.

C. MEDIOS, SISTEMAS Y METODOLOGÍA DE LEVANTAMIENTO

El proyecto comienza con la toma de datos. Para realizarla se han utilizado dos métodos diferentes. Por un lado, se ha utilizado el método clásico, tomando datos mediante el empleo de croquis y un flexómetro para coger las medidas, utilizando, en algunos casos, un peine de arqueólogo. El segundo método, es el Scanner Láser 3D, el cual se ha utilizado en dos tipologías distintas, uno de mayor tamaño y menor precisión, para la toma de datos de la iglesia en general, y otro de menor tamaño y altísima precisión para tomar los datos de las claves y las dovelas. No obstante, se hablará de los dos tipos de escáner, más adelante, en el apartado correspondiente.

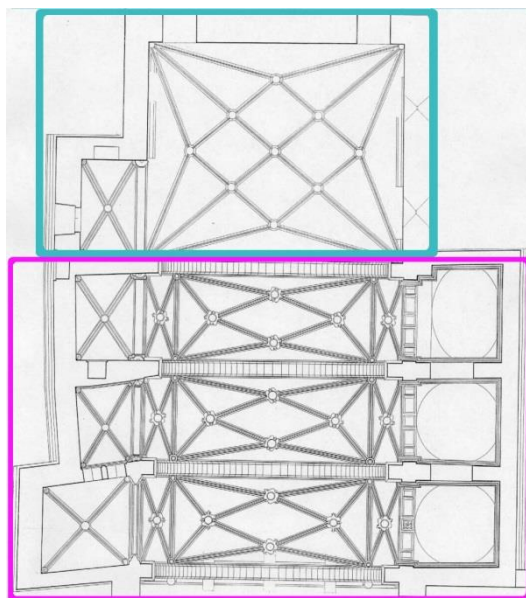


Figura 5.08. La parte azul corresponde a la zona no restaurada, la parte rosa es la restaurada¹³

La iglesia *vella* o de los Desamparados de Coves de Vinromá, consta en la actualidad de dos partes, una restaurada, que corresponde a 3 tramos de la nave, y otra parte que queda al aire libre, sin restaurar y que apenas mantiene los cuatro muros que en su día formaron el presbiterio de la magnífica iglesia gótica que fue. Este trabajo se ha realizado buscando la restauración hipotética de la bóveda que cubre el presbiterio, lugar en el que se encuentran, además, gran parte de las piezas que un día la formaron.

Para dicho trabajo, ha sido necesario el traslado de las piezas al interior de la zona restaurada, realizando de este modo su ficha

¹³ Imagen proporcionada por los arquitectos que llevaron la restauración de la iglesia D. Francisco Grande e Ignacio Gil Marcarell.

correspondiente, de cada una de ellas, y el escaneado, de algunas de ellas, siendo en el caso de las claves, su totalidad. Las piezas encontradas suman un total de 212 dovelas y 7 claves, sin tener en cuenta otras, no pertenecientes a la bóveda objeto de estudio. Para estas labores, se han efectuado varias campañas, ya que las piezas extendidas para su medición, no cabían de una sola vez en la iglesia, que a su vez tenía que compatibilizar los actos que de vez en cuando se efectuaban en ella. Además hubo que contar con la ayuda de personal del ayuntamiento para el traslado de las piezas.



Figura 5.09. Restos del presbiterio, tras la última restauración¹

i. Clásico: Medidas directas

La toma de datos ha constado de varias partes. Una de ellas, ha consistido en obtener la información necesaria mediante el uso de flexómetro, peine de arqueólogo y nivel, reflejada, a continuación, en dibujos a mano alzada con sus medidas para su posterior estudio.

Se ha realizado un croquis de cada una de las dovelas que se han encontrado en la iglesia, y que pertenecían a la bóveda que es objeto de estudio, al igual que de las claves. Para ello se ha dibujado, en el caso de las dovelas, el alzado, una sección y la planta (como se puede percibir en la imagen que se muestra bajo el texto), pudiendo de este modo, identificar todas las medidas que se consideraban necesarias para el estudio de éstas. Para las claves, se han tenido que realizar algún trazo más, ya que con un único alzado, no se obtenía la información necesaria.

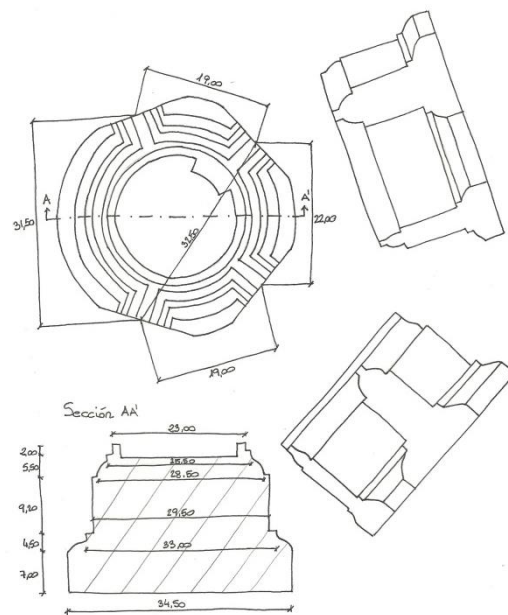


Figura 5.10. Croquis de la Clave 1, en la cual se reflejan sus medidas

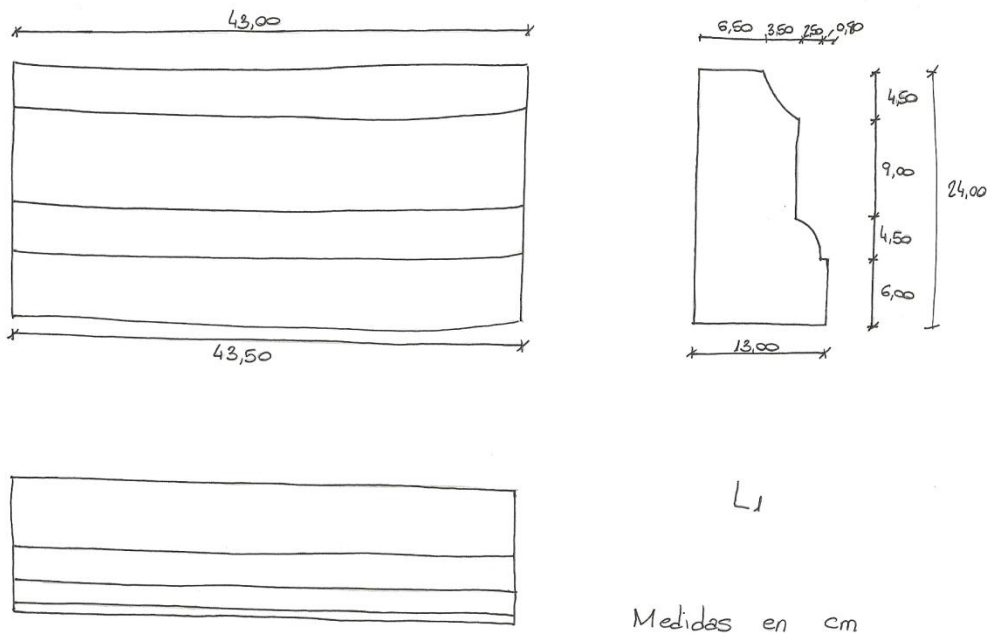


Figura 5.11. Croquis de una de las dovelas que forman la bóveda de la capilla mayor, en particular de un formero.

ii. Láser Escáner

Para realizar los escaneados se han utilizado dos modelos de escáner diferentes. Para escanear las dovelas y las claves se ha utilizado el láser “*NextEngine Model 2020i Desktop 3D Scanner*”. Este láser tiene una precisión de 0,0001 metros; trabaja mediante una tecnología llamada “*laser stripe*” que hace un barrido de la figura traspasándola al ordenador como una nube de puntos, generando un modelo numérico descrito por polígonos y un modelo matemático descrito por polígonos y ecuaciones. Para escanear la iglesia, los distintos tramos y el presbiterio, se ha utilizado el escáner “*HDSscanStation 2*”, este escáner tiene una precisión menor, de 0,01 metros, y su forma de trabajar es mediante dos ventanas que hacen un barrido frontal primero de -45° a $22,5^\circ$ y luego uno vertical de $22,5^\circ$ a 90° girando siempre 360° . Este escáner también convierte lo escaneado en una nube de puntos. Los dos escáneres utilizados necesitan un ordenador auxiliar para trabajar.

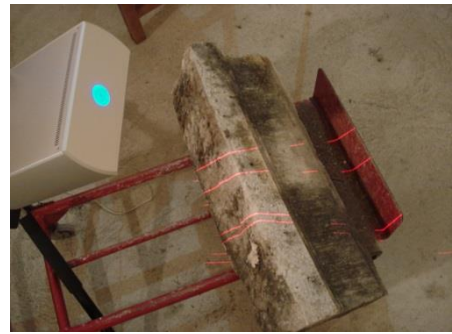
Se ha considerado interesante explicar las fases que se han de seguir desde que se coloca el escáner a punto para realizar el barrido hasta que se convierte en un modelo 3D completo, como un objeto sólido, ya que esto requiere seguir unos pasos con cierto orden. Como los pasos a seguir son casi iguales con ambos escáneres, se van a exponer los efectuados por uno de ellos (el escáner *NextEngine*) y luego brevemente se comentarán las diferencias con respecto al otro. Las fases serán las siguientes:

Fase 1: Escaneado *in situ* con escáner de triangulación.

En primer lugar, explicar que este escáner posee una pequeña plataforma donde objetos livianos y de pequeño tamaño se pueden poner y esta trabajaría con el escáner girando de tal forma que se hiciesen los 360° sin tocar el objeto. El problema surge cuando el objeto no es tan pequeño ni tan ligero como para ponerlo en esa plataforma. Es este el caso de las piezas que se están estudiando. Así pues, cuando se va a escanear es necesario hacer escaneados individuales, y cambiar la posición del escáner y/o la pieza en modo manual. Al realizar las capturas, se debe recordar mantener una superposición alta de los escaneados, de modo que en la fase de alineación sea posible encontrar puntos homólogos. Se ha decidido no utilizar dianas.



Figuras 5.12 y 5.13. Escáner realizando el barrido de una clave arriba y de una dovela abajo



Fase 2: Exportación a un programa de edición de la nube de puntos (o de la *mesh*, para escáner a Triangulación)

Para exportar la nube de puntos (o la *mesh*) del programa inicial a un programa de edición, se debe tener en cuenta que no todos los formatos son compatibles con los programas que se deberán utilizar en la edición. En general, los formatos “*ply” y “*obj”, son formatos compatibles y que permiten preservar toda la información útil para el trabajo que se busca acometer.

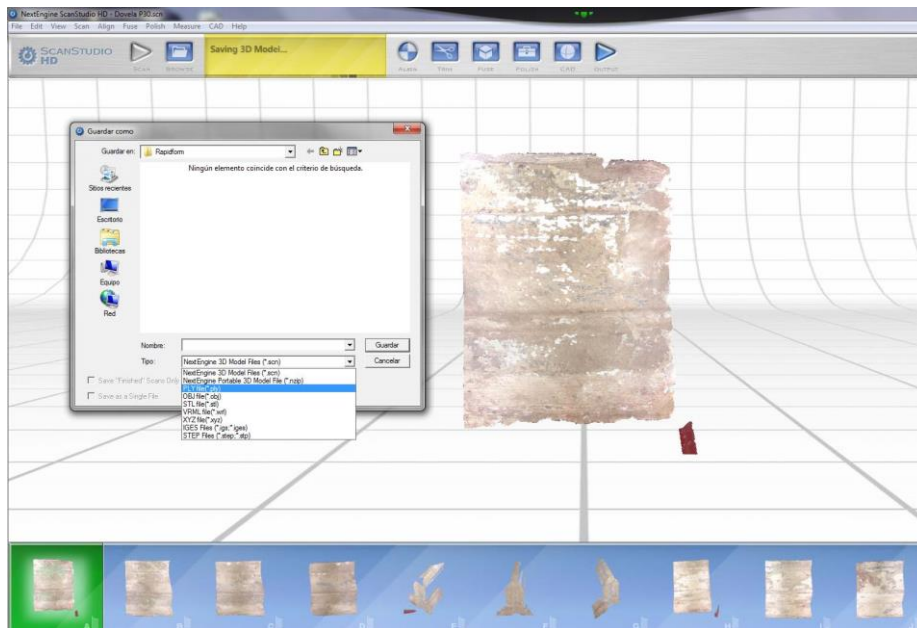


Figura 5.14. En esta imagen se puede observar el menú del programa *NextEngine*, con todos los escaneados realizados. En ese momento se están guardando las celdas en *ply para poder a continuación abrirlo en el programa que gestiona la nube de puntos (*Rapidform*).

Fase 3: Alineación de capas.

Debe explicarse que el escáner que se utiliza para tomar datos de las claves y las dovelas cuando se coloca no se orienta, por lo que cuando se abren las celdas, en el programa de edición, las capas tienen cada una de ellas una orientación diferente, es decir, están en un sistema de coordenadas diferentes. Es por ello, como se explicaba en la fase de escaneado, que las celdas deben presentar partes coincidentes. En esta fase lo que se hace es elegir puntos homólogos entre las celdas para conseguir una alineación igual en todas ellas. Si el escaneado se ha realizado correctamente las partes coincidentes entre celdas se verán fusionadas como una sola formando una red de polígonos más concentrada.

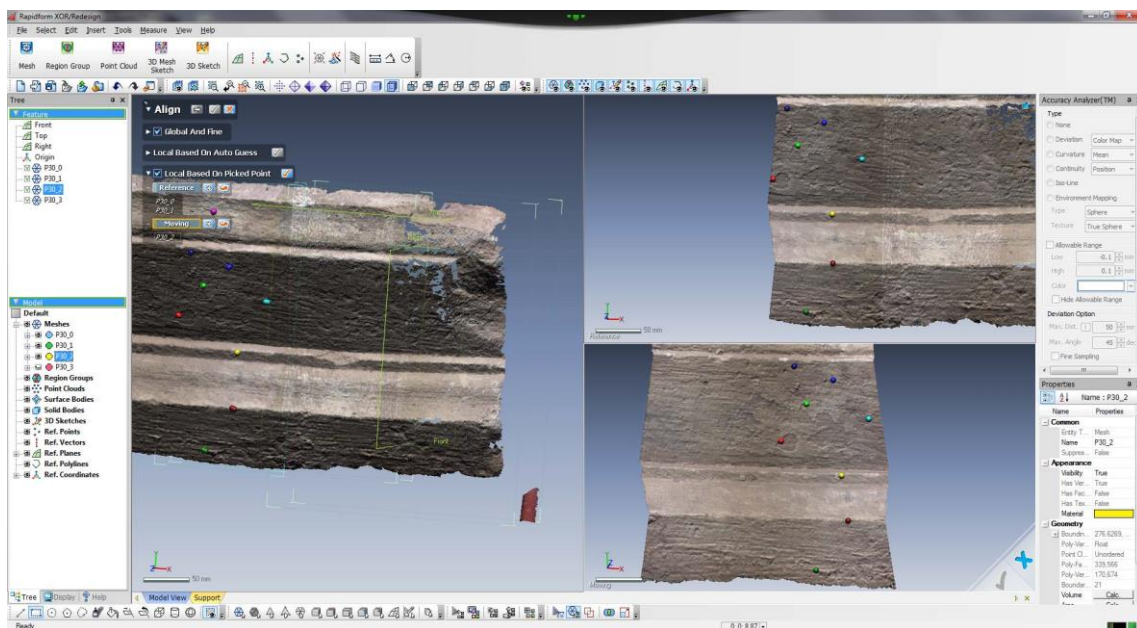
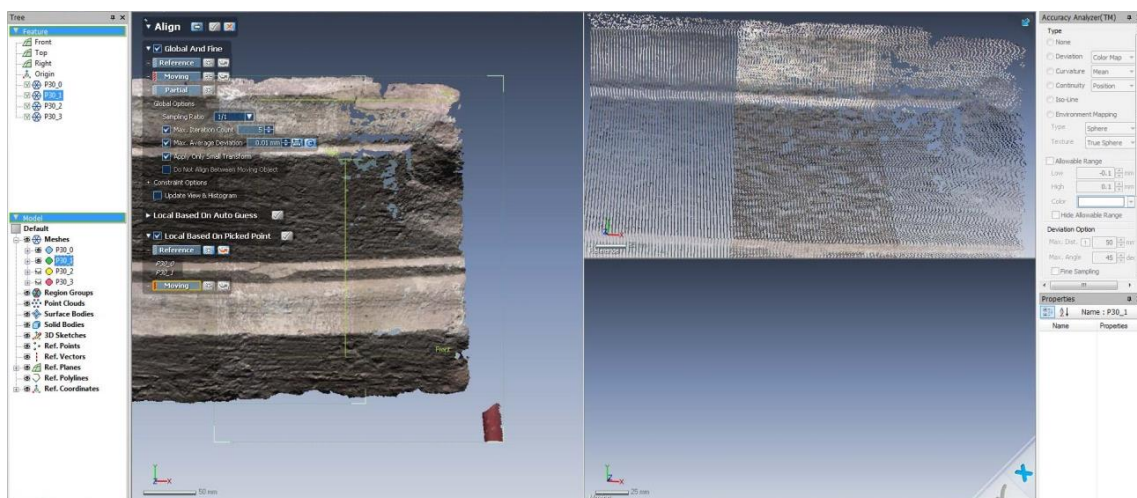
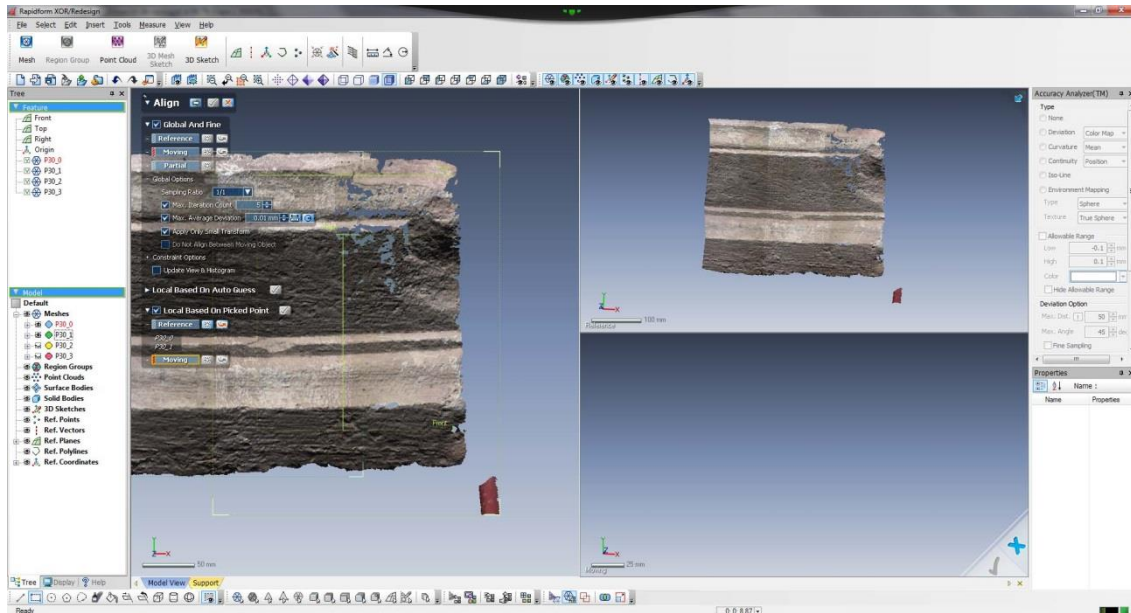


Figura 5.15. En estas imágenes se puede observar la elección de los puntos homólogos para la alineación de dos *mesh*.

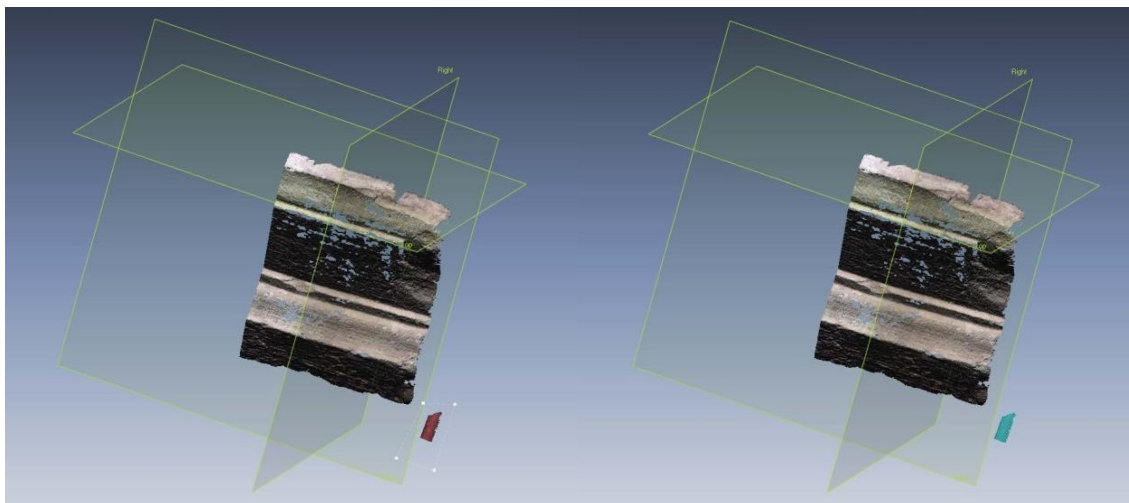




Figuras 5.16 y 5.17. En estas imágenes se puede observar la recolocación de dos *mesh*, una vez se han elegido los puntos homólogos, y como finalmente quedan situadas en un mismo sistema de coordenadas.

Fase 4: Limpieza de elementos sobrantes.

Cuando se realizan los escaneados, no se puede evitar que, en el barrido, éste capten elementos no pertenecientes a la pieza que se está escaneando. En esta fase, lo que se pretende es eliminar tanto los elementos sobrantes como aquellas partes del escaneado, que si bien forman parte de la pieza, no tienen una buena calidad y es preferible eliminarlas.



Figuras 5.18 y 5.19. En esta imagen se puede observar el elemento sobrante que es captado por el escáner y el proceso para su eliminación.

Cuando lo que se quiere es eliminar los bordes que no tienen la calidad óptima, se procede de forma diferente. En este caso, la forma apropiada, o aconsejada, es la opción que permiten algunos programas para la edición de bordes.

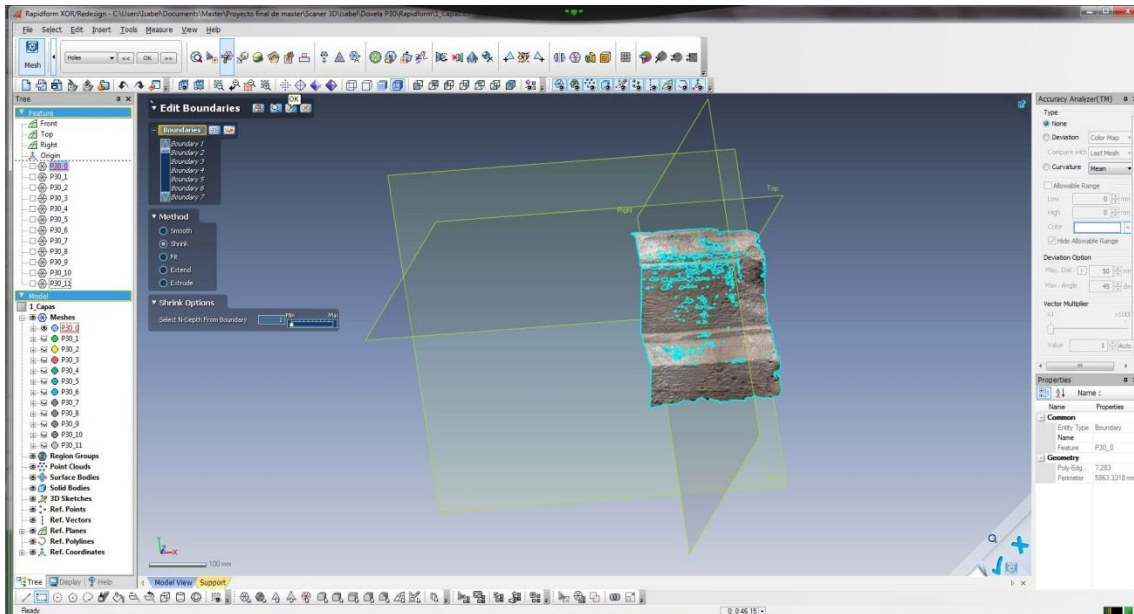


Figura 5.20. Edición de bordes de la *mesh*.

Fase 5: Alineación rigurosa

Esta fase es un proceso previo que se realiza como preparación para juntar todas las celdas en una sola. El procedimiento consiste en elegir todas las capas y hacer una alineación total, ya no se utilizan puntos homólogos como se hacía en la fase anterior de alineación. En este caso, el programa solo se encarga de hacer la alineación reconociendo curvas y polígonos.

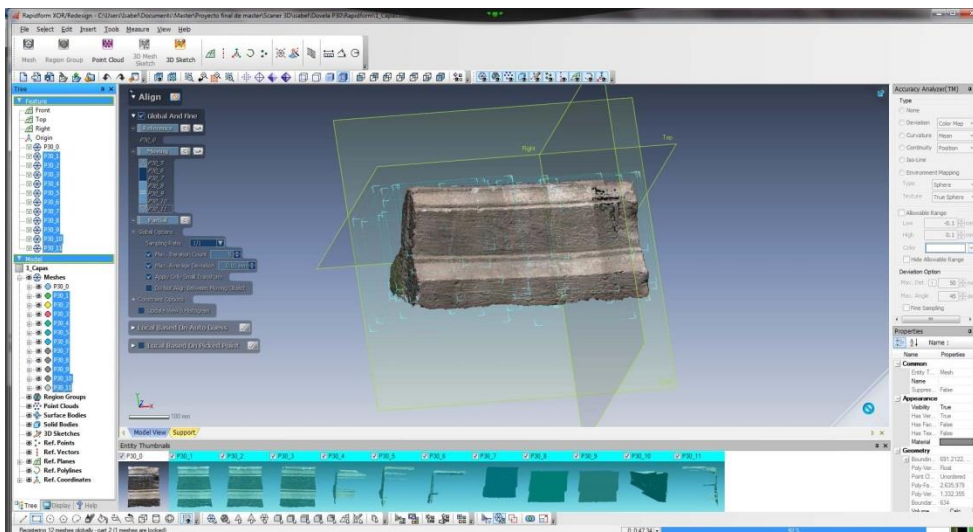
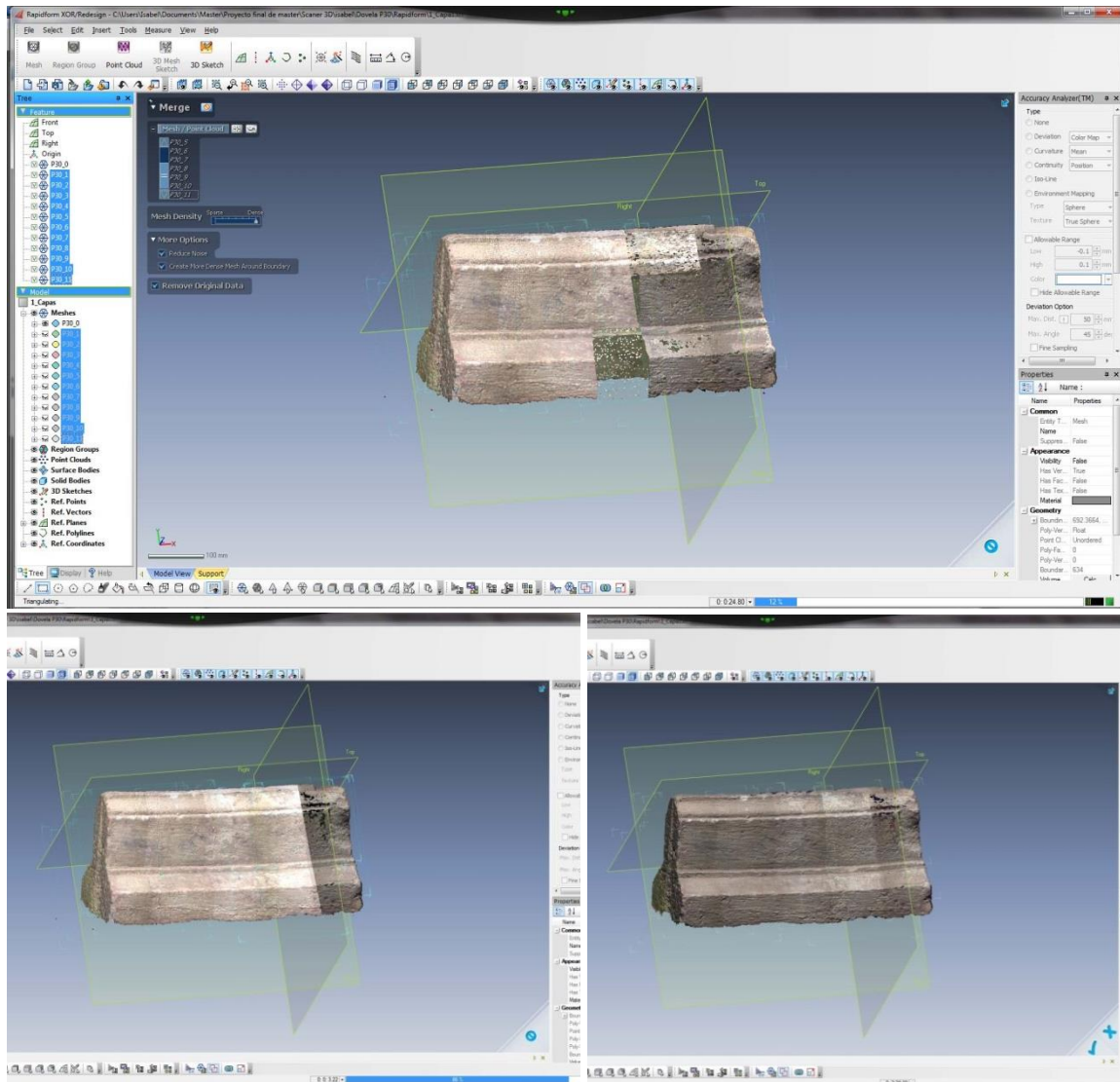


Figura 5.21. Alineación fina de todas las *mesh* después del proceso individual a pares.

Fase 6: Fusión de capas en una sola

Esta fase, es sin duda una de las más importantes, ya que una vez que se efectúa, las capas no se podrán modificar independientemente, todas las capas serán una sola, y las modificaciones se harán al conjunto entero.



Figuras 5.22, 5.23 y 5.24. En estas imágenes se puede observar el proceso que se va realizando hasta que se han unido todas las capas o celdas en una sola. Este proceso puede tardar minutos.

Fase 7: Eliminación de los errores topológicos

Tras la fase de fusión, pueden presentarse una serie de errores como: polígonos al contrario, algunos pares de celdas que no se ha unido del todo bien y presentan en una pequeña zona dos capas que en principio deberían ser la misma, etc. Estos errores, en general, son fáciles de

solucionar ya que los programas de edición de la *mesh*, presentan una serie de comandos que permitirán arreglarlos.

Fase 8: Relleno de huecos

Terminadas las fases anteriores, se obtiene una figura completa, una malla de polígonos definida en todas sus caras. Sin embargo, normalmente, quedan pequeños huecos que no se han cubierto en los distintos escaneados o que se han eliminado por presentar errores topológicos, y que si no son de gran tamaño se pueden cubrir para conseguir una pieza completamente cerrada y sólida, sin presentar cambios significativos en su morfología.

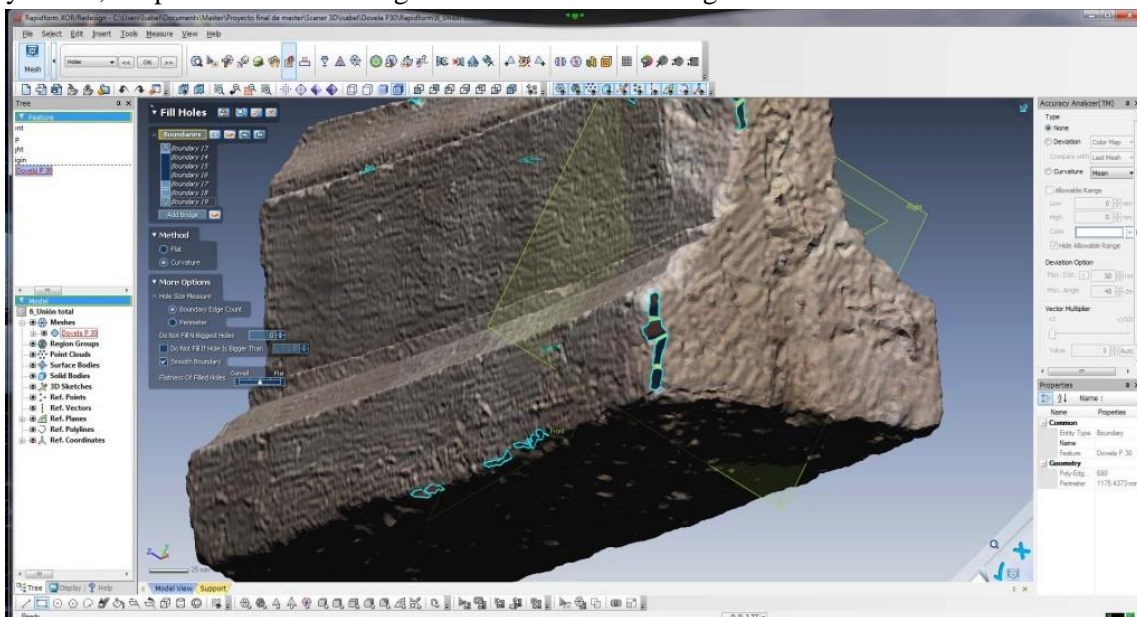


Figura 5.25. En esta imagen se ven los huecos que han quedado en el modelo después de la fusión de las celdas en una sola.

Fase 9: Secciones

Llegado a este punto, ya se tiene una figura perfectamente completa, un objeto totalmente definido. Con esta última fase realizada, en muchos casos se puede considerar acabado el trabajo de edición. Sin embargo, en el caso que se está estudiando es conveniente realizar una serie de secciones que son interesantes de estudiar y que después es posible analizar individualmente.

Una vez se tienen las secciones hechas, éstas se pueden exportar para su análisis métrico o su estudio individual. Un formato conveniente para la exportación es *.iges.

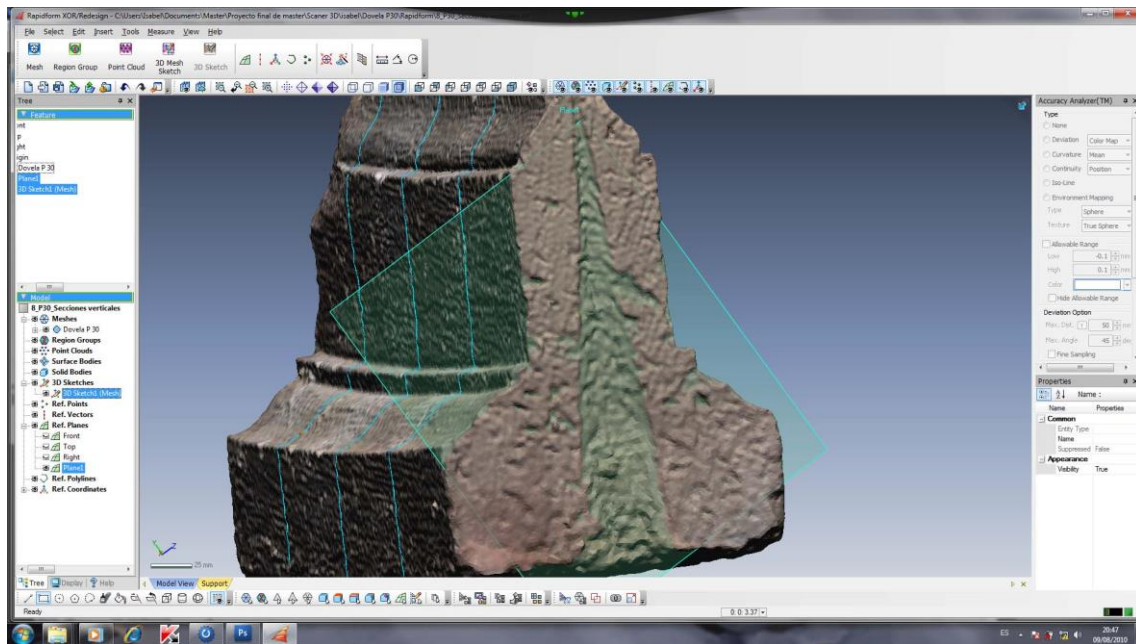
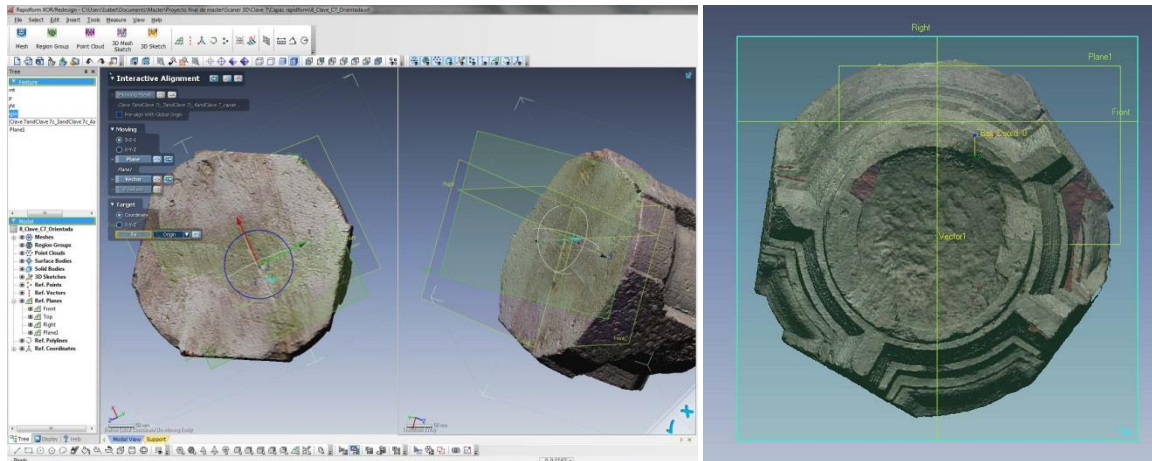


Figura 5.26. En esta imagen se puede observar el plano realizado y como se ha utilizado para hacer una serie de secciones verticales.

Fase 10: Orientación de la pieza

Esta fase, aunque trabajando en un programa de edición puede no parecer muy interesante, pasa a serlo cuando la figura o partes de ella son exportadas a otros como *Rhinoceros* o *Autocad*, donde la elección de las vistas es primordial.



Figuras 5.27 y 5.28. A la izquierda, imagen del proceso de orientación. A la derecha, la clave después de haber seguido el proceso de orientación.

Fase 11: Secciones horizontales para realizar la planta.

Con la clave orientada, se utiliza un plano que sea paralelo a la planta (*Top*) para hacer un conjunto de secciones que permitan una total definición de la planta cuando estas secciones se pasen a 2D.

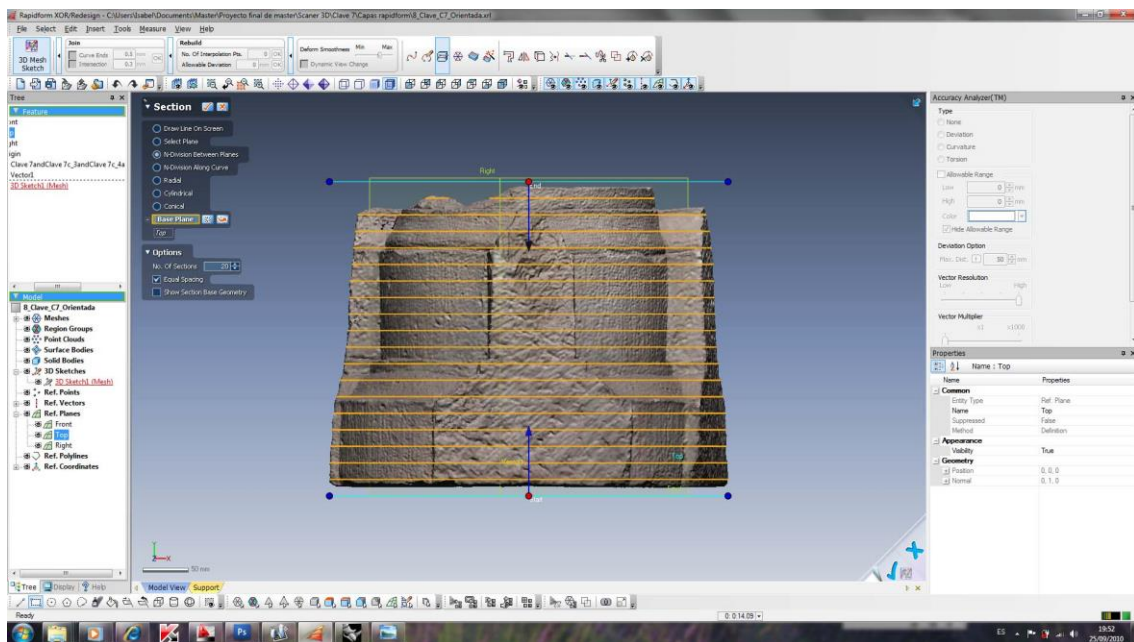
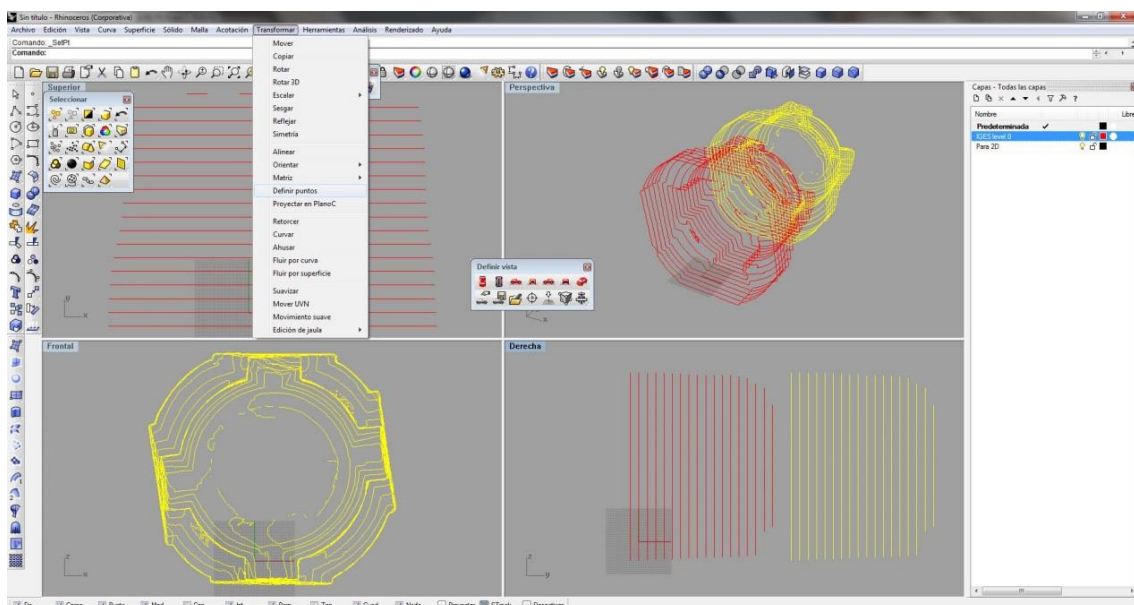
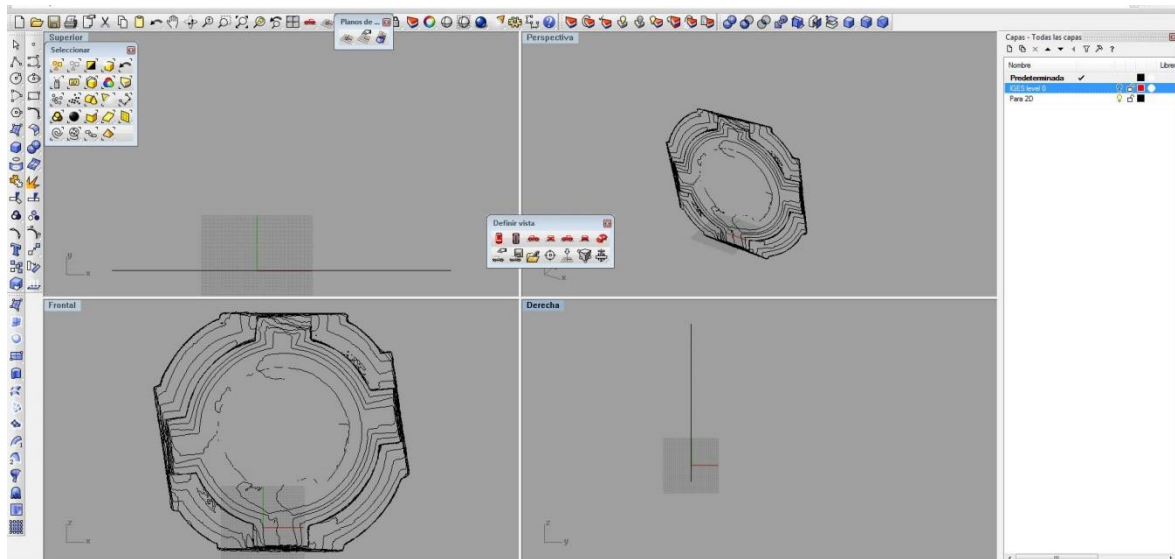


Figura 5.29. Imagen en la que se puede observar el seccionado de la clave.

A continuación, este conjunto de secciones se exporta a un programa adecuado, por ejemplo *Rhinoceros*, que permita su elaboración para convertirlo en un modelo en 2D (paralelo al plano *Top*) para obtener la planta que luego formará una de las vistas de la fichas que se van a crear.





Figuras 5.30 y 5.31. En la imagen inferior se puede observar cómo se queda la figura tras la transformación a 2D. En la superior se mostraba el proceso.

Fase 12: Reducción de polígonos para utilizar los modelos digitales en programas de animación 3D.

Los escaneados producen archivos demasiado pesados que los programas normales de animación 3D tienen problemas para gestionar, por eso, si se quiere trabajar en un programa de este tipo, será necesario primero reducir el número de polígonos del modelo. Para ello, se realiza un proceso llamado “Decimation”, que permite la reducción del número de polígonos manteniendo la geometría dentro de un límite conocido. En general, el número de polígonos, recomendable para los programas de animación, es entre 500000 y 800000.

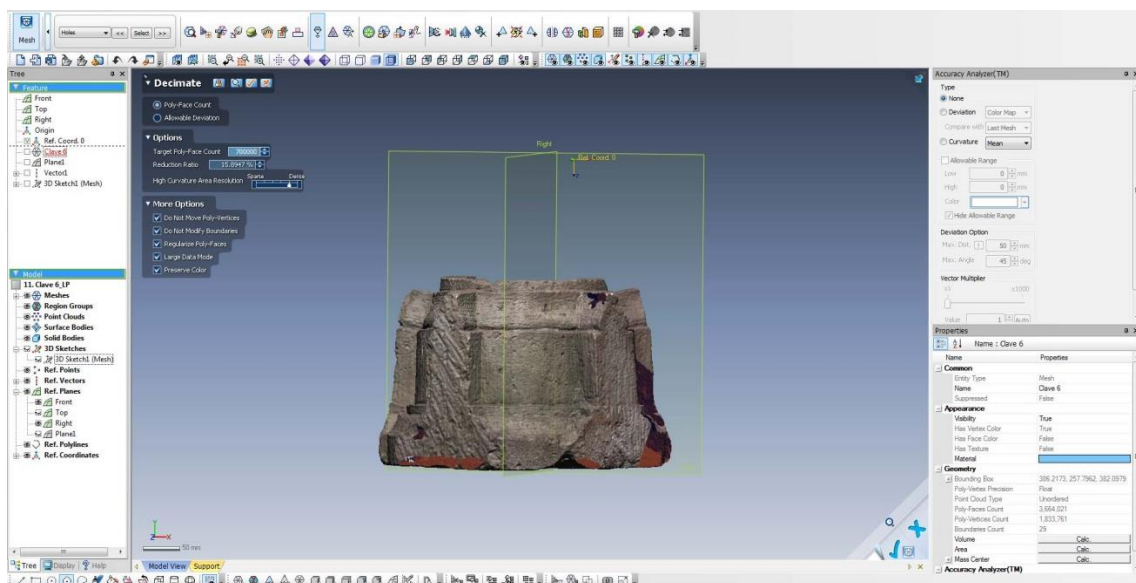
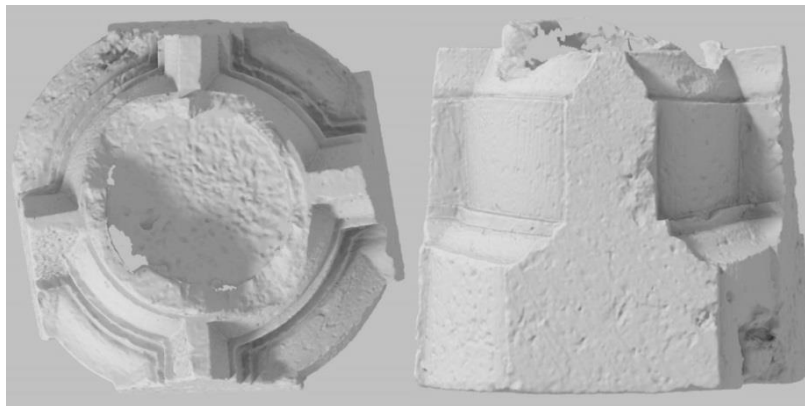


Figura 5.32. Imagen de la clave en el proceso de reducción de polígonos.

Fase 13: *Render* en un programa de animación 3D

Para realizar una visualización fotorealista del modelo (*render*), se elige la vista que se desea y luego se deben de ir cambiando una serie de parámetros como la situación de la cámara, el color del material, la intensidad de la luz... y así se crea el *render*.



Figuras 5.33 y 5.34. *Renders* de la clave 2

Fase 14: Obtención del eje de las claves en *Rhinoceros*

Para sacar el eje central de las claves, se escogen algunas secciones horizontales, de las que se vean más correctas, ya que las claves presentan deformaciones diversas. A continuación, se marcan puntos incluidos en estas secciones (figura 5.35 y 5.36). Utilizando estos puntos se realizan círculos idealizados, que serán una aproximación de los círculos originales que definen las secciones (figura 5.37). Uniendo el centro de los círculos idealizados se obtiene el eje central (figura 5.38).

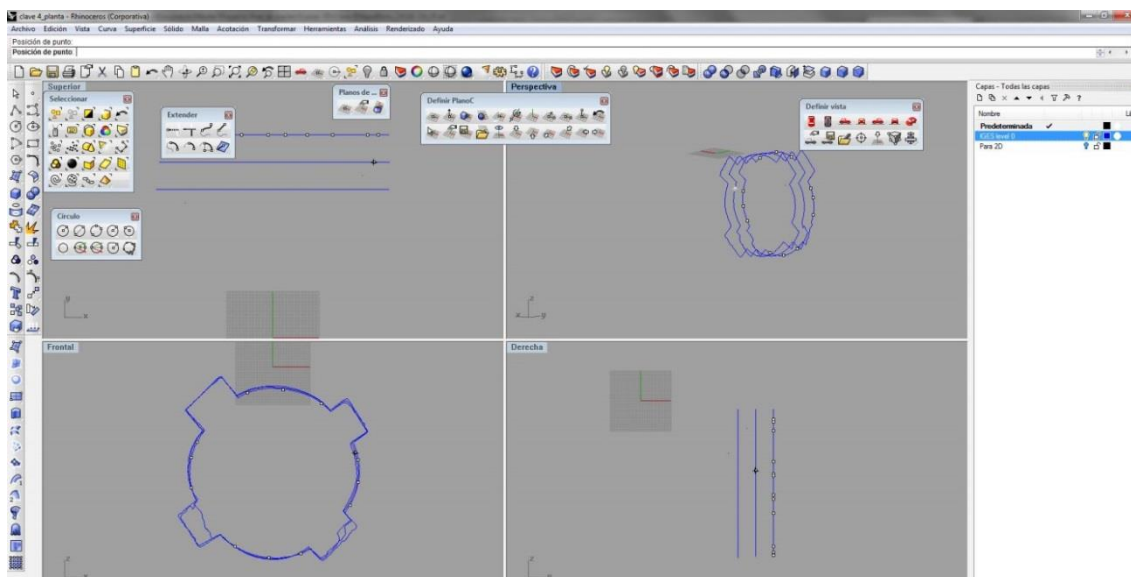
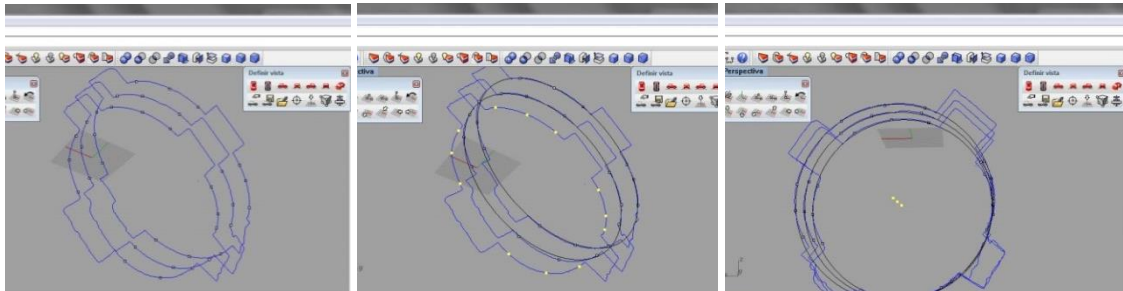
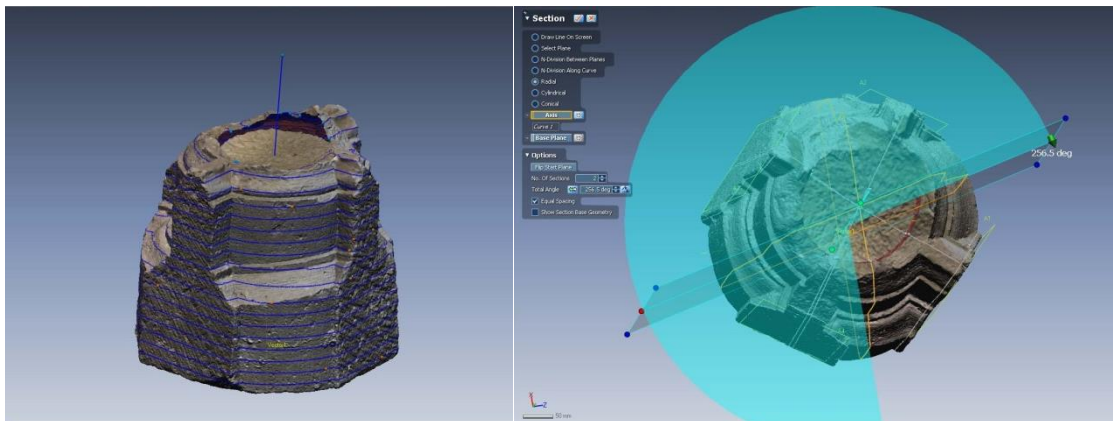


Figura 5.35. Imagen del proceso para encontrar el eje vertical de cada una de las claves.



Figuras 5.36, 5.37 y 5.38. Imágenes del proceso para encontrar el eje vertical de cada una de las claves.

Este eje será útil para obtener las secciones verticales, que se utilizan para obtener los ángulos de inclinación, de las caras donde inciden los nervios, con respecto a la base.



Figuras 5.39 y 5.40. Exportación del eje para obtener las secciones.

Escáner HD ScanStation diferencias:

La nube de puntos obtenida con este escáner, se exporta al programa “Cyclone” para su gestión (se usa este programa por ser el recomendado y suministrado por la marca del escáner, Leica). En él, se alinean los escaneados y cuando se tienen todas las nubes de puntos en el mismo sistema de coordenadas se exporta al programa de edición.

En el programa de edición (por ejemplo, *Inus Technology Rapidform XOR3* o *Geomagic Studio 10*) se realiza una fase previa no realizada en el caso del escáner a triangulación. Ésta consiste en algunos ajustes de las nubes, que permiten, a continuación, generar una *mesh* de mayor calidad. Dichos ajustes son: la eliminación de los puntos dispersos, la eliminación de los puntos que se han separado demasiado del plano y la suavización de los puntos (para que los puntos se conviertan en una malla más regular).

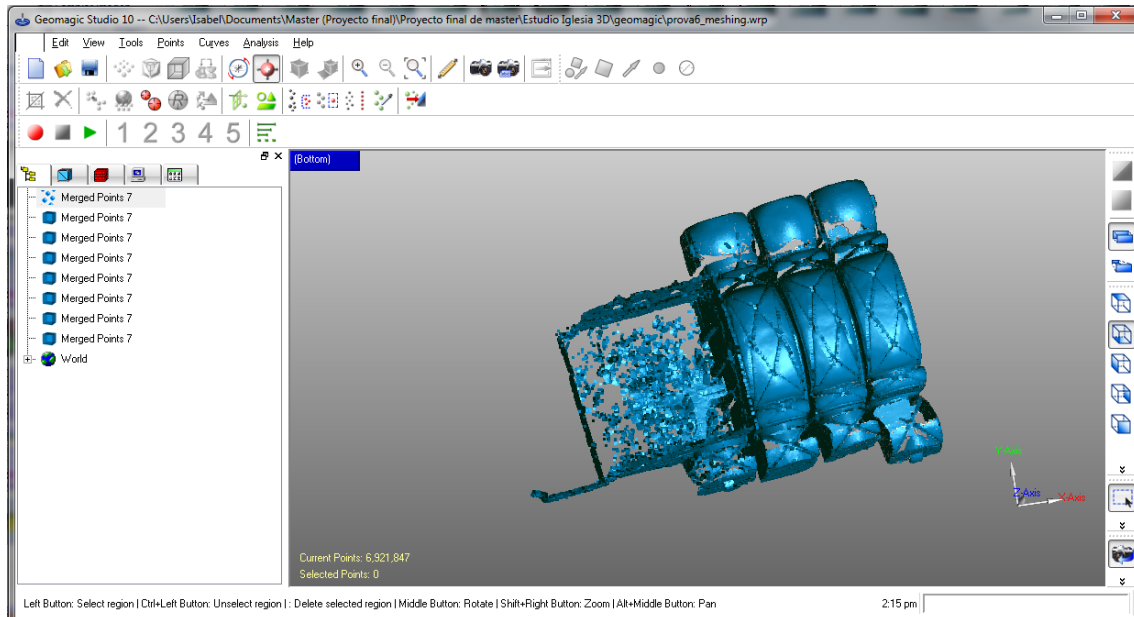


Figura 5.41. Imagen de la conversión de la nube de puntos a malla poligonal.

Efectuada esta fase, se realiza la fusión de las nubes en una única, para, posteriormente, convertir dicha nube en una superficie, o *mesh*. Debe comentarse que realmente este orden puede ser invertido, realizando, primero, la conversión en *mesh* y, en una segunda fase, fusionar las celdas, como en el caso de las capturas obtenidas con el escáner a triangulación. Existe, en realidad, también la opción de efectuar en una misma fase y con un solo comando las dos acciones (conversión en malla y fusión de las diferentes nubes). Estas opciones quedan a elección del usuario.

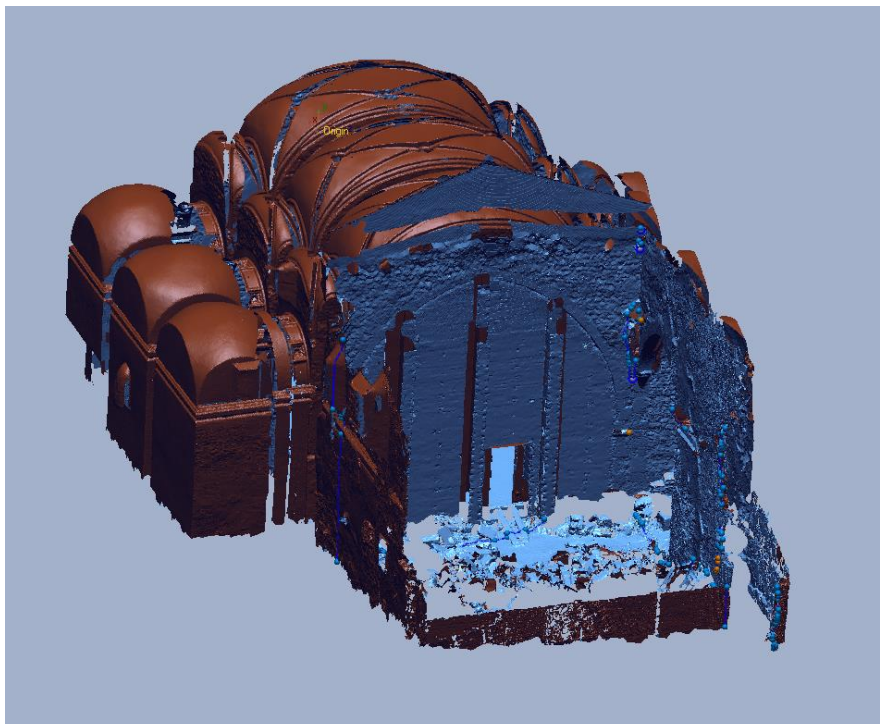


Figura 5.42. Imagen de la *mesh* resultante después de las fases de conversión y fusión.

Terminadas estas fases, se pueden hacer cualquiera de las fases que se han realizado con las tomas del otro escáner (las del *NextEngine*).

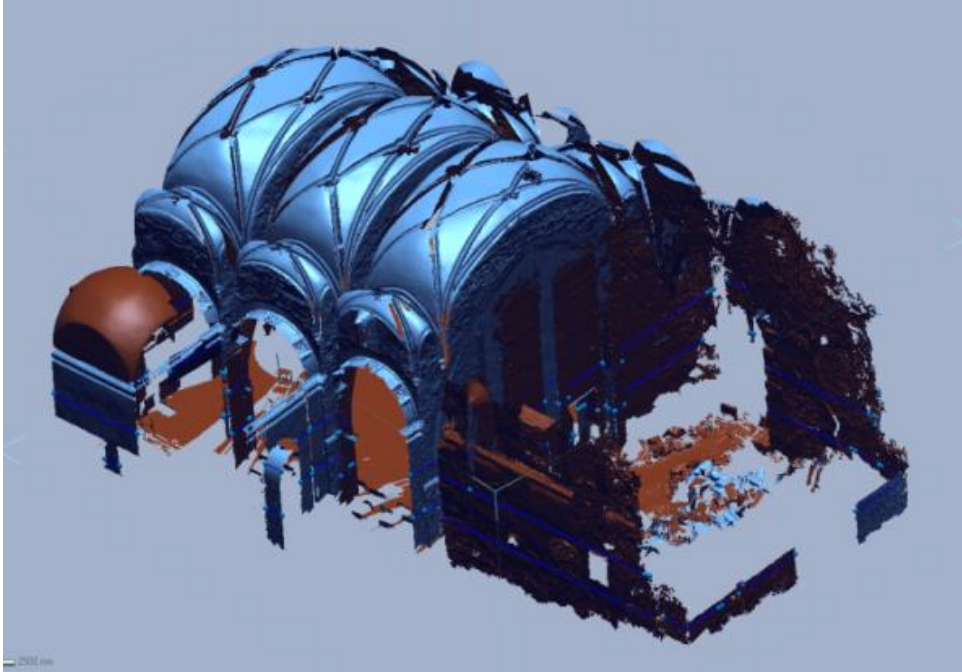


Figura 5.43. Imagen de las secciones horizontales para obtener la planta de la iglesia.

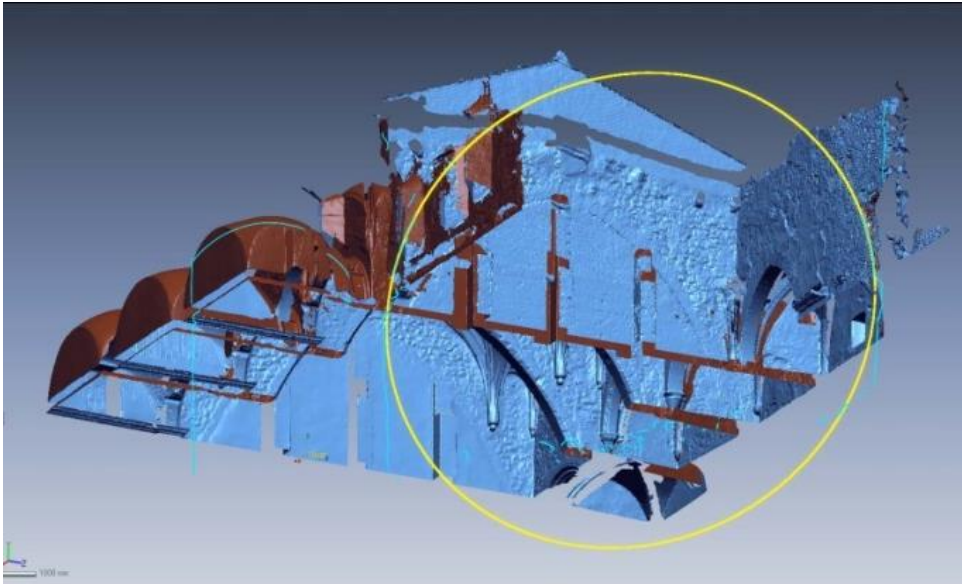


Figura 5.44. Imagen del modelo en el momento del estudio de los radios de la bóveda a partir de los restos encontrados en los muros.

D. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

A partir de los croquis, tomados in situ, se han podido realizar análisis que han arrojado una serie de conclusiones. Una de ellas ratifica algunas hipótesis de Francisco Grande e Ignacio Gil, que confirman que hay tres tipos diferentes de dovelas, y unas claves que permiten definir la planta de la bóveda.

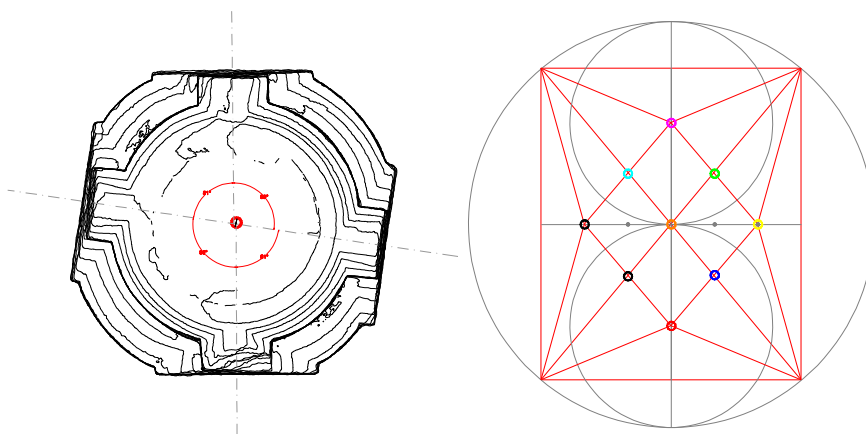
De los tres tipos de dovelas, dos presentan un modelado o sección transversal similar, cuya única variación reside en las dimensiones, y la otra tiene una sección totalmente diferente a las anteriores. A las que tienen una forma similar se las ha nombrado como P y G, siendo P, las de menor tamaño y G la de mayor. Las últimas han sido nombradas como L. Siguiendo este estudio de dimensiones, y por lo tanto esta clasificación, se ha realizado un recuento, que nos hace afirmar que hay 110 dovelas “P”, 42 dovelas “G” y 60 dovelas “L”.

Por otra parte, se puede afirmar que las piezas “L”, son aquellas que en su momento formaban los arcos formeros de la bóveda, ya que observando los restos de ésta adheridos al muro, coinciden en forma y tamaño. También comprobando las medidas de las piezas G y P, su correspondencia con las claves, y la hipótesis formada sobre la planta de ésta, se puede deducir que las piezas “G” formaban los dos arcos cruceros, y las piezas “P” formaban el resto de los arcos, tanto los terceletes como las ligaduras.



Figura 5.45. En esta imagen se pueden observar los restos del arco formero que quedan adheridos al muro

Como se comentaba, con éstas medidas también se han podido estudiar los ángulos de incidencia de las claves, y las dimensiones del presbiterio, por lo que como se verá en el siguiente apartado, se ha podido deducir las trazas de la bóveda que luego darán a la construcción virtual de la bóveda.



Figuras 5.46 y 5.47. A la izquierda Clave 7, con las medidas de los ángulos de incidencia. A la derecha hipótesis de la planta de la bóveda de la capilla mayor o presbiterio.

Estudio de trazas:

Para realizar el estudio de las trazas se ha partido de diferentes datos. Por un lado se tienen siete claves, de las supuestamente nueve que debería haber, con toda la información que éstas aportan, y por otro lado, se tienen el tipo de nervios y la forma que tienen las claves en donde incidirían estos.

Partiendo de esta información se va a proceder a plantear las trazas compatibles, las condiciones físico geométricas, las posibilidades de las hipótesis ya realizadas... siempre comparándolo todo con la tradición, con los tratados que explican cómo se trabajaba entonces y con el trazado de las capillas de la misma época y tipología.

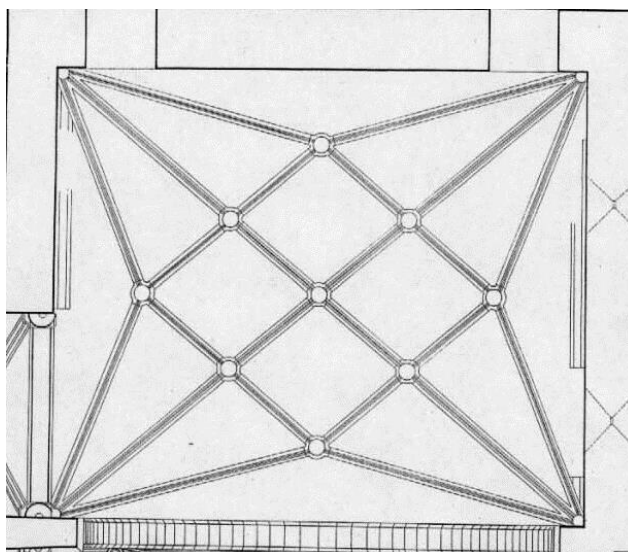


Figura 5.48. Hipótesis de la planta trazada por el arquitecto Francisco Grande e Ignacio Gil Mascarell, restaurador de parte de esta iglesia.¹⁴

Fichas:

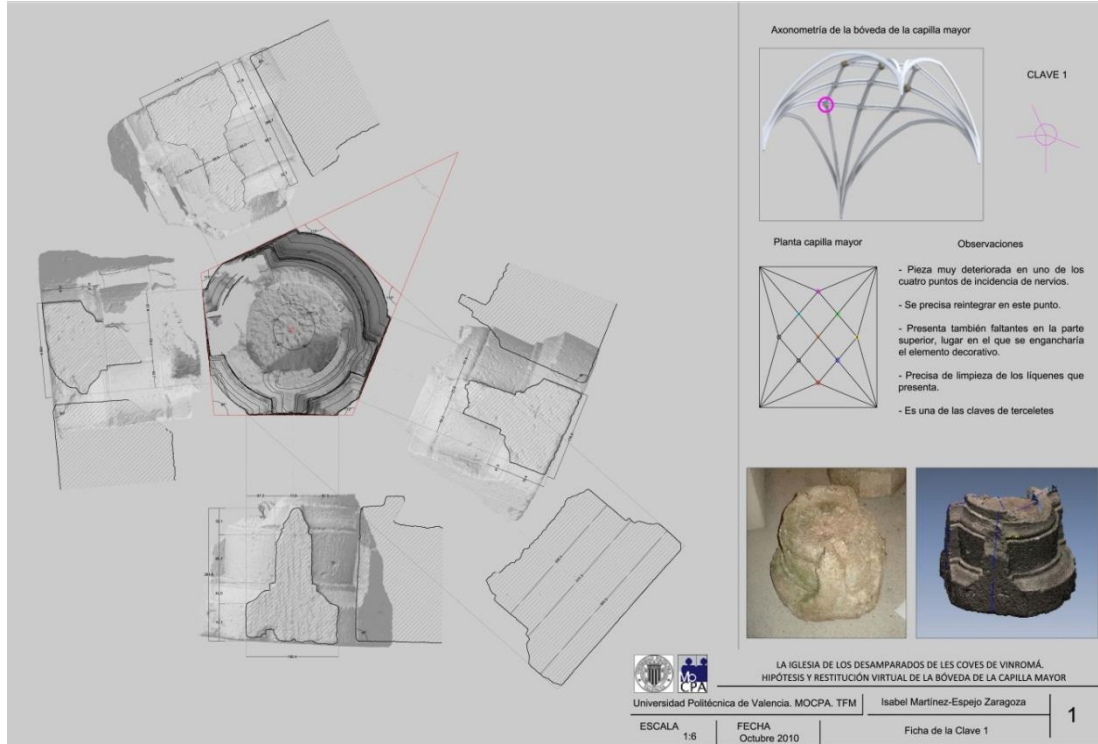
Para la realización de las fichas se ha buscado introducir de forma esquemática y clara la información que aporta cada una de las piezas. Por ello, se ha dividido ésta de tal forma que en una parte aparezcan las vistas (planta, alzado/s y sección), en otra una axonometría de la pieza, un dibujo general que contenga la planta y la sección general de la bóveda y por último, algunas anotaciones si son necesarias de la pieza.

La parte de planta, alzado/s y sección se ha ejecutado sacando esta información directamente de la toma de datos del escáner láser. Como se ha explicado anteriormente, se han marcado planos que contuviesen cada uno de los alzados (en el caso de las claves), la planta y la sección. Utilizando visualizaciones foto-realistas (*renders*) que permitiesen dar riqueza a las fichas, mostrando imágenes en 3D de la pieza original.

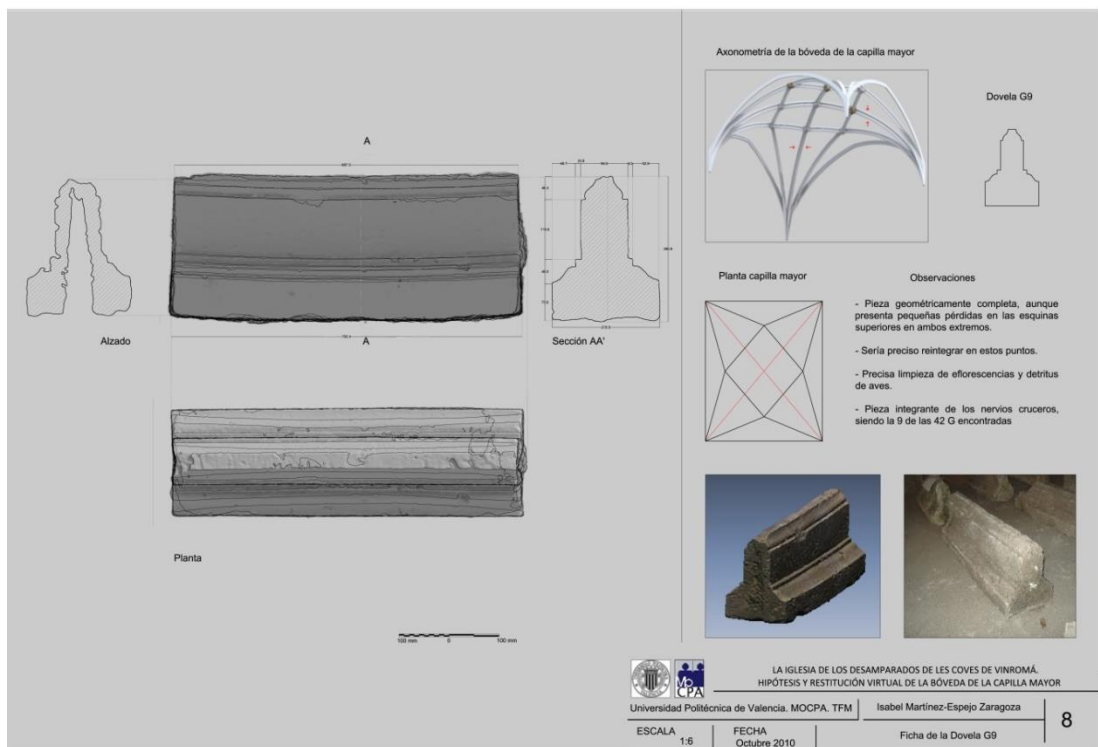
La axonometría se ha obtenido captando una imagen directamente del *Rapidform*, ya que en este se muestra la pieza tal y como es. La planta y sección general se han diseñado a partir de la hipótesis que al final se ha considerado como cierta, marcando la posición de la pieza que se considera como la correcta.

¹⁴ Imagen proporcionada por los arquitectos D. Francisco Grande Grande e Ignacio Gil Mascarell

Por último, se ha considerado interesante introducir una serie de anotaciones que expliquen los pequeños detalles que tiene esa pieza que no tienen las demás.



Figuras 5.49 y 5.50. En la imagen de arriba se puede observar una de las fichas de las claves, en la de abajo una de las fichas de las dovelas.



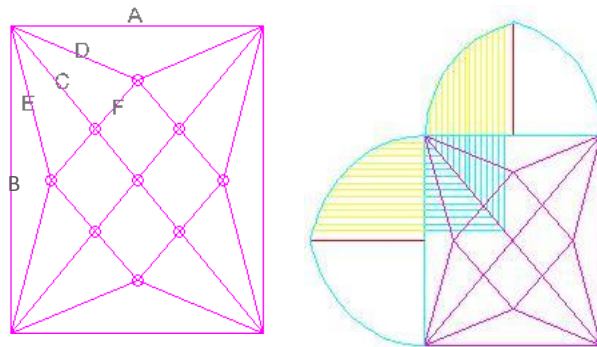
E. ANÁLISIS

HIPÓTESIS DE LA PLANTA DE LA BÓVEDA DE FRANCISCO GRANDE GRANDE E IGNACIO GIL MASCARELL

La hipótesis del trazado de la planta formulada por de Francisco Grande e Ignacio Gil Mascarell surge a partir del estudio de las claves que encontraron cuando realizaron la restauración de la iglesia, y de los arranques de la bóveda que todavía quedan en los muros que la sustentaban. Este será nuestro dibujo de partida, revisado a la luz de los métodos avanzados de documentación utilizados en este estudio y de las conclusiones de algunas tesis más recientes en investigaciones especializadas sobre bóvedas de este tipo, como la de Juan Carlos Navarro Fajardo (Navarro Fajardo, Juan C., 2006).

Así la planta y la sección facilitadas por Francisco Grande, se considerarán como el primer acercamiento a la bóveda que es objeto de estudio. Partiremos de dos datos dados por él:

- Que los cruceros son arcos de medio punto,
- Que la altura de los arcos A y B es la misma, como se explicará a continuación.



Figuras 5.51 y 5.52. Imágenes del trazado de la planta según la hipótesis de Francisco Grande e Ignacio Gil.

En primer lugar, se ha dibujado el círculo que circunscribe la planta de la bóveda. A continuación, se ha utilizado la altura de los arcos formeros, tomándola directamente del muro, ya que quedan todavía empotradas algunas de las dovelas que forman estos arcos, entre ellas las dos que marcan la clave. Utilizando esta altura, se ha podido comprobar que el arco A, cumple la regla de arco apuntado con centro en $2/3$ de su proyección. Con esta altura se ha obtenido también el arco B. Ya que sin más datos de este arco formero que su altura en la clave y su luz, se ha trazado el resto del nervio basándose en una correspondencia de alturas, utilizando la extrusión del arco A con el B en su cruce.

Observando la sección trazada por Grande y Gil (imagen al final de la explicación), se puede comprobar que la altura de las claves del anillo de nervios (el rombo), es igual en todas ellas. Partiendo de esa cota, de la altura de la clave polar y el arranque del arco C, se obtienen las trazas de éste.

Para obtener el arco D, se utilizará la planta y la sección, poniéndolas en la situación correcta para que tenga concordancia. Se unirá la clave 3 dibujada en planta, con la clave 3 de la sección cortando de este modo al arco D (realmente a su simétrico), en la planta y en la sección. Se utilizará la altura de la sección para tener un punto, la altura del rombo antes explicada será otro punto y el tercer punto será el arranque.

Se conseguirán las trazas del arco E, mediante un procedimiento parecido al anterior, se elegirá el punto medio del arco en planta y se proyectará a la sección para sacar la altura. De este modo, se obtienen los tres puntos necesarios.

Por último el arco F, no sería un arco, sino una recta ya que como se ha comentado, y se puede observar en la sección, la altura de las claves en el rombo es la misma.

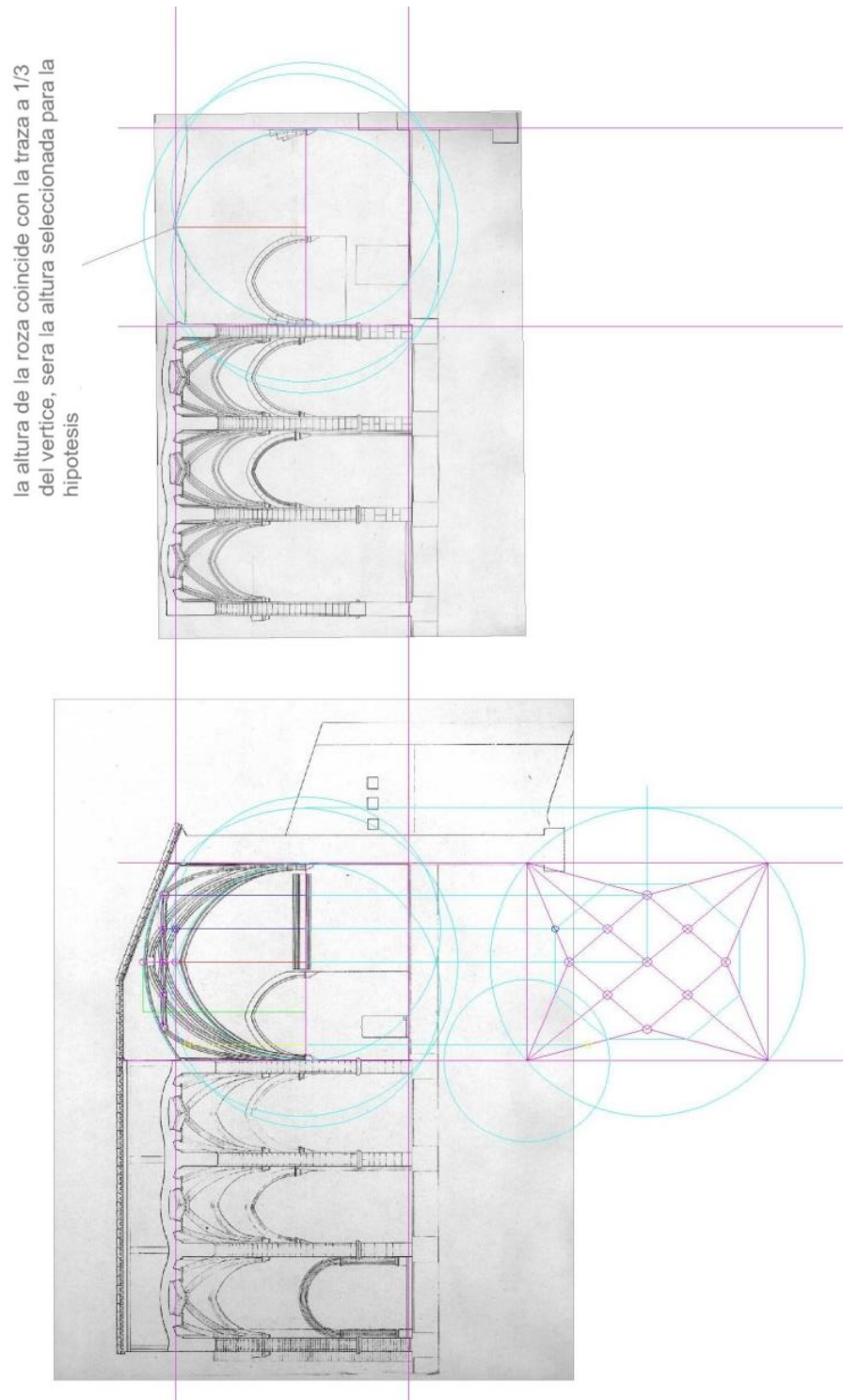


Figura 5.53. En esta imagen se pueden observar todas las alturas obtenidas a partir de la planta y la sección, además de la comprobación de la altura del formero.

TRAZAS DE LA BÓVEDA DE ESTRELLA (JC. NAVARRO FAJARDO)

El profesor Navarro Fajardo, sostiene algunos de los principios fundamentales del trazado de la bóveda estrellada, según los expertos medievales, basándose en su geometría. En primer lugar, y teniendo en cuenta la fecha de su trazado, ha considerado casi con total seguridad que se partiría de la planta inscrita en un círculo. Explica que para el trazado de los terceletes se utilizaban normalmente dos opciones. Una que el tercelete que sale de una esquina, la línea que lo describe, concluya en la pared frontal del rectángulo, en su punto medio. La otra sería similar pero en vez de ser en el punto medio del rectángulo sería en el del círculo.

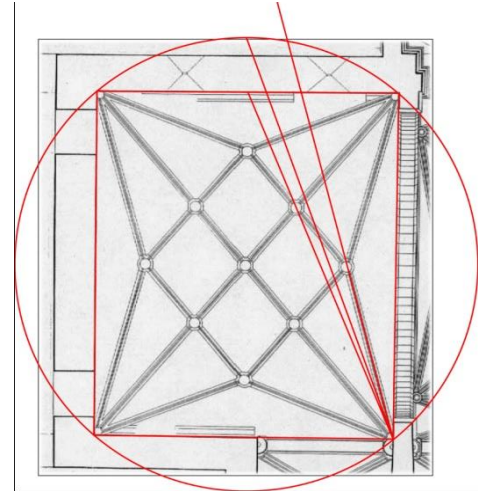
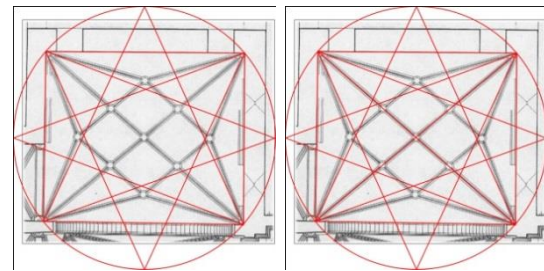
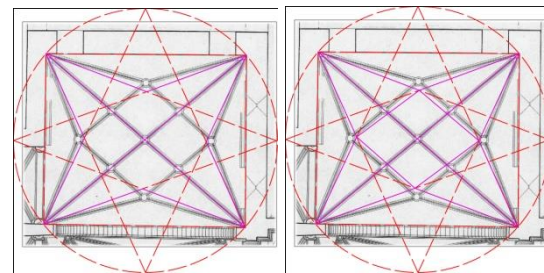


Figura 5.54. Trazas para la búsqueda de los terceletes¹⁵

Comprobando la planta realizada por Grande y Gil, parecía que ninguna de las dos alternativas encajaba, pero quedaba claro que la del rectángulo era la que más lejos quedaba. Se optó por continuar con la hipótesis del círculo a ver a qué punto se llegaba. De modo que se trazaron todos los terceletes con ésta hipótesis.



Tras esto se pasa a dibujar los arcos cruceros, que continuando con la información sacada de los tratados medievales y coincidiendo con la hipótesis de Francisco Grande, se suponen de medio punto. A continuación, se trazan las ligaduras uniendo los encuentros entre terceletes.



Figuras 5.55, 5.56, 5.57 y 5.58. Pasos para el trazado de la planta siguiendo los tratados medievales.

Con el trazado de las ligaduras queda la planta completamente trazada, como se puede observar en la imagen de la derecha. Teniendo la planta delineada, el siguiente paso sería comprobar que sus ángulos coinciden. Pero antes se va a tantear el trazado de los arcos que constituyen la bóveda, suponiendo, según la hipótesis de Navarro Fajardo, que la bóveda está inscrita en una esfera.

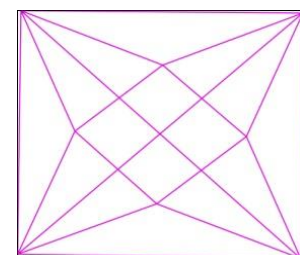


Figura 5.59. Planta final

¹⁵ Imagen trazada a partir de los dibujos realizados a mano por JC. Navarro para la explicación

En primer lugar, se dibujan los arcos crucero que son arcos de medio punto, por lo que simplemente al inscribir la planta en un círculo, ya quedan trazados, no obstante en la imagen siguiente (figura 5.60) se puede observar el arco abatido para mayor claridad. Lo siguiente sería trazar los arcos formeros (figura 5.60). Para el trazado de éstos, y comprobando además en la iglesia que se trata de arcos apuntados, se trazan con la regla del centro situado a dos tercios de la planta. El problema es que al no ser una planta cuadrada, si está inscrita en una esfera, los dos lados encontrados no podrán cumplir ambos esta regla. Así que como ya se comprobó en su momento, que era el lado menor del rectángulo el que cumplía con la regla, el otro se trazará cumpliendo con la altura del menor. El resto de los arcos se obtendrán igual que los arcos cruceros, abatiendo el punto intersección de la línea prolongación del arco con la circunferencia y el punto donde termina el arco en sí. De este modo se obtienen los arcos.

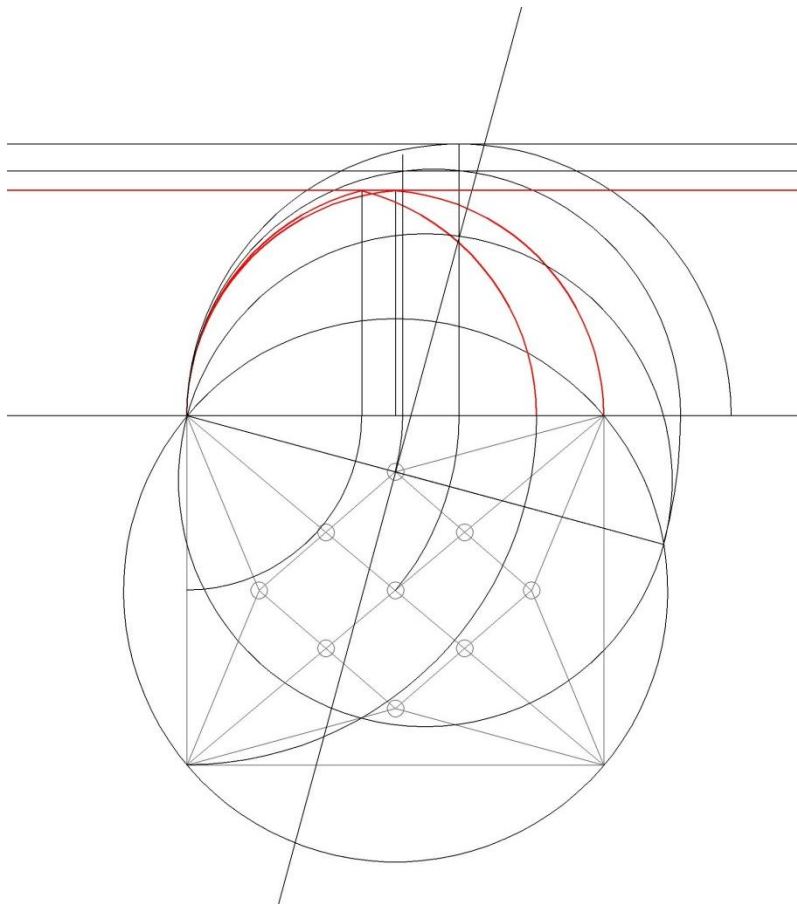


Figura 5.60. Trazado de los arcos formeros.

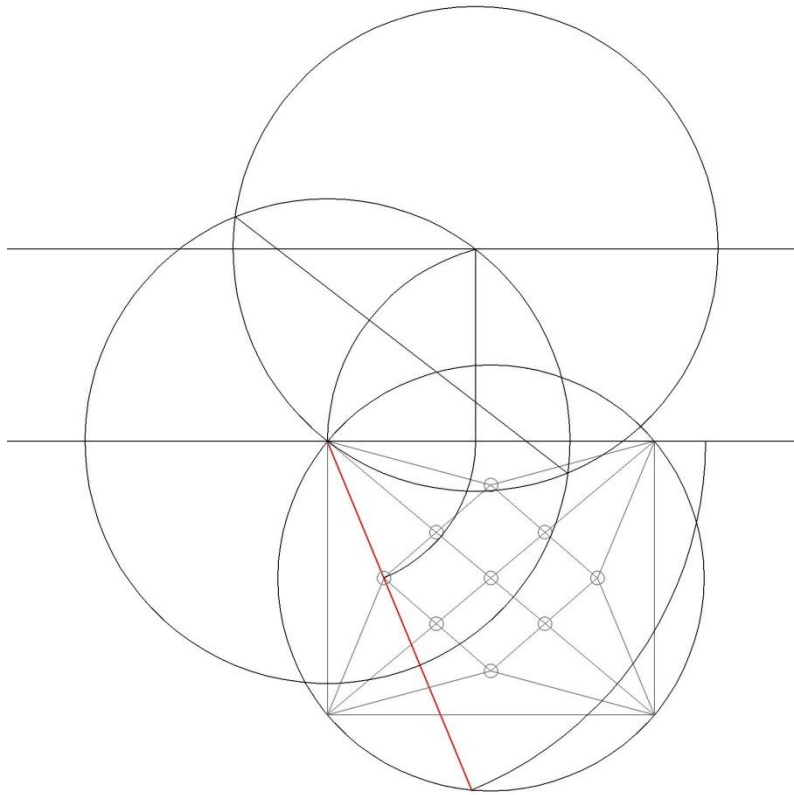


Figura 5.61. Primera hipótesis del trazado de los arcos de terceleté del lado menor de la planta rectangular.

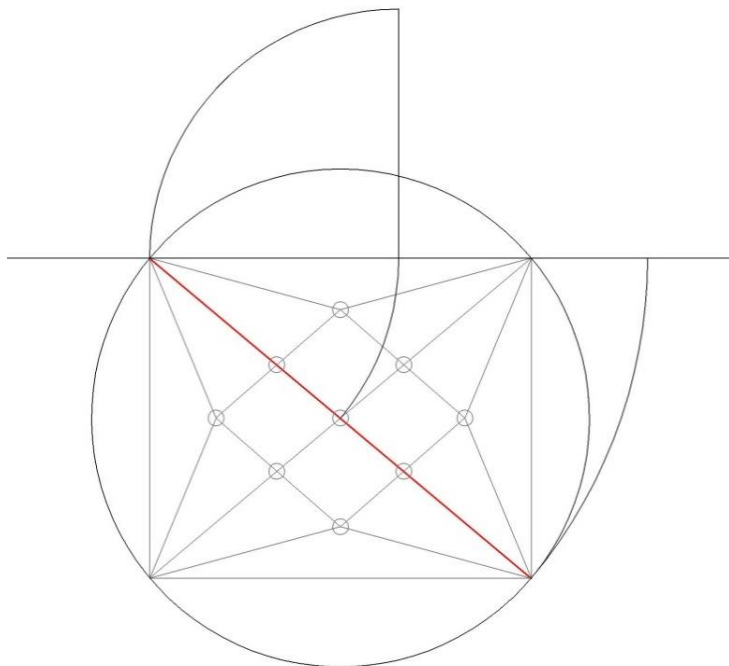


Figura 5.62. Trazado de los arcos crucero.

Se pueden observar que aparecen dos trazados diferentes para el mismo arco (figura 5.61 y 5.64). Resulta que podrían plantearse dos hipótesis diferentes, que la altura de las claves de terceletes sea la misma como ocurre con los arcos formeros o que simplemente sigan la esfera. La primera se trazaría según se muestra en la imagen superior (figura 5.61) y la segunda hipótesis se refleja en la imagen inferior (figura 5.64).

Figura 5.63. Trazado de los arcos de tercelete del lado mayor de la planta rectangular

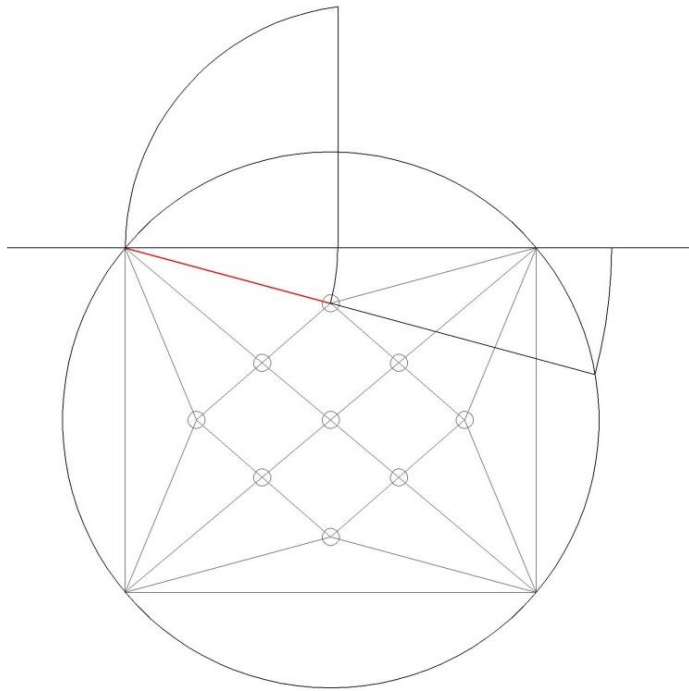
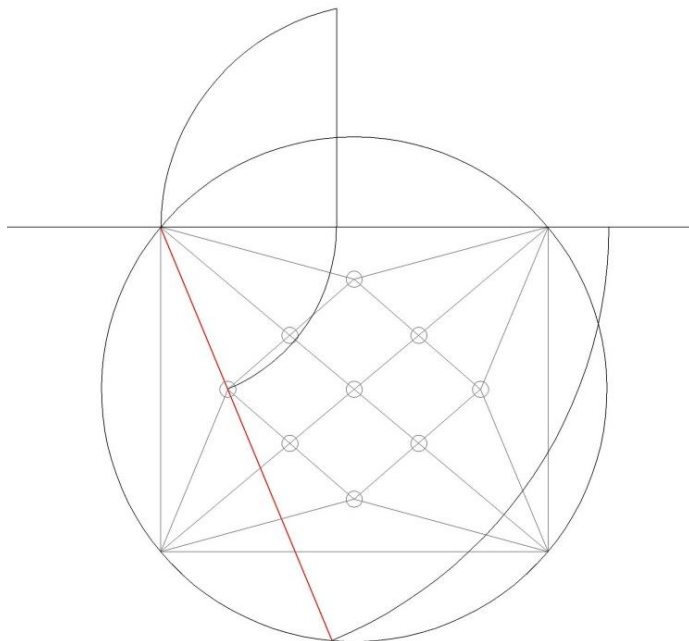


Figura 5.64. Segunda hipótesis del trazado de los arcos de tercelete del lado menor de la planta rectangular.



ANÁLISIS DE LA BÓVEDA

Con toda la información obtenida hasta ahora (trazas, planta, ángulos de incidencia en las claves encontradas, restos presentes en los muros...) se planteaban dos hipótesis, y de ellas surgirá una tercera que se convertirá en la definitiva. La primera sería, como comentaba Navarro Fajardo, que fuese un casquete de esfera. La otra era que fuese un rombo central esférico con riñones en definición. La tercera se explicará en la resolución.

Casquete de esfera:

Si se considera que la bóveda que cubría la capilla mayor de la iglesia de Los Desamparados es un casquete esférico debería cumplir varios requisitos. Uno, que en la zona de los arranques la plementería fuese curva hacia el exterior, quedando el nervio central (crucero) a la misma altura que los de terceletos o por detrás de éstos, o sea, más pegados a la esquina que forma el cruce de los dos muros que sostenían la bóveda. Por otra parte, debería cumplir que la altura de los arcos formeros no podría ser similar, ya que la esfera está inscrita en un rectángulo y no en un cuadrado, además de que dichos arcos deberían ser de medio punto. Por último, las claves debería presentar

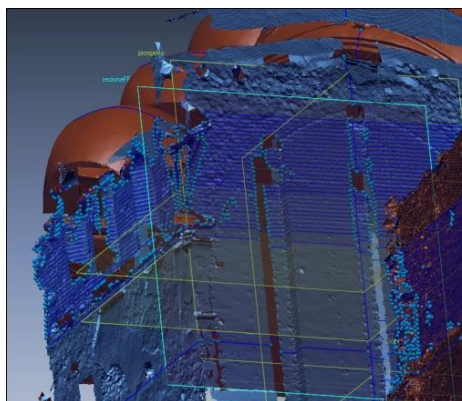


Figura 5.65. En esta imagen se puede observar los arranques escaneados, mostrándose más saliente el nervio central

en el lugar donde acometen los nervios, diferentes alturas en la incidencia del nervio o que éstas se situasen inclinadas. Basándose en estas afirmaciones, se puede decir que la bóveda que se está estudiando no es un casquete de esfera, ya que con los restos encontrados en los muros, se comprueba que la altura de los arcos formeros contiguos es similar o cercana. Además, el ángulo de incidencia de los nervios en la clave presenta la misma altura en todos ellos.

Rombo central esférico con riñones en definición:

Si este fuese el caso, la plementería no tendría que formar una curvatura hacia el exterior, podría ser hacia el interior, como en principio parece y que más tarde, con los escaneados, se ha confirmado. La altura de las claves de terceletos podría ser igual o diferente a la de las claves de los formeros, siendo por tanto el rombo central esférico y el resto superficies regladas que seguirían a los nervios. La condición que se mantendría, sería la de la variación de los ángulos y alturas de incidencia de los nervios en las claves. Con estas afirmaciones se ha decidido partir de esta hipótesis, porque parece cumplir con todos los condicionantes, cumple con la planta, los arcos cruceros se suponen de medio

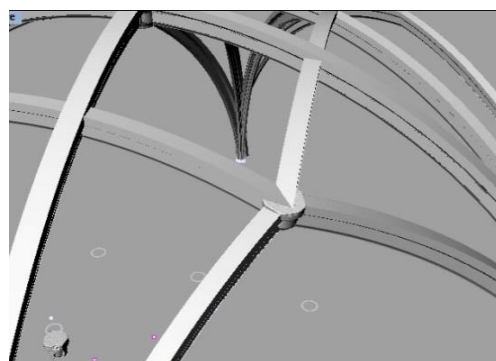


Figura 5.66. En esta imagen se puede observar como la clave de terceletos no encaja correctamente, ya que aunque dos nervios la acometen perfectamente, los otros dos no desembocan en los puntos

adecuados.

punto, y la altura de los arcos formeros, obtenida a través de los datos adquiridos con el escáner láser, es bastante cercana... El problema surge en la última comprobación, con el 3D montado, con todos los arcos dibujados, al introducir las claves escaneadas en 3D, los ángulos coinciden en horizontal, pero en vertical no, y si se inclinan las claves para seguir la dirección de incidencia de dos arcos, los otros dos es imposible hacerlos coincidir, siendo por tanto esta hipótesis también incorrecta. Ha de comentarse que sí hay una clave que queda bien encajada, la clave polar.

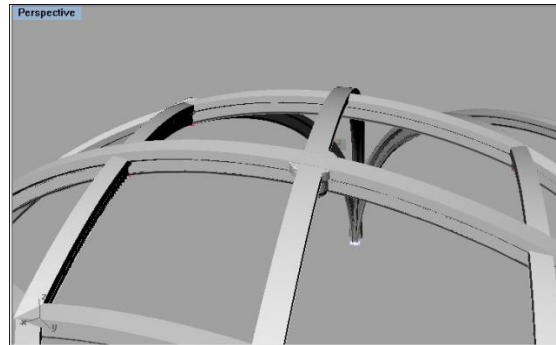


Figura 5.67. En esta imagen se puede observar como la clave polar queda perfectamente colocada

F. MODELOS OBTENIDOS (Solución geométrica a partir del análisis)¹⁶

Tras analizar en profundidad varias hipótesis, utilizando diferentes variables, se llega a la que se considera la hipótesis final. Para ello se han estudiado trazados en tratados de cantería (Vandelvira, Padre Tosca, Hernán Ruiz El Joven...), hipótesis hechas sobre esta bóveda y, por supuesto, la toma de datos realizada in situ, tanto con instrumentos tradicionales

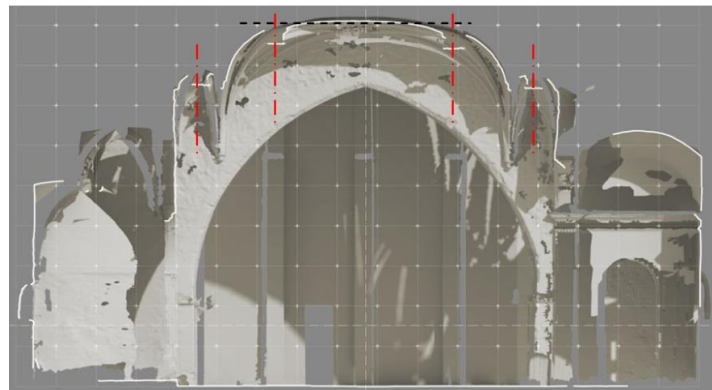


Figura 5.68. En esta imagen se puede observar los ejes verticales de las claves y la zona de la bóveda casi plana.

como con instrumentos avanzados. Así se obtienen datos como han sido los ángulos de las claves y con ello la planta, como se verá a continuación, la forma de algunos arcos, a partir del escaneado de los arranques, las dimensiones de la capilla mayor, de las dovelas, las claves... Para llegar a la solución final han sido precisos una serie de pasos.

¹⁶ Palacios Gonzalo, José C., 2005. "La geometría de la bóveda de crucería española del XVI". Conferencia leída en el III Seminario sobre bóvedas impartido dentro del Máster de Restauración de la Universidad Politécnica de Valencia.

El primer paso, aunque realmente se hacen muchas cosas a la vez, fue estudiar los trazados según los tratados, las dimensiones de la bóveda, la hipótesis proporcionada por Grande y Gil y, por supuesto, la pauta que presentaba la iglesia en el resto de las capillas y en la nave central. Viendo la iglesia escaneada, se observan detalles que en un principio, no habrían sido observables, como son: la falta de simetría de las bóvedas, que la zona central de la bóveda que hay entre terceletes es casi plana, que los ejes de las claves son verticales... Todo esto se puede observar al poder estudiar directamente el 3D obtenido del escaneado.

El segundo paso sería sacar la planta. Para ello se ha escogido la sección de la iglesia a la altura de los arranques, para obtener la planta exacta en la que se montaría la bóveda.

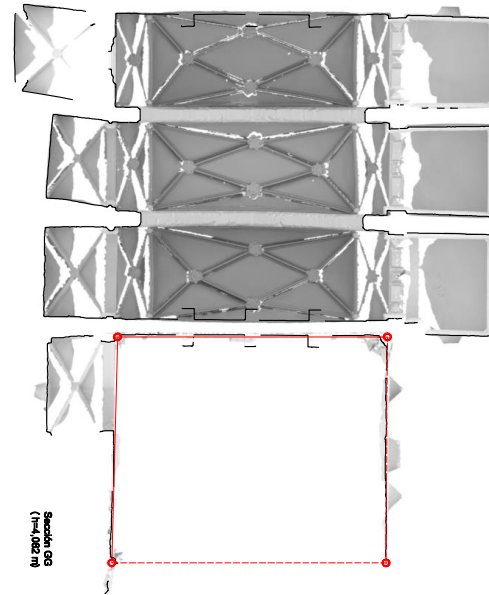


Figura 5.69. En esta imagen se puede ver la iglesia seccionada hacia arriba a una altura de 4,082 metros, que es la altura donde comienzan las jarjas.

En esta planta se han dibujado los arranques para delinear las trazas representando los arcos por su intradós, ya que era la forma de diseñar que utilizaban los canteros medievales.

Debe tenerse en cuenta, que esta investigación es empírica y no teórica, por lo que prepondera el uso de las claves conservadas para llegar a la planta definitiva. Por ello, aunque se estudiaron las soluciones difundidas en los tratados, primó la condición elemental de que los ángulos de las claves coincidieran con los ángulos de la planta.

Los pasos, según nuestra hipótesis, para llegar al trazado real de la planta son los siguientes:

- A. Determinación de la situación de la clave polar (central), en la intersección de las dos diagonales.
- B. Trazado de dos círculos inscritos en el diámetro de la circunferencia circunscrita paralelo al lado mayor, tangentes entre sí en la clave polar.
- C. Al unir las esquinas con el centro de estos círculos se obtienen las claves de terceletes de los lados menores.
- D. A continuación, se divide la mitad del semieje paralelo al lado menor del rectángulo en tres partes iguales. Así a un tercio de la planta, se obtienen las claves de terceletes de los lados mayores.
- E. Uniendo estas claves a las esquinas se trazan los nervios terceletes de los lados mayores.

F. Por último, se unen las claves de terceletes formando un rombo, donde interceptan con los nervios diagonales, surgen las últimas claves, que son claves decorativas.

G. De este modo se obtiene el trazado completo de la planta, y los ángulos de incidencia de los nervios en las claves coincidentes con los que presentan las claves conservadas, pudiéndose disponer cada una de ellas en la que se supone su situación correcta.

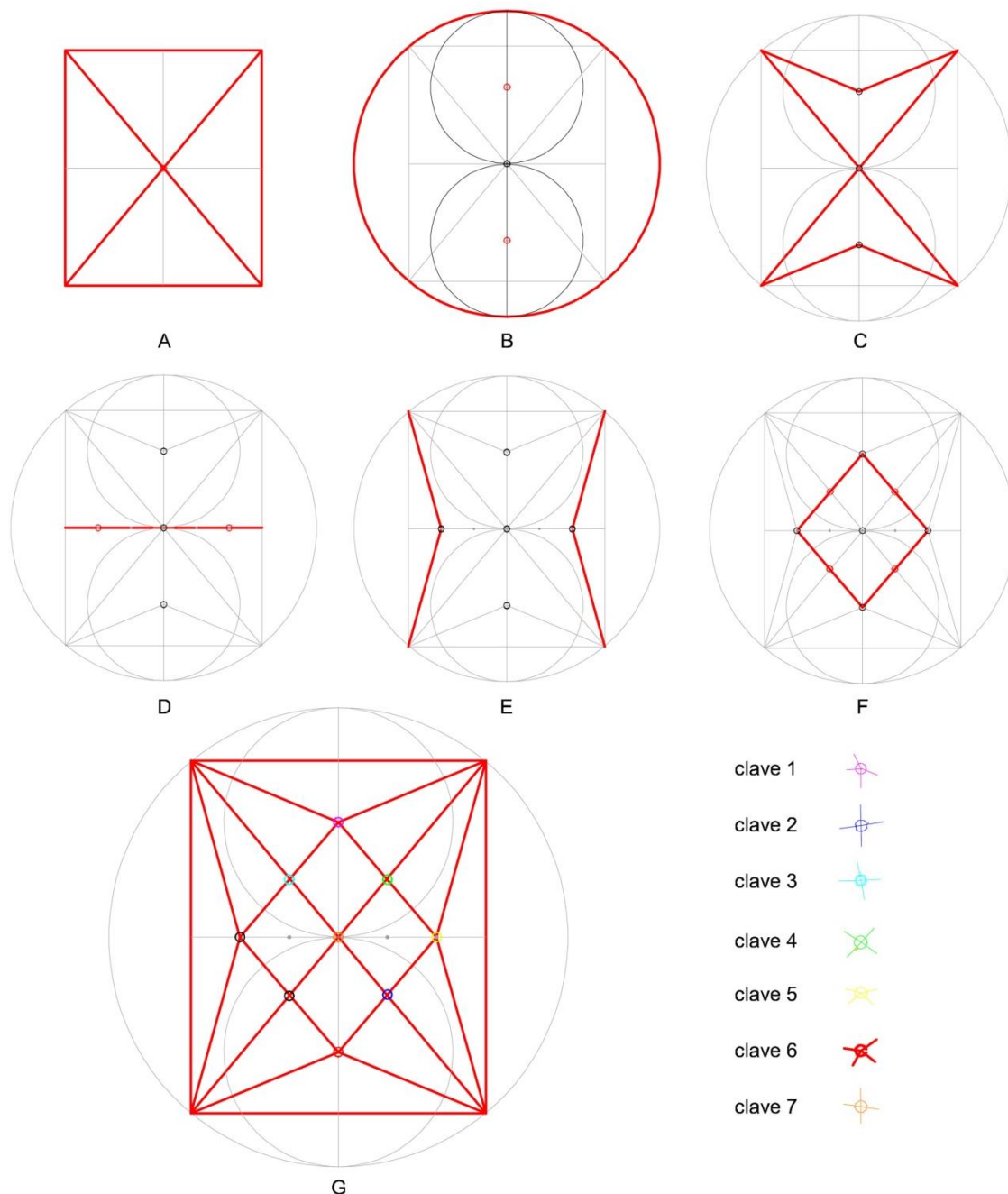
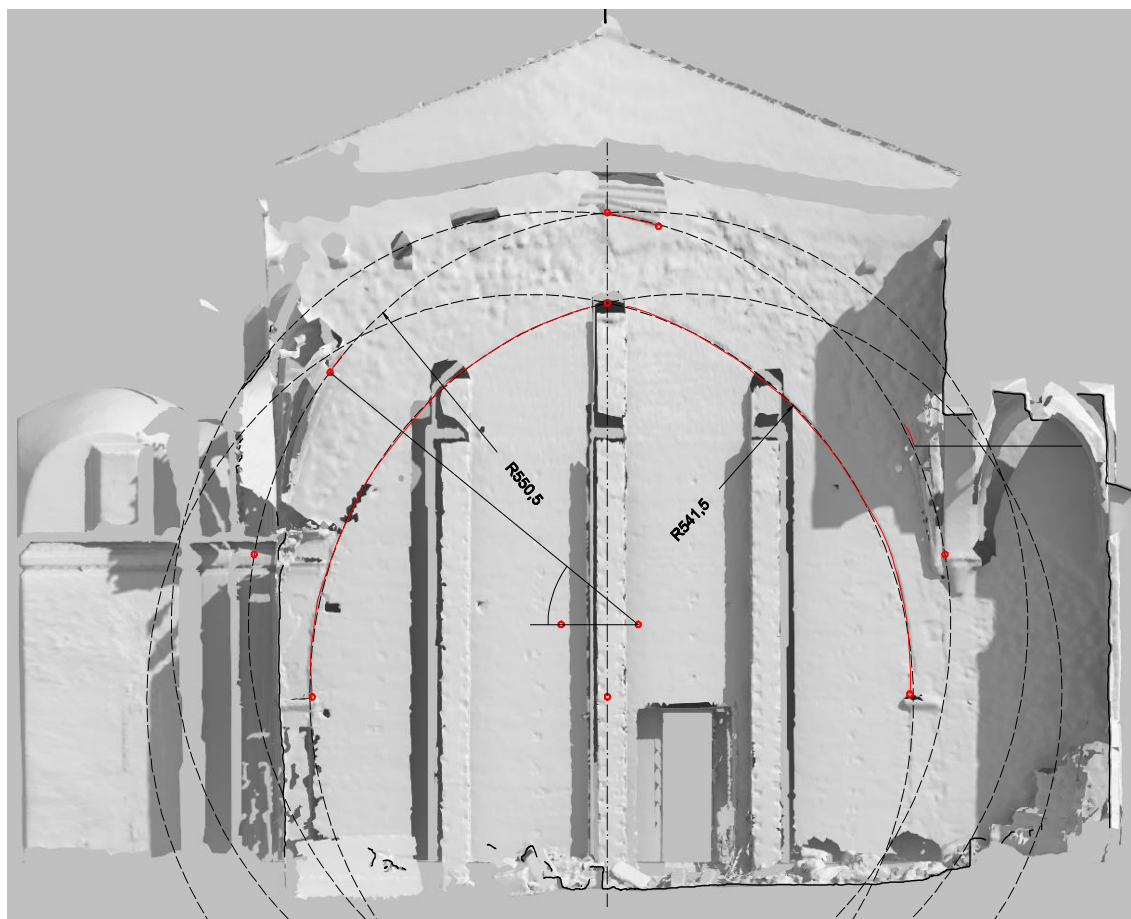


Figura 5.70. Pasos para el trazado de la planta según la hipótesis final

Con la planta ya trazada, el siguiente paso, sería el trazado de cada uno de los arcos en elevación. En primer lugar comentar que estudiando el alzado del muro de la capilla mayor, en el que se encuentra el arco diafragma, se puede observar, que este presenta un radio de 5,41 metros mientras que las huellas del arco formero que quedan en este muro reflejan un radio de 5,50 metros, dimensiones muy similares que permiten sospechar la presumible pretensión original de aproximarlos. En el caso de los formeros de los lados menores del rectángulo, al no poder interpretar las huellas en los muros con seguridad, ya que no son apreciables entre los restos conservados, se han trazado utilizando el mismo radio (5,50) y centro a un tercio como se realiza en los formeros de los lados mayores.

Por otra parte, realizando diferentes secciones por los arranques, en el 3D obtenido con el escáner láser, se observa que el radio del resto de los arcos (cruceles y terceletes) pudiera ser aproximadamente el mismo, a excepción de las claves de terceletes de los lados de mayor dimensión, donde el radio que mejor concuerda es aproximadamente la media entre el radio 5,50 y 6,00.



Figuras 5.71. Estudio de los radios a partir de las huellas que quedan en el muro.

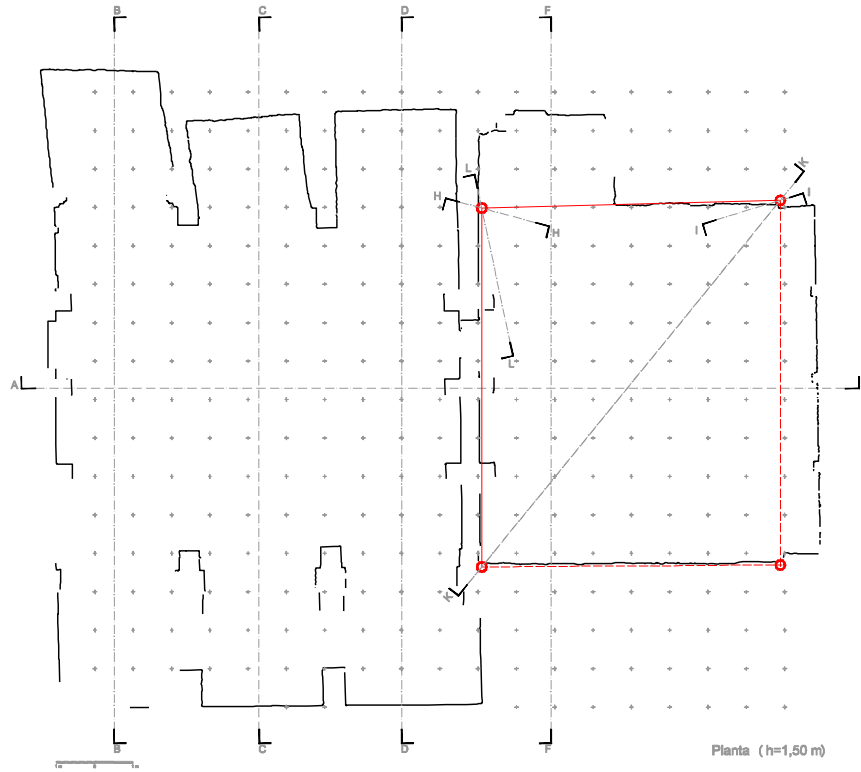


Figura 5.72. Planta de la iglesia, dibujada a partir de una sección horizontal del modelo digital obtenido con el escáner láser.

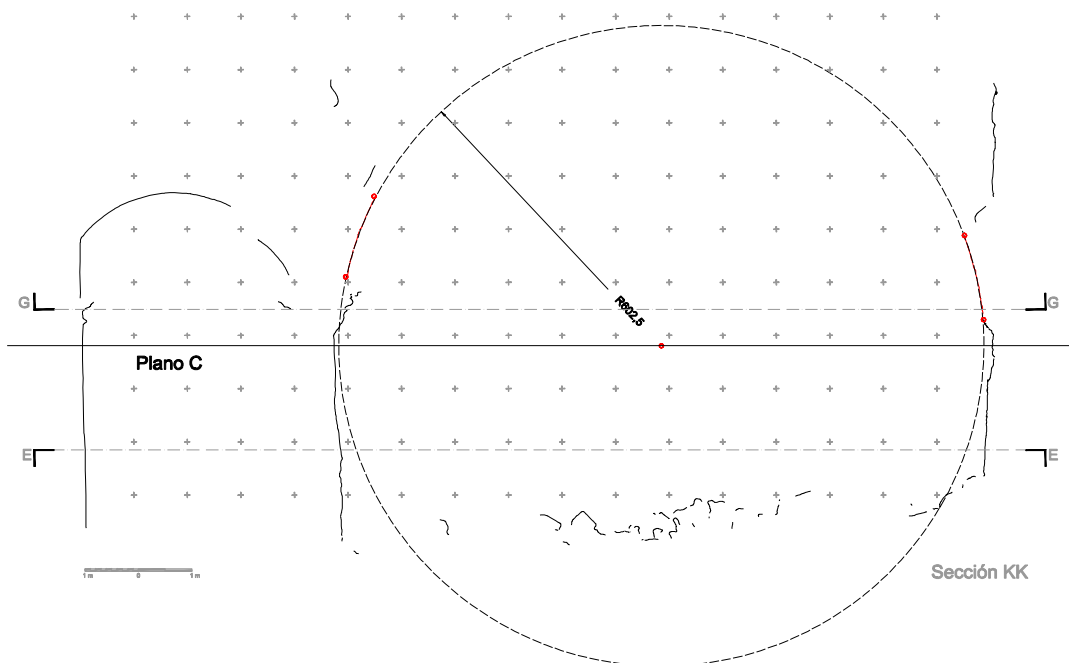


Figura 5.73. Sección KK'. Medida en cm.

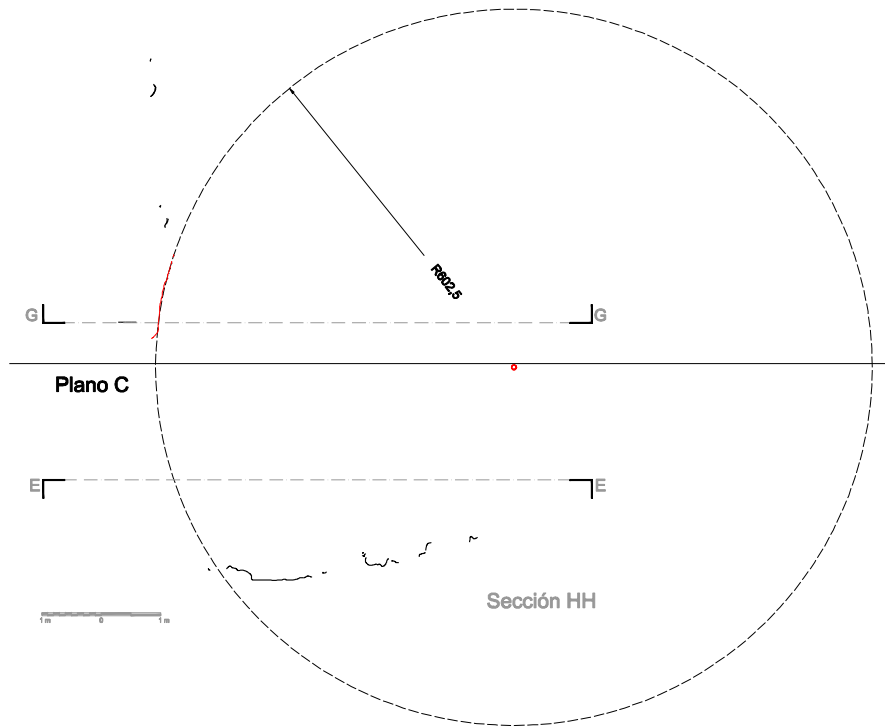


Figura 5.74.
Sección HH'.
Medida en cm.

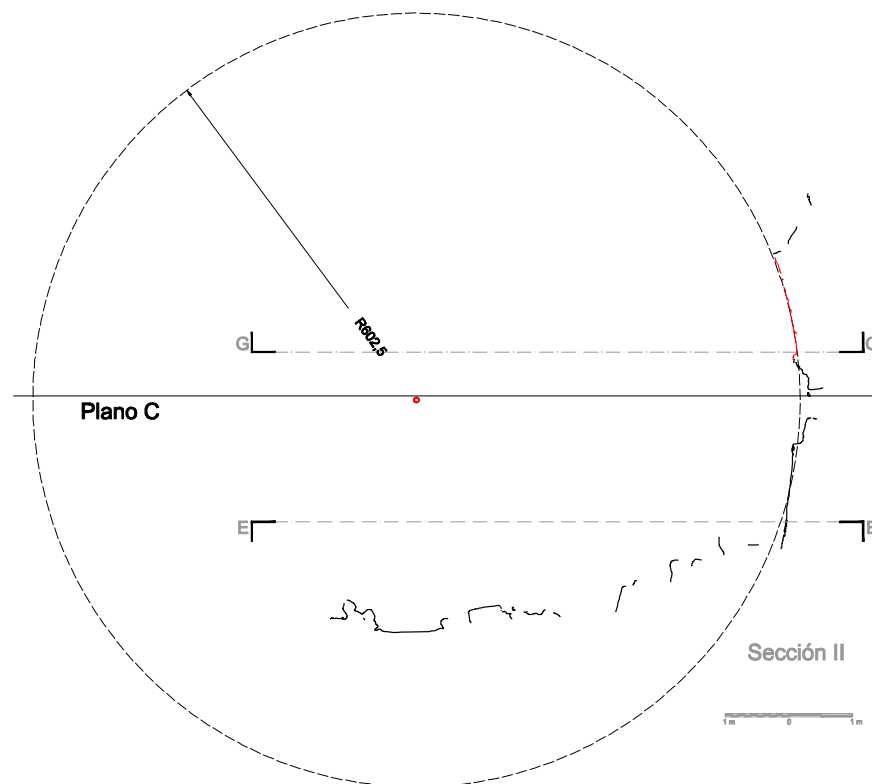


Figura 5.75.
Sección II'.
Medida en cm.¹⁷

¹⁷ Se puede observar en las secciones un radio similar de los diferentes arcos.

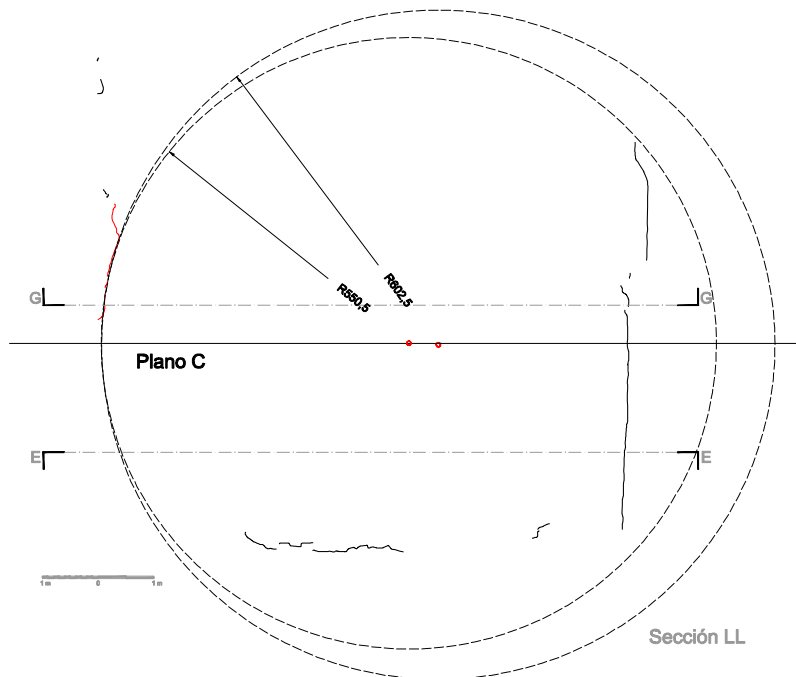


Figura 5.76. Sección LL'. Medidas en cm.

Al comprobar los escaneados, en general, también se han encontrado otros datos interesantes. Al buscar el radio se descubre que los centros de los arcos no se encuentran contenidos en el plano de los arranques sino que están situados en un plano inferior. Así se puede decir que los arcos cruceros finalmente no son arcos de medio punto sino que son arcos rebajados.

Con estas comprobaciones se podría considerar cerrada la hipótesis de trazado de los arcos, sin embargo, cuando se dibuja el 3D de la bóveda, montando virtualmente las piezas conservadas en su lugar original, se descubren algunos inconvenientes, que al comprobar el resto de la iglesia se comprenden. El problema es que aunque las claves coinciden perfectamente en ángulos horizontalmente, verticalmente no es así. Esto se debe a que a partir de la ligadura, o sea de las claves, los arcos mantienen el radio pero no la trayectoria, que resulta ligeramente desplazada. Así que las claves que se encuentran en los cruceros, que en principio se consideraban decorativas, acaban cumpliendo una función de encuentro entre trayectorias.

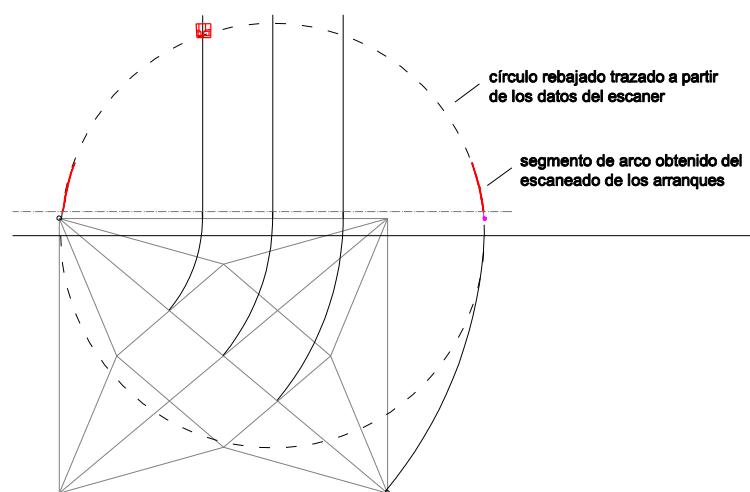


Figura 5.77. Imagen del arco crucero en la que se observa que la clave hacia el lado derecho no coincide con el arco

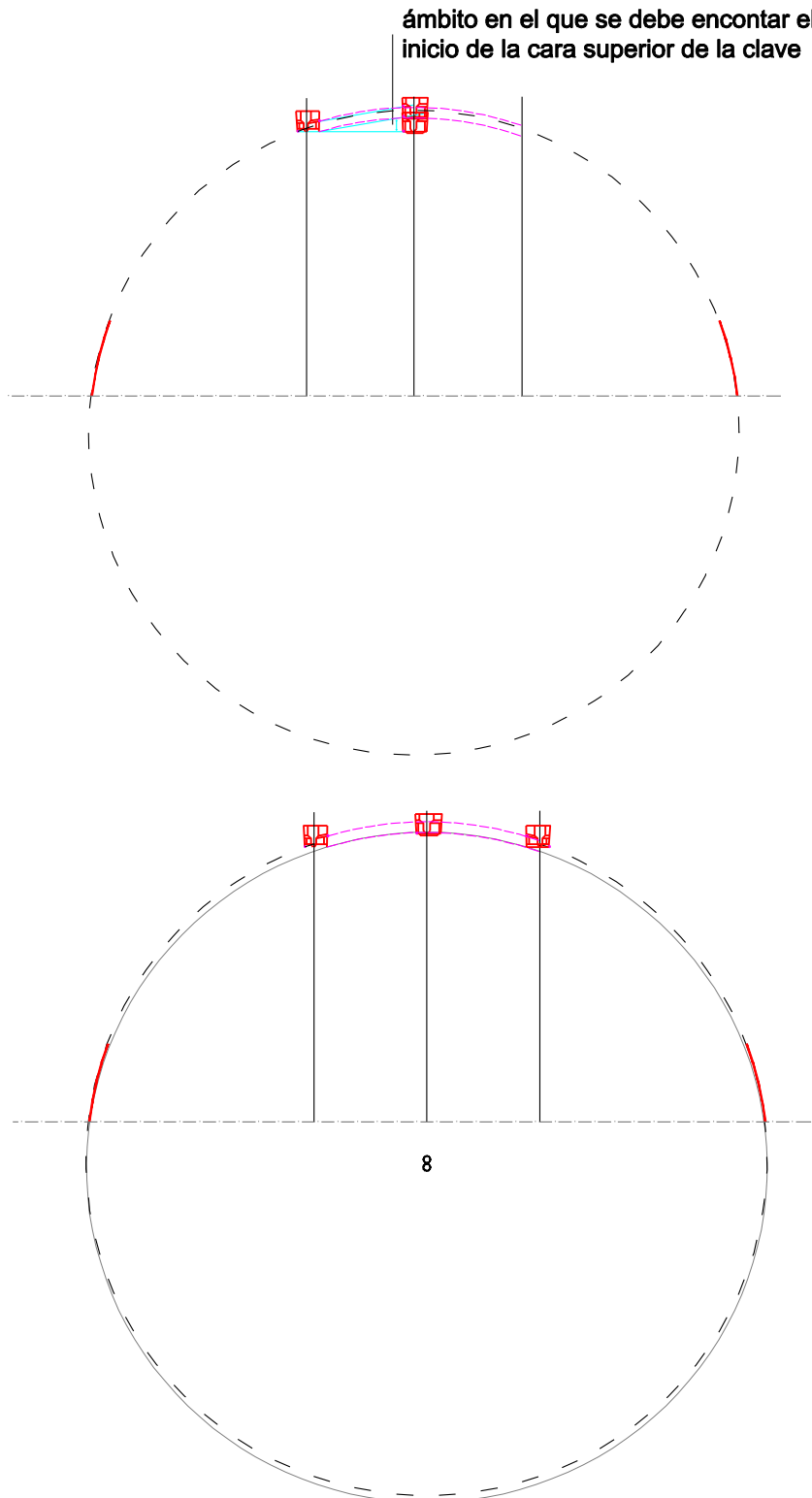


Figura 5.78 y 5.79. En la imagen de la izquierda se observa el ámbito en el que se debe encontrar el arco según la tangente sacada a partir de la clave, y la zona entre la que estará la clave polar. En la derecha se ve la clave central situada con el arco correctamente situado y con una altura similar a la del resto de los tramos de la nave central.

Según la hipótesis hecha, se considera que el motivo de esta búsqueda de bajar la altura de la capilla mayor pudo ser conseguir una altura similar al resto de la nave en la zona central, probablemente para conseguir una cubierta plana (terracea o azotea) en toda la iglesia, como era costumbre en la zona. Así que finalmente se llega a la conclusión de que se plantearon como condicionantes de partida cuando construyeron la bóveda, que cumpliesen dos condicionantes: partiendo de las dimensiones y la geometría sensiblemente rectangular en planta del espacio existente, que la altura fuese en el punto más alto igual a la altura del resto de los tramos de la nave principal en la parte central.

Esta hipótesis es un resumen y, a su vez, el producto de diversas hipótesis y pruebas diferentes. Es un conjunto de pasajes lógicos a los que se han llegado, haciendo una serie de pasos iterativos de lo general a lo particular y viceversa. Un ejemplo de ello, ha sido la observación de diferentes bóvedas que nos habrían hecho

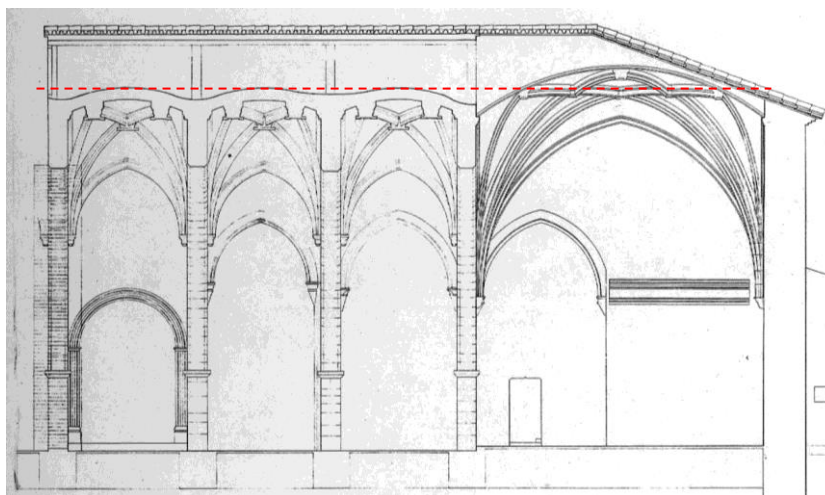


Figura 5.80. En esta imagen se observa la hipótesis de Grande y Gil de un casquete esférico, comprobándose que la altura es diferente con respecto al resto de la nave.

concluir que los arcos tenían todos el mismo radio, porque se ha visto que en la mayoría de los casos se cumple que cuando los formeros son apuntados, todos los arcos se realizan con el mismo radio, mientras que si los formeros son de medio punto normalmente corresponde a un casquete esférico.

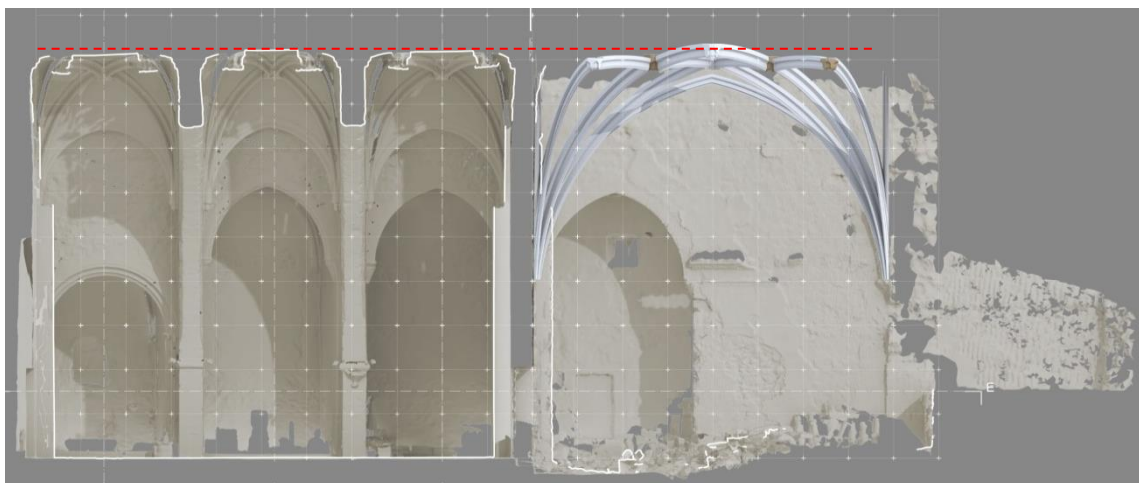


Figura 5.81. En esta imagen se observa una altura prácticamente igual a lo largo de la iglesia



Comentar por último que la clave dos, aunque horizontalmente cumple con los ángulos, se ha desechado como perteneciente a esta bóveda ya que la forma de la dovela de incidencia se presenta inclinada con respecto al eje vertical, y además presenta en sus caras la incidencia de tres dovelas “P” y una “G”, siendo sus ángulos para encajar como una de las claves de los arcos cruceros, por lo que tendrían que ser dos “P” y dos “G”.

Tras este análisis se pueden resumir una serie de afirmaciones:

- Se trata de una bóveda de crucería estrellada de rampante curvo que cubre un espacio de planta rectangular ligeramente trapezoidal, siendo sus lados menores de 7,79 y 7,80 metros, sus lados mayores de 9,33 y 9,49 metros y sus diagonales 12,31 y 12,11 metros. Los arranques de los arcos de la bóveda están situados a 4,082 metros del suelo, y el intradós de la clave polar a 9,42 metros.
- La bóveda contaba con 9 claves sustentantes (una central y ocho secundarias), cuatro arcos formeros y 8 nervios salientes de terceletes (dos de cada arranque). La bóveda presenta una ligadura en rombo cuyos vértices son las claves de terceletes (cuatro), presentando en la intersección de la ligadura con los arcos cruceros otras claves, las cuatro restantes.
- Las dovelas documentadas de los nervios de la bóveda que cubría la capilla mayor encontradas en el suelo, recuperadas de entre los escombros, cuyo inventariado aparece en las fichas realizadas al efecto, son 212 piezas, con la siguiente denominación P (110 piezas), L (60 piezas) y G (42 piezas). Las dovelas del tipo P correspondían a los terceletes y a la ligadura, las L a los formeros y las G a los nervios cruceros. Se localizan en un principio, siete de las nueve claves que integraban la bóveda, aunque al estudiar más detenidamente se observa que una de ellas no pertenece a esta bóveda porque presenta en los nervios de intersección 3P y 1G, cuando entre las claves que integrantes de la bóveda solo pueden ser de la tipología 4P (si son de terceletes, por ser intersección entre nervios de terceletes y ligadura) o 2P y 2G (si son las pertenecientes a la intersección entre cruceros y ligadura). Además, esta clave presenta en una de estas P inclinada, no teniendo un eje vertical como en el resto de las claves.
- La clave polar, es la única de las claves encontradas que recibe en todos sus lados nervios tipo G, por lo que se ha podido deducir que solo los nervios crucero tenían este tipo de dovela.
- De las ocho claves restantes, se observaban dos tipos de claves, las que presentan los arranques encontrados dos a dos (y que como se comentaba tienen 2P y 2G), que corresponden a claves que se sitúan en la intersección entre los arcos crucero y la ligadura, y las que presentan un ángulo en horizontal mucho mayor que el resto, pertenecientes a claves de terceletes (todos los nervios son P). De éstas se ha determinado su curvatura y los ángulos entre ellos para poder situarlas espacialmente.
- Los ángulos entre los nervios que llegan a las claves y los ángulos del nervio con respecto al eje vertical de la clave se han podido obtener a partir de los datos tomados. No así pero no



los radios de curvatura de las dovelas, ya que su desgaste y escasa flecha no permiten obtener resultados fiables. También se extraen datos de los arranques, pero el deterioro que éstos presentan no permite la obtención de datos que nos ratifiquen con una seguridad absoluta que los radios son correctos.

- De cada arranque (jarja) partían dos arcos formeros, uno diagonal y dos terceletes. Los arranques escaneados han permitido determinar aproximadamente el radio de cada uno de los arcos que conforman la bóveda. Con estos datos, se deduce que la situación del centro de los radios no se encuentra a la altura de los arranques sino en planos más bajos. Quedando los centros de los formeros en un plano y los de los cruceros y los de terceletes en otro, aunque esta precisión que ahora se puede estudiar milimétricamente, presentan en el caso de los centros pequeñas desviaciones. El plano en el que se sitúan los centros de los arcos formeros está más cercano al suelo que el del resto de los arcos, pero ambos están por debajo del plano de los arranques.
- Al no existir simetría en la bóveda, los arcos formeros no son iguales, sin embargo, todos tienen, según nuestra hipótesis, el mismo radio, cumple que su centro está situado a un tercio del vértice y son apuntados.
- En la hipótesis final se descarta el casquete esférico por deducirse una bóveda menos esbelta, obtenida por la información de las claves y de los arranques. Presentando como características ratificables, que las claves presentan un eje vertical situado perpendicularmente al suelo y paralelo a los muros (este detalle se encuentra además en el resto de la iglesia, siguiendo por tanto un modelo en toda ella), que los ángulos de las claves no permiten colocarse para formar parte de un casquete esférico, y que los arcos formeros son apuntados. Se presentan también datos aproximados, que forman parte de la hipótesis defendida, como son que los radios que presenta la bóveda se mueven entre 5,50 y 6,00, que el radio de los formeros del lado menor es igual al del lado mayor, porque si bien, con las huellas del arco formero del lado mayor se puede obtener claramente este radio, en el lado menor las huellas son menos claras, pero en cualquier caso compatibles con esta hipótesis.

G. RESULTADOS

Tras realizar todos los pasos comentados en el apartado anterior, el último paso ha sido la construcción virtual de la bóveda. Para el diseño de esta bóveda han sido necesarios utilizar varios programas, porque si bien el “*Rhinoceros*” permitía un buen diseño geométrico con alta precisión en 3D, para trabajar interactivamente el programa “*Luxology Modo*” era el adecuado. Por otro lado, para el dibujo de 2D se ha utilizado el “*Autocad*”. Cada uno de los programas utilizados son muy eficaces para partes específicas pero, sin embargo, ninguno reúne las características que permitirían el uso de un único programa para realizar todo el trabajo.

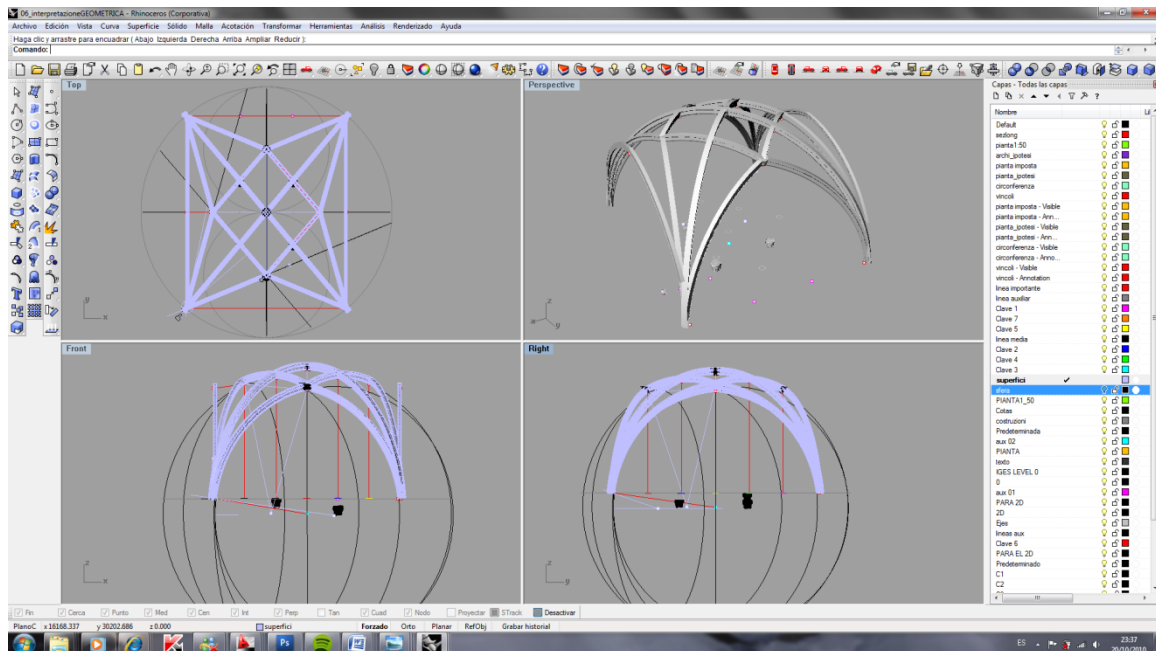


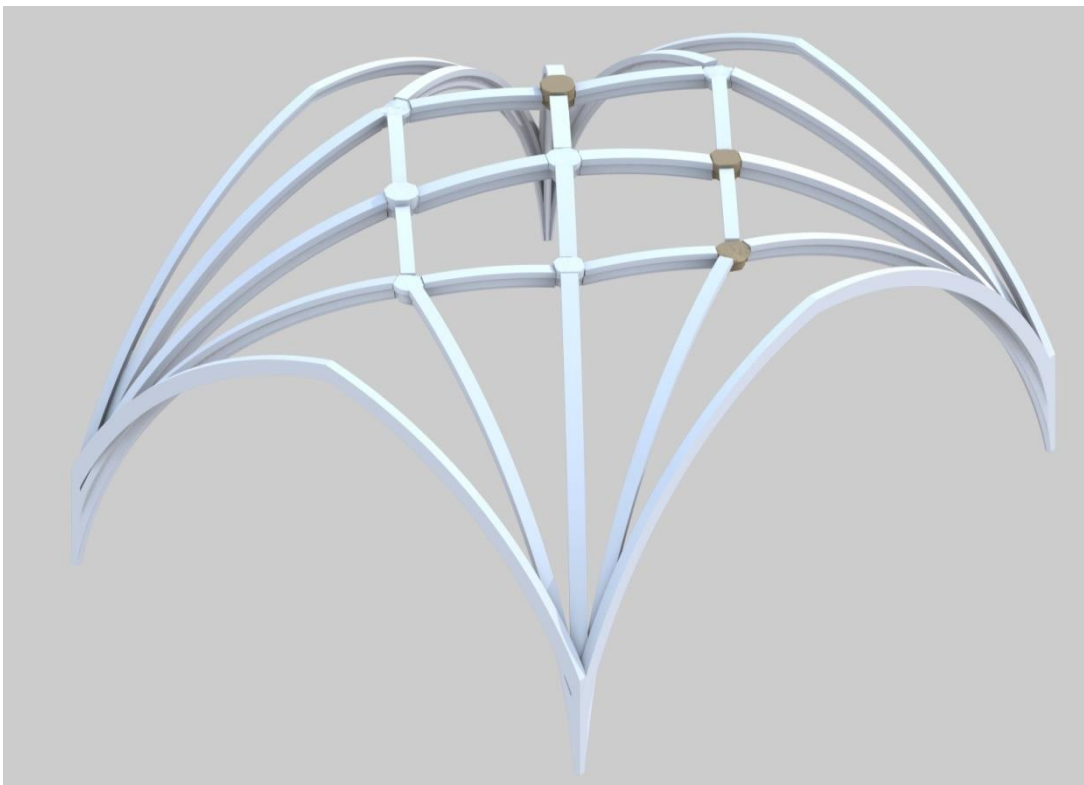
Figura 5.82. Así en esta imagen se puede observar cómo una vez trazada la planta en *Autocad*, se ha insertado en “*Rhino*” y se han trazado los arcos en 3D. También se han utilizado las secciones de las dovelas correspondientes para dibujar correctamente los arcos (con su profundidad, altura, forma de la moldura...) tras haberse realizado previamente un trazado con simples líneas curvas.

Una vez modelada la bóveda, se introducen las claves con poca resolución, para que no sea un archivo muy pesado y que se pueda manejar, y se sitúan en su posición correspondiente. Introducidas, se pasa todo al programa “*Luxology Modo 501*” porque como se comentaba, este programa es más interactivo y para colocar las claves de la forma más correcta, es el mejor, y así se obtiene el resultado final.

En las imágenes (figura 5.83 y 5.84) se puede observar el resultado final, con todas las claves encontradas encajadas perfectamente, presentando un color diferente las claves que se han dibujado por simetría pero que realmente no se han encontrado. Debe quedar claro en todo momento, que es una hipótesis, que muchos datos se pueden confirmar claramente (ángulos de las claves, verticalidad de los ejes de las claves...), pero otros han sido deducidos (algunos radios de los arcos de la bóveda, ya que los arranques se encuentran muy deteriorados, los planos donde se sitúan los centros de los radios de los arcos...), por falta de pruebas más claras.



Figuras 5.83 y 5.84. En la imagen superior, axonometría de la bóveda vista desde abajo. En la inferior, axonometría vista desde arriba. En ambas se presentan las claves que no se tienen en diferente color al resto de la bóveda.





H. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA BÁSICA DE REFERENCIA

- ❖ Díaz Manteca, E., 2002. *Les Coves de Vinromà. Una vila del maestrat històric*. Col.lecció Universitària. Diputació de Castelló. Castellón.
- ❖ Fantini, F., 2008. *Il modello di stadio da Villa Adriana. Indagine su un progetto incompiuto*. Università degli Studi di Firenze. Florencia.
- ❖ Mtnez-Espejo Zaragoza, I., 2010. *La Iglesia de los Desamparados de Les Coves de Vinromá. Hipótesis y restitución virtual de la bóveda de la capilla mayor*. Tesina del Máster Oficial de Conservación del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia dirigida por Francisco Juan Vidal. Valencia.
- ❖ Navarro Fajardo, Juan C., 2006. *Bóvedas de la arquitectura gótica valenciana: Traza y montea*. Publicación de la Universitat de Valencia.
- ❖ Palacios Gonzalo, José C., 2009. *La cantería medieval. La construcción de la bóveda gótica española*. Editorial Munilla-Lería. Madrid.
- ❖ Palacios Gonzalo, José C., 2005. *La geometría de la bóveda de crucería española del XVI*. Conferencia leída en el III Seminario sobre bóvedas impartido dentro del Máster de Restauración de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- ❖ Grande Grande, F. y Gil Mascarell, I. *Proyecto básico y de ejecución para la restauración de la iglesia vieja de los Desamparados de Cuevas de Vinromá (Castellón)*.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

- ❖ Adembri, B., Di Tondo, S. y Fantini, F., 2010. *Architecture and Decorative System of the Teatro Marittimo at Villa Adriana: a New Integrated Approach to an Understanding of the Build's Original Aspect*. Fusion of Cultures. Granada.
- ❖ Capilla Tamborero, E., 2007. *El levantamiento arquitectónico como instrumento de documentación, representación e investigación en espacios desaparecidos. La bóveda de la sala capitular del monasterio de Santa María de la Valldigna (Valencia)*. Máster en conservación del Patrimonio Arquitectónico UPV. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- ❖ Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica de la Universidad Politécnica de Valencia, 2005. *Investigando los Bienes Arquitectónicos*. Biblioteca TC.



- ❖ Díaz manteca, E. y Olucha Montins, F., 1991. *Uns documents per l'estudi de l'art al Maestrat de Montesa*. B.C.E.M. 36, pp. 29-35.
- ❖ Docci, M., Maestri, D., 1994. *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Edizioni Laterza. Bari.
- ❖ Esteve i Gálvez, F., 1992. “La vía romana per les Coves de Vinromà i Vilanova d'Alcolea (Castelló)”. *Estudios de arqueología ibérica y romana: homenaje a Enrique Pla Ballester*. pp. 597-618.
- ❖ Gaiani, M. (a cura di), 2005. *La rappresentazione riconfigurata*. Edizioni Poli.design. Milán.
- ❖ Mateu y Llopis, F., 1946. *La circulación monetaria en la diócesis de Tortosa y Segorbe-Albarracín en el Reino de Valencia, según la décima de 1279-80*. B.S.C.C. XXII, pp. 494-501.
- ❖ Puig, J., 1947. *Canteros en Catí*. B.S.C.C., XXIII, pp. 99-100.
- ❖ Revest Corzo, L., 1921. *Un día en el Maestrasgo*. B.S.C.C., suplement al núm. XIII. pp. VI-VII.
- ❖ Rodríguez Culebras, R. y Olucha Montin, F., 1998. *Ornamentos religiosos*. Les Coves, p. 8.
- ❖ Zaragoza Catalán, A., 1990 *A propósito de las recientes obras de restauración de la parroquia vieja de Coves de Vinromà*. B.C.E.M., 30.
- ❖ Zaragoza Catalán, A., 2003. *Una arquitectura gótica mediterránea*. Consellería de Cultura i Educació. Valencia.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- ❖ “www.lescovesdevinroma.es” (02/09/2013)
- ❖ “www.gothicmed.es” (04/08/2013)



CAPÍTULO 5. CASO DE ESTUDIO 2



Anastilosis virtual de modelos adquiridos mediante escáner láser: Piazza d'Oro dentro del recinto arqueológico de Villa Adriana (Tívoli, roma)

A. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

VILLA ADRIANA Y LA “PIAZZA D’ORO”¹

La “*Piazza d’Oro*” forma parte del complejo arquitectónico de la Villa Adriana, lugar de retiro y de trabajo institucional del emperador Adriano. Éste creó dicho complejo, para alejarse del Palacio del monte del Palatino, en la ciudad de Roma, ya que este le disgustaba, por su relación con el senado que no era del todo cordial. Durante su vida hace múltiples viajes de los que a menudo toma inspiración para las construcciones de su villa, a la que siempre volvía, permitiendo supervisar los trabajos que se proyectaban a partir de sus ideas. En ella vivió durante sus últimos años y gobernó su imperio. Adriano, sin embargo, no muere allí, sino en su villa de Baiae, en Campania cerca de Nápoles.

La Villa que el emperador construyó a los pies de Tívoli puede ser considerada la reina de las villas imperiales del mundo antiguo. El emperador Adriano, no solo la adaptó con grandísimo arte, y distribuyó consecuentemente los edificios en relación a la necesidad de carácter oficial y según la mayor o menor conveniencia del terreno y de la mayor correspondencia de los edificios al uso que se deseaba darle en las varias estaciones del año, sino que la decoró con una magnificencia y un esplendor que no tiene ninguna otra villa. Desde hace quinientos años la Villa ha estado restituyendo vestigios, y es probable que otros muchos estén aún entre sus ruinas.

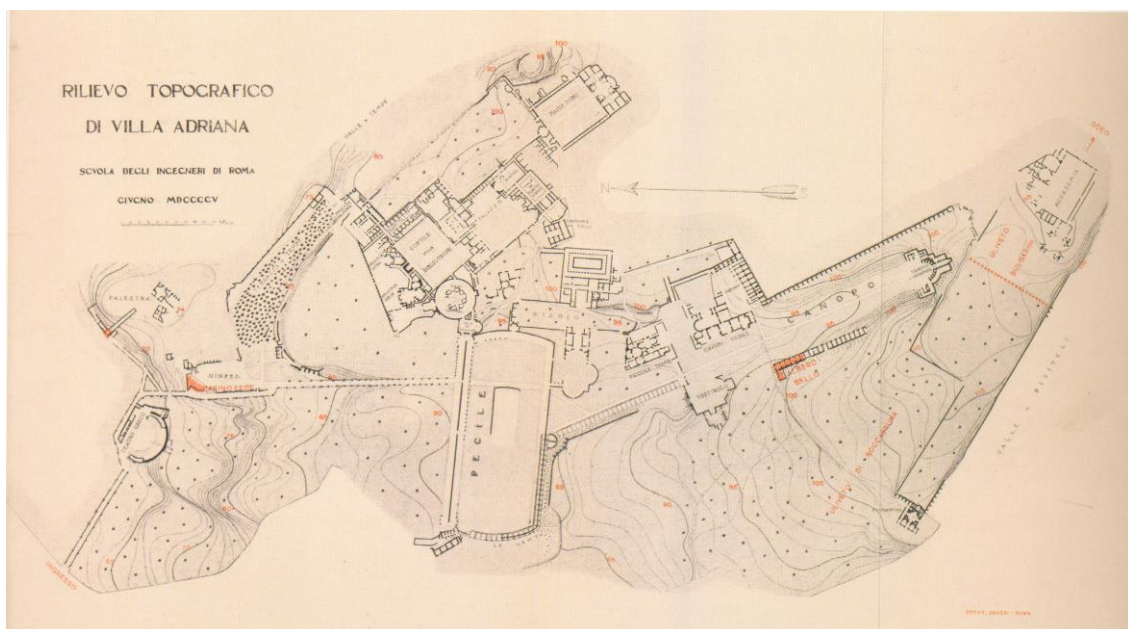


Figura 6.01. Levantamiento topográfico de Villa Adriana, 1905 (Sapelli Ragni, M., 2010: 172).

¹ Aurigemma, S. (1996: 19-20, 154-156).



La Villa Adriana se extiende sobre una loma de la montaña, a dos millas cerca de Tívoli y a 28 kilómetros de Roma (cerca de 17 millas romanas a partir de la antigua Porta Esquilina). Al amparo de los vientos que soplan del Norte, y protegida por el monte Ripoli y por el monte Catillo contra los fríos punzantes que vienen del Este y del Nordeste, está abierta al influjo benéfico de los vientos que exhalan de poniente. Hacia el Sur se extiende a sus pies la llanura ligeramente ondulada del campo romano hasta el mar.

La loma sobre la que se extiende la Villa está limitada al Norte y al Sur por dos pequeños valles, que recogen sus aliviaderos en dos fosos: uno al Norte llamado hoy “*Fosso dell’Acqua Ferrata*” por un nacimiento de agua ferruginosa que sobre él descarga, y otro al Sur, más profundo, llamado “*Fosso di Risicoli*”. El foso del *Acqua Ferrata* corre por un estrecho valle solitario, cerrado por un lado por un alto banco de piedra toba², que Adriano adaptó de un modo pintoresco, haciendo precipitar sus paredes, las cuales, de color moreno-rojizo, con el borde coronado de hierba perenne y de vigorosos árboles siempre verdes, recordaban al emperador el valle tesálico de Tempe. Ésta es la razón por la cual los eruditos han dado al riachuelo el nombre de *Peneo*. Este *Peneo* y el foso de *Risicolo* tenían, por tanto, en la antigüedad, una portada notablemente mayor, por el volumen imponente de agua que Adriano derivada de *Aniene* hasta su Villa por medio de un acueducto, con el fin de alimentar, los edificios termales, el ninfeo y las fontanas esparcidas en gran número por el pomposo predio tiburtino. Los dos riachuelos, se convertían en uno a poniente de la villa, el *Aniene*, un poco más allá del Puente Lucano.

Sobre la loma de monte, así adaptada por Adriano, y que se eleva poco a poco hasta más de 50 metros, pasando de la cota de 62,4 metros (ingreso actual de la Villa), hasta la cota 115,6 metros (que es la cota del llamado “*Tempio di Apollo all’Accademia*”) están distribuidos los edificios de la villa.

La villa estaba constituida por cuatro grupos de edificios. La “*Piazza d’Oro*”, junto al “*Vestibolo*”, el “*Ninfeo*”, el “*Cortile delle Biblioteche*”, el “*Peristilo del Palacio*” y los “*Ospitali*” formaban lo que se llama habitualmente el “*Palazzo Imperiale*”. Un segundo grupo de edificios, con distinta orientación, estaba formado por “*Rocabruna*” y la “*Accademia*” (también llamada, “*Piccolo Palazzo*” o “*Palazzo minore*”). En el primer grupo, o Palacio Imperial (con vistas a Tívoli), es donde el emperador se alojaba en los meses invernales, mientras que llegados los meses estivales prefería habitar en las edificaciones de la Academia (con vistas al campo romano y al mar).

Además, había un tercer grupo de construcciones monumentales constituido por el “*Pecile*”, la “*Sala della Biblioteca*” (ahora llamada “*Sala dei filosofi*”), el “*Stadio*”, y los edificios al lado del estadio, sea a poniente (“*l’edificio con tre esedre e fontana*”), sea a levante (“*l’edificio con*

² Piedra caliza, muy porosa y ligera, formada por la cal que llevan en disolución las aguas de ciertos manantiales y que van depositadas en el suelo o sobre las plantas u otras cosas que hayan a su paso. En Villa Adriana se utiliza esta piedra para realizar la mayoría de las construcciones.

criptoportico e peschiera”). El último grupo estaba constituido por el “*Canopo*” y los dos complejos de las “*Terme*”: las consideradas “*Piccole Terme*” y “*Terme Grandi*”.



Figura 6.02. Imagen de la situación de la Piazza d’Oro en la Villa Adriana, Tivoli.

La *Piazza d’Oro* se encuentra al Este de la Villa, situada sobre el valle Foso “dell’Acqua Ferrata” o “Valle de Tempe”. Este grandioso complejo recibe dicho nombre por el extraordinario número y la suntuosidad de los mármoles que se encontraron, en las excavaciones realizadas en la segunda mitad del Setecientos, en los tiempos de Piranesi. El vasto peristilo resulta en cada lado un doble pórtico, apoyado, en el eje mediano, sobre 18 columnas sobre los lados mayores y 12 sobre los menores. A lo largo de la pared del fondo, se encontraban las columnas, otras semi-columnas en ladrillo revestido de estuco, de tal modo que permitían una imitación perfecta del mármol, y del lado de la plaza central se alzaban igualmente ligeras pilastras.

La *Piazza* se podía considerar un gran jardín porticado, o peristilo. Estaba constituido por complejos mixtilíneos, que suponían los puntos fuertes del lugar: un vestíbulo con una de las primeras bóvedas engallonada de la historia de la arquitectura; el pabellón del fondo, organizado en torno a un ambiente con una inédita silueta cruciforme definida por una línea ininterrumpida sinuosa cóncavo-convexa, que no se sabe con seguridad como estaba cubierta y un pabellón lateral que presentaba, hacia un valle boscoso, un frente sinusoidal, igualmente sin precedentes en espejo sobre una cuenca semicircular (Bozzoni, C., Franchetti Pardo, V., Ortolani, G. y Viscogliosi, A., 2010: 329).



Figura 6.03. Imagen de la Piazza tomada desde el lado Norte o Septentrional, en la cual se pueden ver los restos del vestíbulo con la bóveda engallonada.

El pavimento, bajo el pórtico, se componía de placas de mármoles policromados constituido de rombos, rectángulos y triángulos, y de una zona pavimentada a pequeñas tiras, también en mosaicos de mármoles policromados, a base de rombos, cuadraditos y triángulos en torno a las pilastras cuadradas. Bajo el pórtico cubierto a crucería el pavimento resultaba sin embargo, en la parte central, de mayores rectángulos alternándose en dos sentidos, con cuadrillos en las zonas angulares, mientras en las placas estaban constituidas por 6 filas de ladrillos marmóreos.

Del lado del pórtico septentrional se encontraba el acceso a la plaza a través del “vestibolo” (vestíbulo), que era una sala de planta octogonal, con la bóveda engallonada, comentada anteriormente, como cubierta, con cuatro nichos semicirculares y dos rectangulares, sobre los cuales se situaban amplias ventanas en los lados de levante y poniente, y con ocho columnas en correspondencia de los ocho ángulos de la sala.

Sobre el otro frente menor de la “Piazza”, del lado del Sur o Meridional, se situaba la sala de mayor representación del Palacio Imperial. Es un aula con planta de cruz griega con cuatro lados fuertemente convexos en dirección del centro de la sala y cuatro lados inflexos hacia el exterior de la misma sala. Sobre los lados que se curvan hacia el centro del aula, y que fueron vaciados para recabar pequeños vanos, apoyaba una cúpula de tal audacia que se derrumbó sin



dejar trazas, a pesar de la consistencia bien conocida del mortero de las fábricas de Villa Adriana. En el lado cóncavo hacia el Sur, el aula comunicaba a través de un umbral compuesto por columnas, con una grande exedra, que en cinco nichos contenía 5 estatuas que vertían agua en tazas marmóreas.

En el medio del aula se situaba un amplio basamento que fue destinado a tener sobre él una estatua de proporciones mayores a la realidad, quizás la estatua del emperador.

A poniente y a levante del aula mayor se situaban grandiosas salas de las cuales son conservados muchos elementos de un entablamento marmóreo con cornisa a partes cóncavas y a partes convexa, y con frisos en los cuales son figurados monstruos marinos, a veces cabalgantes, a veces estimulados por héroes, y escenas de caza.

Sobre el eje mediano, en el sentido del lado mayor del cuadripórtico hay una fuente monumental, de la cual se había constatado la existencia en las pruebas realizadas en el 1948, y que después apareció continua.

LOS FRISOS DE CAZA DE LA “PIAZZA D’ORO”³

La Piazza d’Oro es entendida como uno de los más distinguidos monumentos de Villa Adriana tanto por la considerable superficie que abarca, como por la originalidad de las soluciones arquitectónicas. Su carácter peculiar es además enfatizado por el aislamiento planimétrico con respecto al resto de las construcciones de la Villa, y además, en particular por el desarrollo de sus volúmenes. Prueba de ellos son, el monumental vestíbulo con la bóveda a cuñas, las exedras, el edificio sobre el lado meridional proyectado sobre la amplia corte porticada central, que aún a día de hoy son difícilmente apreciables desde el exterior, a excepción del ninfeo y de los ambientes largos del lado este, panorámicamente abiertos hacia el valle

La Piazza d’Oro presentaba una rica decoración conforme a la elegancia de las arquitecturas que la constituían. Alguna es todavía observable, como los pocos mosaicos in situ, o los restos de *opus sectile* en los más raros y apreciados mármoles, además de esculturas, encontradas en antiguas excavaciones. Tampoco se podía subestimar el arte topiario, destacado en la investigación de E. Salza Prina Ricotti.

³ Sirano, F., (2000: 85 – 93).

Deben evidenciarse entre esta decoración, los frisos figurados en mármol griego con “*amorini*” cazadores y procesión marítima que adornaban los ambientes principales de los edificios meridionales. Los fragmentos supervivientes, se encuentran distribuidos entre los Museos Vaticanos y Villa Adriana, encontrados en las excavaciones renacentistas.

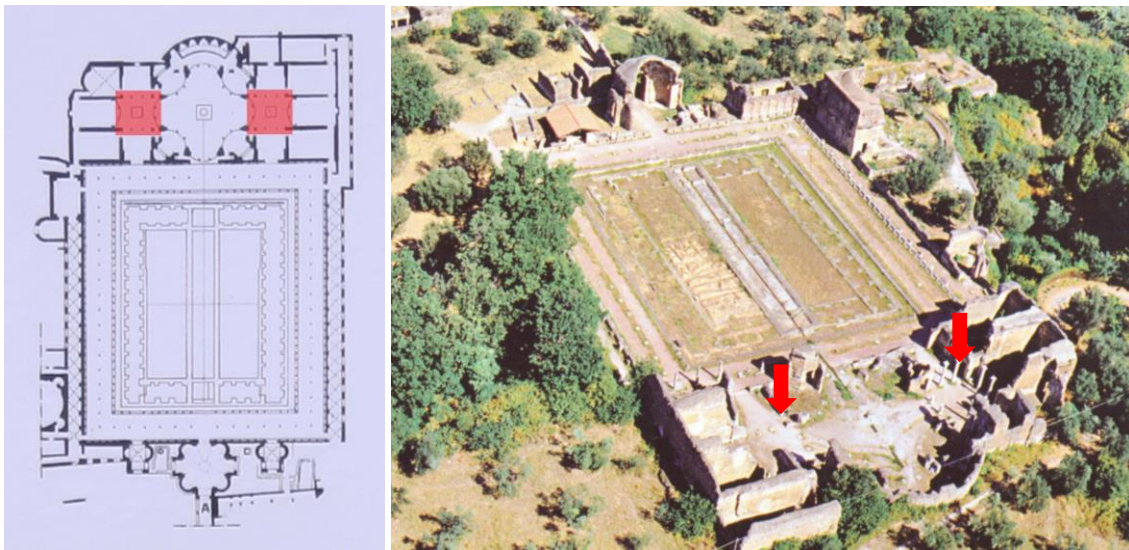
Años más tarde, en los años sesenta del novecientos (Sirano, F., 2000: 85), el material se sustrae para realizar una anástilosis, en la mayoría de los casos, con posicionamiento de los fragmentos arbitrario y peligroso, sobre arquitrabes de hormigón armado.

Se distinguen, según F. Rakob, seis grupos correspondientes a las probables colocaciones. Según éste, las escenas de caza decoraban los vanos adyacentes a la corte y los de procesión marítima los ábsides de las fuentes en los ángulos de la misma y el ninfeo.



Figura 6.04. Anastilosis realizada en los años 60.

El reexamen del material en los depósitos de Villa Adriana, conservados por la “Soprintendenza Archeologica per il Lazio”, ha permitido acrecentar considerablemente el número de fragmentos conocidos y de formular, preliminarmente, algunas nuevas observaciones. Por ejemplo, la propuesta del Rakob, en el conjunto aun aceptable, preveía que el friso del vano central fuese completamente liso, mientras que hoy es posible sugerir que ello también previera secciones figuradas en base a un fragmento de la serie marina con figuras sobre ambos lados.



Figuras 6.05 y 6.06. A la izquierda la planta de la *Piazza d'Oro* marcando en rojo las zonas donde se situaban los frisos de caza y a la derecha una imagen aérea de la Piazza marcando con flechas las mismas zonas⁴.

En la actualidad, en desarrollo lineal de elementos superficiales, incluidos en los Museos Vaticanos y en el *Pecile*, se pueden medir 27,03 metros de friso con escenas de caza, y 10,40 metros de friso con procesión marítima. Teniendo en cuenta que en algunos casos los frisos figuraban a ambos lados, se considera que, las escenas de caza cubrirían como máximo 23,67 metros, frente al total presupuesto de 40 metros de entablamento.

Dejando a un lado el problema de la reconstrucción del desarrollo del friso, conviene remarcar la estrecha unión entre éste y el monumento. La decoración era parte integrante de la arquitectura y fue realizada según un único proyecto, como demuestran los diferentes trabajos de los bloques destinados a los arquivoltas, a los muros o a los pilares, sea el tipo original de capitel corintio con volutas angulares revueltas hacia el ábaco, en vez del al exterior, decoradas con una cabeza de *amorino*, clara alusión a los protagonistas del friso.

El relieve con la caza presenta una sucesión de combatientes que ven los *amorini* generalmente luchando contra leones o grandes felinos, o en el acto de defenderse del ataque conjunto de más fieras. Los protagonistas, alados y eventualmente adornados solo con una corta clámide, van armados con una lanza, o menos frecuentemente con un arco o un bastón. El único eventual compañero, en una batuta de caza que parece implicar singularmente cada uno de los participantes en un esfuerzo no siempre coronado con la victoria, es un gran perro.

Debe notarse que ninguna de las fieras se representa derrocada, sino al máximo traspasadas por la lanza, mientras los *amorini* corren notables peligros, caen, se hieren. En esta última eventualidad se observan episodios de recíproca ayuda como cuando, sobre los relieves del

⁴ Imagen de Sapelli Ragni, M. (2010: 23).

Museo Vaticano, uno de ellos, falto de las alas y herido en una pierna, se reposa sobre una piedra defendido por un compañero que persigue a un jabalí; o cuando un *amorino* salva a otro cazador del asalto de un león. En un contexto similar recuerda, también la delicada imagen de un *amorino* que, apoyado en la lanza y al lado del fiel perro, parece llorar el triste destino de un amigo caído.



Figuras 6.07 y 6.08. Imágenes de dos frisos de caza conservados en una de las estancias de la *Piazza d'Oro*, Villa Adriana, fotografiadas en agosto del 2011.

Las fieras, casi siempre al galope o corriendo, avanzan solas o en pareja en direcciones cambiantes, también sobre el mismo bloque. El bestiario está compuesto de leones, leonas, antílopes, gamos, jabalís. De particular importancia para la interpretación del friso resultan los cuadrúpedos de los semblantes equinos que sobre dos fragmentos aparecen traspasados por la lanza blandida por un *amorino*. Se trata de una circunstancia que empuja a excluir que puedan ser caballos, porque no son conocidas cazas cruentas de caballos, e induce a reflexionar sobre la posibilidad de que pueda tratarse de otros animales. En efecto, particularmente seductor resultaría la identificación con onagros, literalmente asnos salvajes, équidos bastante comunes en Asia y África, que sabemos que eran cazados en la antigüedad, mientras menos sostenible parece la hipótesis de que se trate de cebras, lo que presupondría la caracterización del uso del color, del cual no se han encontrado trazas sobre los mármoles.

El tema de la caza, en el arte antiguo, expresaba ideales heroicos y aristocráticos. La caza se convierte, ya en la Roma republicana, en un símbolo de nobleza helenizante como un instrumento para ganar consenso político a través de espectáculos. Según fuentes, además, nos describen al emperador como un apasionado cazador, tema sin duda reflejado en los frisos. Se observa en los frisos de la *Piazza* que se busca enseñar con claridad la caza dentro de un contexto natural, poniendo de fondo árboles en un ambiente silvestre, típicamente mediterráneo. Además, la modalidad de combate de los “*amorini*” (desnudos, a pie, sin ninguna otra arma que lanza, bastón o arco) exaltan, como se comentaba, el aspecto heroico y guerrero de la caza.



B. OBJETO

El argumento de este caso, es el estudio de un espacio arqueológico y arquitectónico primitivo, para la identificación de la posición en la que estaban situados los fragmentos de los frisos y la realización de la anastilosis virtual del orden arquitectónico. Este estudio detallado realizado permite, además, realizar una propuesta de intervención museográfica del conjunto arquitectónico.

El estudio consta de una parte de levantamiento, con varios métodos que se explicarán en el apartado correspondiente, y una de investigación del edificio.

La fiabilidad del resultado se avala con el empleo de una metodología rigurosa, basada en estudios detallados, apoyados en tecnologías avanzadas e inocuas para las ruinas. El levantamiento de los restos se hace con tecnología láser 3D que tras un estudio métrico y geométrico de las trazas permite la anastilosis virtual de las piezas arqueológicas conservadas. Estos estudios convergen en una hipótesis final que permite, entre otras cosas, revisar anastilosis pretéritas como la formulada en los años 60.



Figura 6.09. Imagen de la Piazza d'Oro en su situación actual.

C. MEDIOS, SISTEMAS Y METODOLOGÍA DE LEVANTAMIENTO

Se parte de los estudios sobre Piazza d'Oro de diferentes autores como Francesco Sirano “*Adriano, architettura e progetto*”, Charles-Louis Girault (2002: 105 – 112) “*Italia Antiqua*”, Graziella Conti (1970) “*Decorazione Architettonica della “Piazza d’oro” a Villa Adriana*”, Erik Hansen (1960) “*La “Piazza d’oro” e la sua cupola*” y Andrea Moneti (1992: 67 – 92) “*Nuovi sostegni all’ipotesi di una grande sala cupolata alla “Piazza d’Oro” di Villa Adriana*”.

Los estudios realizados hasta ahora no han permitido aclarar de forma concluyente el tema de los frisos de caza, y su relación con los frisos de tipología de *thiasos marino* de *Piazza d’Oro*. La utilización de nuevas tecnologías ayuda a clarificar su situación, lo que contribuye a resolver dicha incógnita. Para ello, se ha realizado un nuevo levantamiento con tecnologías avanzadas, mediante la interacción de diferentes técnicas de levantamiento.

La documentación gráfica de *Piazza d’Oro* que se presenta, es resultado de la combinación de levantamientos con métodos topográficos, con tecnología escáner láser 3D y con técnicas fotogramétricas. Cabe diferenciar entre el levantamiento arquitectónico más genérico, y el levantamiento arqueológico más preciso, fundamentalmente de los frisos de tipología de caza. En ambos casos los primeros resultados son modelos virtuales 3D que reproducen, con considerable precisión, la forma real del objeto. A partir de esos modelos se ha generado toda la documentación gráfica necesaria para el desarrollo de las diferentes fases de la investigación.



Figuras 6.10 y 6.11. Imágenes de los dos tipos de escáner láser usados en el levantamiento.

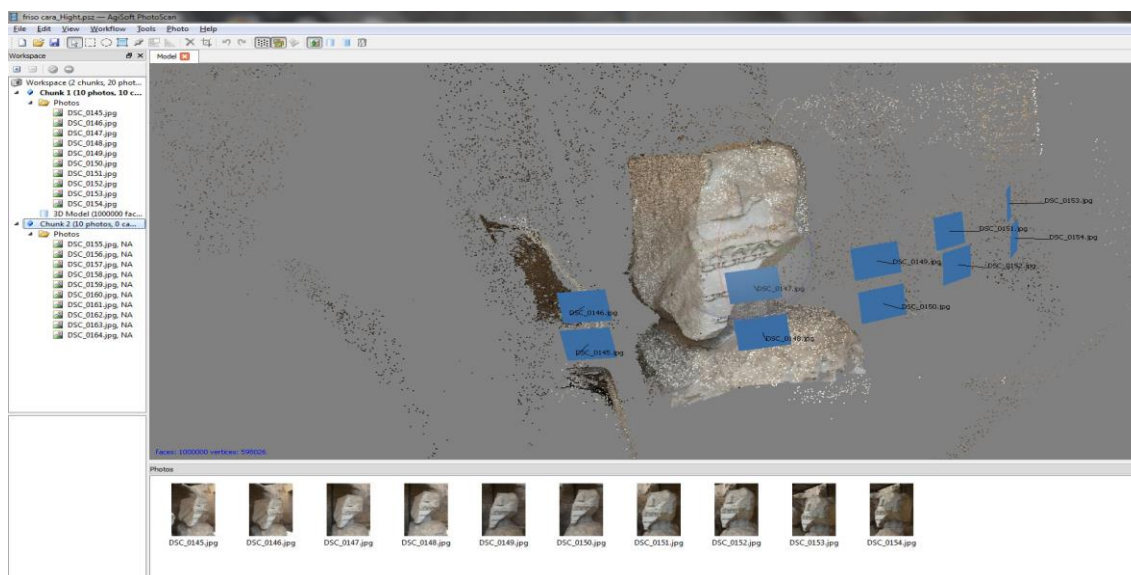


Figura 6.12. Imagen del proceso de *Image-based Modelling* en el programa *Agisoft PhotoScan*.

i. Láser escáner

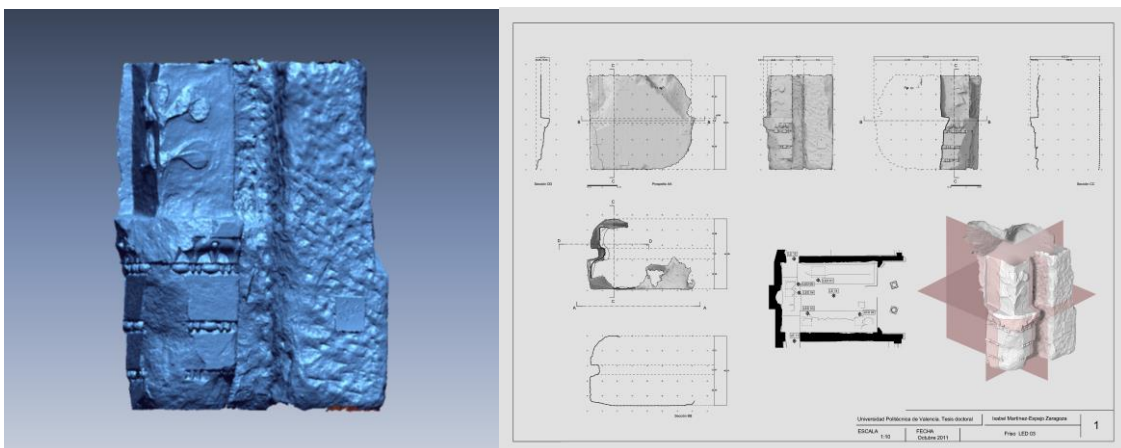
Cuando se escoge este caso, se elige porque se comprende la necesidad de un estudio en profundidad de los restos del Palacio, para poder hacer una anastilosis, teniendo una base sólida sobre la que hacer una nueva hipótesis. Observando la *Piazza* con atención, es fácil darse cuenta de toda la información que aún conserva en sus restos: huellas que dejaron los soportes de antiguos revestimientos, bases de columnas, partes de frisos que un día adornaron el lugar... Todo esto se encuentra en la *Piazza*, a la intemperie sufriendo un grado que puede ser irreversible ya en algunos casos, y en otros lo será si no se realiza una intervención.

Teniendo esto presente, se considera importante realizar un levantamiento tridimensional de alta precisión, para ese estudio detallado, considerado obligatorio. Una vez decidido, analizando la plaza es fácil comprobar que se presentan dos escalas de detalle diferentes, uno a nivel arquitectónico, debido a la magnitud de la *Piazza*, y otro más a nivel escultórico o decorativo. Estudiándose la oferta actual de instrumentos para el levantamiento tridimensional de alta precisión, se decide utilizar dos escáner láser diferentes, uno que utiliza la tecnología de medición de distancia a tiempo de vuelo (TOF), el *Laser Scanner Leica C10*, y otro que realiza la medición por sistemas de triangulación, el *NextEngine Model 2020i Desktop 3D Scanner*. La diferencia de estos dos escáneres a parte de su forma de trabajo es su máxima precisión, mientras que la precisión de un escáner a tiempo de vuelo es sub-milimétrica, la del escáner de triangulación es de milésimas de milímetro. Esto se traduce, a efectos prácticos, en que para un levantamiento arquitectónico la necesidad de precisión será cercana al centímetro, siendo útil el primer tipo de escáner, y para la decoración, la precisión necesaria será milimétrica, siendo interesante el segundo tipo de escáner. Teniendo en cuenta estos datos se realizan en paralelo el levantamiento de la *Piazza* en general y el de algunos frisos de caza en particular.



Figuras 6.13 y 6.14. En la imagen de la izquierda se puede observar la toma de datos con el escáner a triangulación de uno de los frisos de caza. En la imagen de la derecha se ve la puesta en marcha del escáner para el barrido de una de las zonas de la *Piazza*.

En el caso de los frisos, la toma de datos con escáner láser 3D se combina con técnicas de *Image-based modelling*, que se comentarán en el siguiente apartado. Dada su mayor precisión, los datos obtenidos con escáner se utilizan como documentación base. Se procura además que sea la herramienta preponderante en el levantamiento de las partes que presentan decoración. En cuanto a las zonas carentes de ornamentación, así como aquellas cuyas condiciones no son óptimas para la operatividad del escáner (distancias, luminosidad...), son integradas con técnicas fotogramétricas. El resultado de la combinación de ambos métodos es la generación de réplicas virtuales 3D de cada una de las piezas arqueológicas. Partiendo de ellas es posible producir una ficha gráfica individualizada, combinando las plantas, los alzados y las secciones más relevantes junto a un esquema de identificación arqueológica y una vista en perspectiva donde se reconocen los planos de sección.



Figuras 6.15 y 6.16. Imagen de uno de los frisos escaneados, una vez terminado el proceso de mesh editing y a la derecha imagen de su ficha gráfica.

En el ámbito arquitectónico, se realiza un levantamiento con 18 estaciones situadas en toda la zona de interés del lugar. Éste a su vez, es apoyado con un levantamiento topográfico que permitirá en un futuro unirlo a otros modelos 3D de la Villa y tener un modelo general de la Villa Adriana.

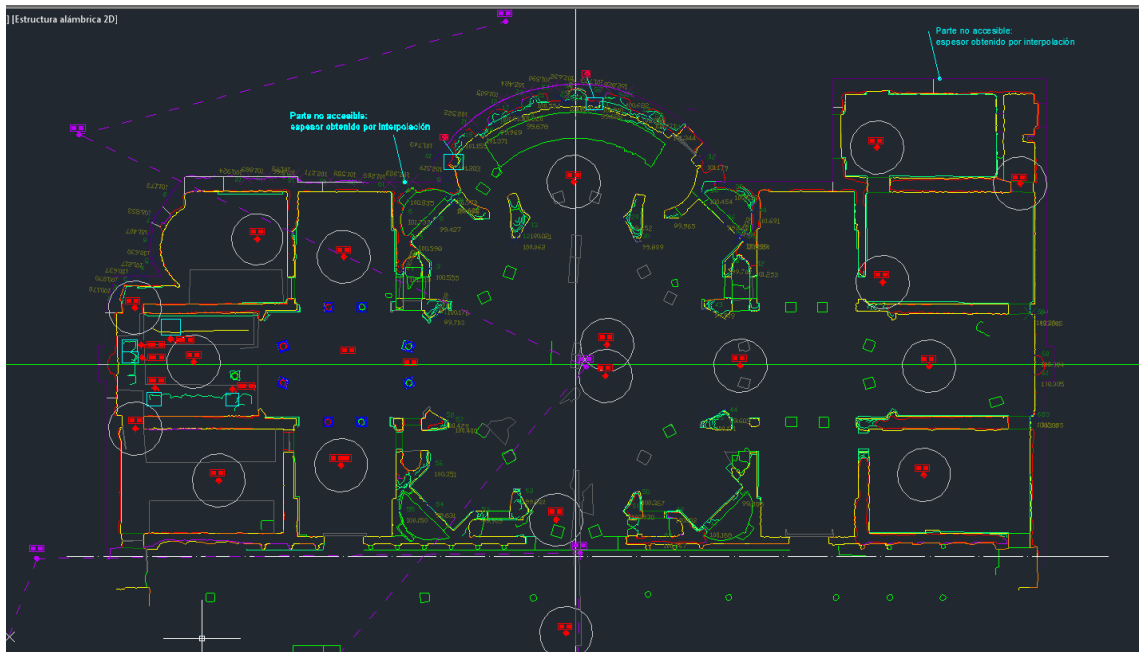


Figura 6.17. Planta de la *Piazza d'Oro* en la cual están reflejados los puntos de posición del escáner, reflejados mediante un círculo gris y un centro rojo.

El trascurso de trabajo de los levantamientos, tanto para los frisos como para la arquitectura de la Piazza sigue el mismo proceso que el expuesto en el caso de Les Coves de Vinromá, usando el procedimiento de las claves para llegar a las fichas de los frisos, y el procedimiento de la capilla real para la Piazza. Sin embargo, en el caso de la Piazza se realizan algunas variaciones, mientras que para la capilla solo había un escaneado, y la unión con los otros escaneados se hace de modo manual en el *Cyclone*, en este caso se utilizan target propias del escáner para hacer el registro de las capturas de modo automático. Así, se realiza una red, relacionando todos los escaneados. Esto permite en el software *Cyclone* mediante un solo proceso colocar todos los escaneados alineados. Además, de que este escáner tiene una calibración interna que permite tener siempre definido el eje z, marcando el eje vertical en todos los escaneados.



Figura 6.18. Imagen de un de los *target* usados para la alineación de las capturas.



El levantamiento realizado en la Piazza permite también sacar modelos 3D de las columnas y de las partes del entablamento, que permite, en un segundo paso, el estudio del orden arquitectónico usado en este palacio.

ii. Image-based Modelling

Durante el proceso de *Range-based Modelling* en Coves de Vinromá se observaban algunos problemas que van unidos al escáner láser a triangulación, y es que requiere unas condiciones muy precisas para obtener modelos perfectamente cerrados. Esto se debe a que necesita distancias precisas (aproximadamente 2 palmos, 40 cm.), la luz adecuada, etc. Visto esto, en el segundo caso de estudio, se busca una alternativa para solventar los problemas encontrados en el primero. Así se realizan las primeras experimentaciones con técnicas de *Image-based Modelling*.

Para realizar los modelos poligonales de los frisos mediante dicho proceso se utiliza el software *Agisoft PhotoScan*. Este programa presenta la ventaja y al mismo tiempo la limitación de que realiza todo el proceso casi automáticamente, debiendo solo impostar una serie de opciones que permitirán llegar a un modelo de polígonos tridimensional.

El proceso consiste en realizar un reportaje fotográfico teniendo en cuenta que las fotos debe tener aproximadamente un 60% de superposición y al ser posible exista una convergencia entre ellas. En el caso de los frisos se realiza un fotografiado rodeando el objeto y a dos alturas diferentes, dando a una de ellas (la superior) una pequeña inclinación hacia la zona central para permitir la convergencia entre ellas. Realizadas las fotografías, se introducen en el *Agisoft PhotoScan*. En él, se realiza un procedimiento que está compuesto de 3 fases: 1º Calibración y orientación de las imágenes; 2º Restitución 3D y generación de superficies; 3º Generación de la textura foto-realista.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral

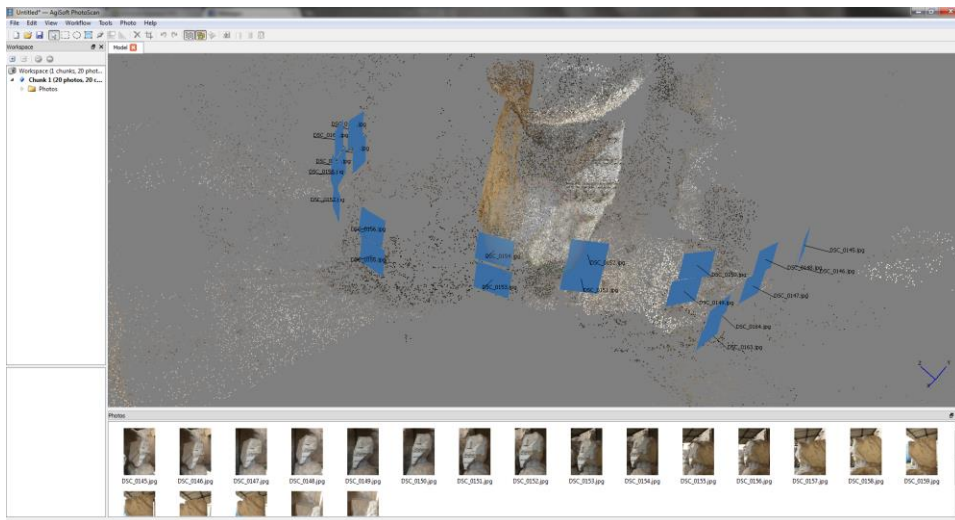


Figura 6.19. Imagen de la primera fase del proceso de *Image-based Modelling*: calibración y orientación de las imágenes.

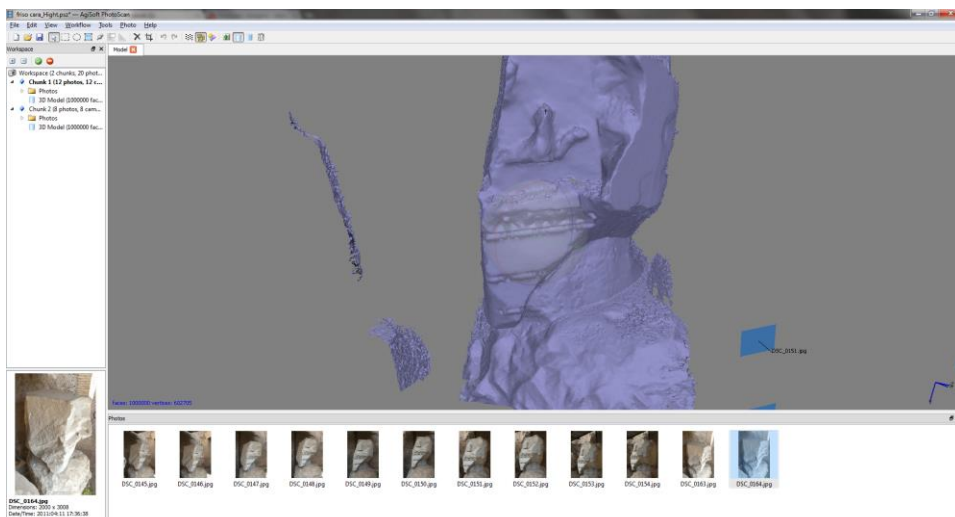


Figura 6.20. Imagen de la segunda fase del proceso: Restitución 3D y generación de superficies.

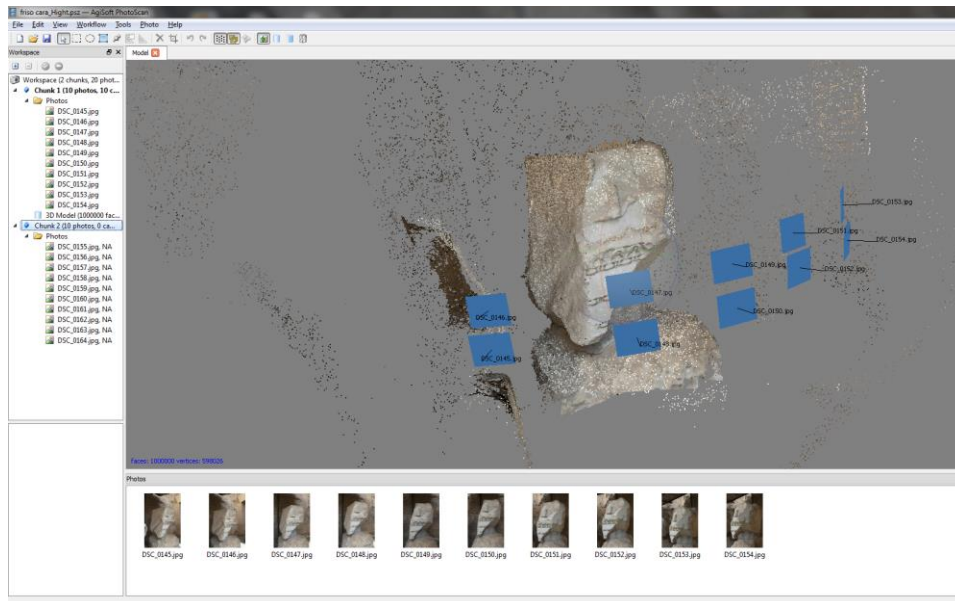
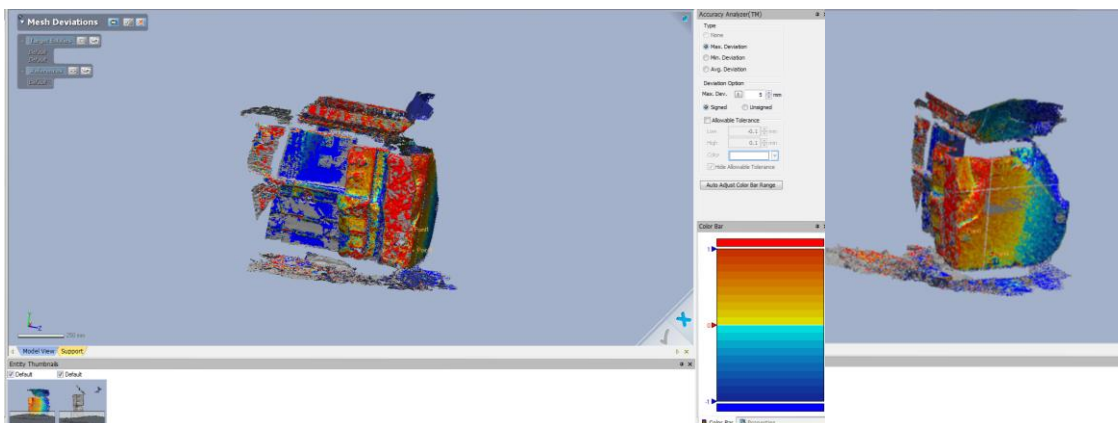


Figura 6.21. Imagen de la tercera fase del proceso: Generación de la textura foto-realista.

Terminado el proceso y teniendo el modelo, se realiza el escalado para tener el modelo en verdadera dimensión, ya que en el caso del *Image-based Modelling*, los modelos resultantes no tienen las medidas del modelo real. Así aprovechando el modelo escaneado, se selecciona una medida en 3D de la mayor longitud posible, para introducir el menor error en proporción, y se escala (el programa *Agisoft PhotoScan* solo permite el ingreso de una medida para escalar).

Con el modelo en verdadera dimensión, éste se exporta al software *Rapidform XOR3*, donde se puede comprobar la desviación entre el modelo realizado con *Range-based Modelling* y éste. Al comprobar que las diferencias son asumibles, se utiliza el modelo obtenido por procesos fotogramétricos para integrar el modelo de escáner láser.



Figuras 6.22 y 6.23. Imágenes de la comprobación de la desviación entre los dos modelos realizados con dos técnicas diferentes.



D. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

PIAZZA D'ORO

Realizado el levantamiento con escáner láser, se pasa a la fase de tratamiento de los datos. En el caso del levantamiento arquitectónico, el primer software utilizado es el “*Cyclone*”, programa propio del escáner (Leica C10), y que permite elaborar las nubes de puntos. El primer paso en este caso será la alineación de las diferentes nubes para situar todas en el mismo sistema de referencia, para una posterior conversión en *mesh*.

En la misma aplicación se genera el plano de planta, realizando varias secciones horizontales a distintos niveles sobre el modelo de nube de puntos, dibujadas como poli-líneas. El tratamiento de su representación es el de una topografía, asumiendo el carácter irregular de las formas de la ruina, carente de líneas arquitectónicas definitorias. Así se realizan tres secciones, buscando una estrategia que permitiera obtener la máxima información posible, sin superposición de datos semejantes. Asignando la cota $\pm 0,00$ m al punto de estacionamiento central, las secciones realizadas son:

- Una a + 0,10 (plano rasante) como soporte base, a nivel de las bases de las columnas y los rodapiés, zona con menos faltantes y mayor definición formal, con algunas reconstrucciones parciales que nos ayudan a entender el perfil cumplido.
- Una a + 0,50 (plano medio o arqueológico) que alcanza los arranques de la máxima cantidad posible de fábricas, al tiempo que permite reconocer casi todos los espacios.
- Una a + 1,50 (plano alto o arquitectónico) por encima de la altura de los antiguos zócalos, alcanzando los elementos emergentes que todavía quedan en pie o que fueron reconstruidos en época posterior.

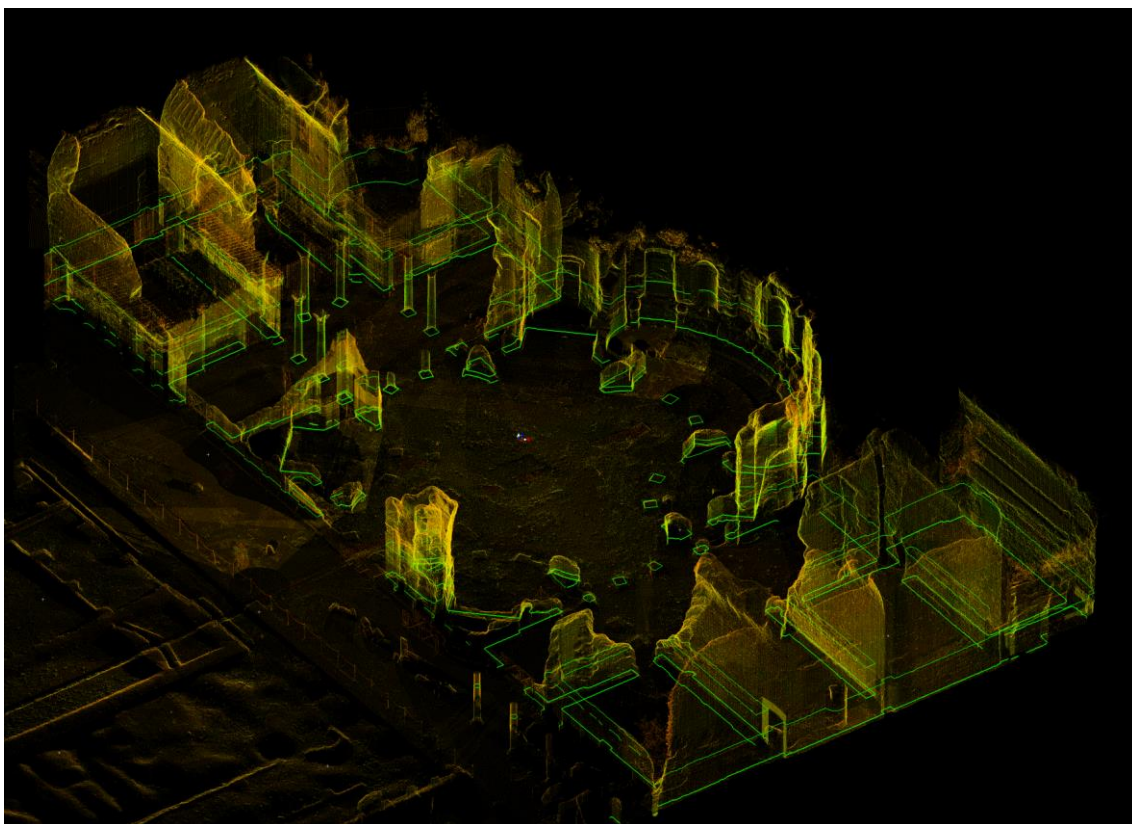


Figura 6.24. Imagen de la nube de puntos en la que se pueden contemplar los tres planos de sección.

Una vez generada la planta de las fábricas con esas 3 líneas de nivel, se añade la información restante del firme (relieve, textura...) realizando un “*screenshot*” proyectado sobre el plano de cota cero (figura 6.25). Así, se obtiene la planta definitiva del levantamiento, totalmente definida, de alta precisión y fiabilidad, que permitirá realizar estudios detallados en fases posteriores.

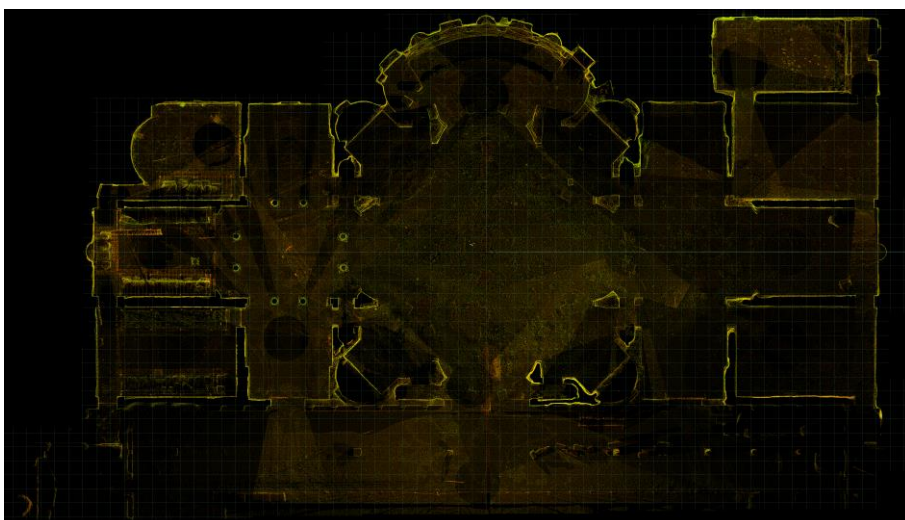
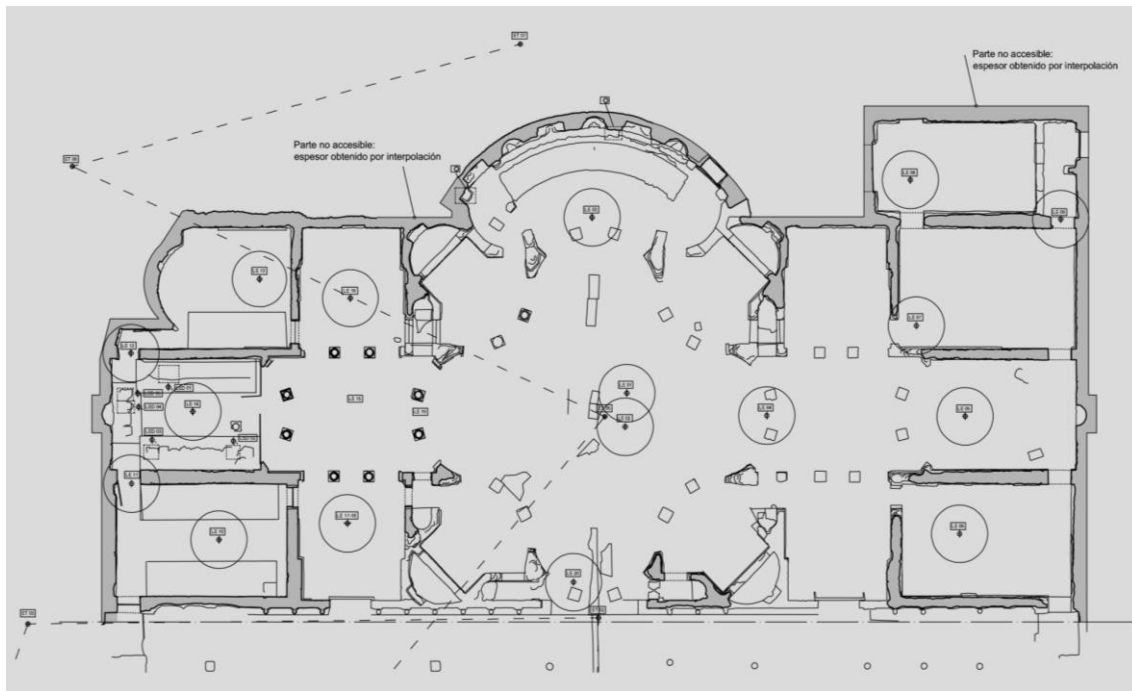


Figura 6.25. “*Screenshot*” de la planta proyectada sobre el plano de cota cero.



- ⊕ Levantamiento topográfico realizado por: M^a Teresa Gil Piqueras
Pablo Rodríguez Navarro
- ⊕ Levantamiento escáner láser: Sergio di Tondo
Filippo Fantini
Isabel Mtnez-Espejo Zaragoza
- ⊕ Levantamiento fotogramétrico: Pablo Rodríguez Navarro
Filippo Fantini

- ⊕ LED 00 Laser Esc Det
- ⊕ LE 00 Laser Esc
- ⊕ ET 00 Est Total

Figura 6.26. Imagen de la planta de la Piazza d'Oro como resultado de la elaboración de los datos obtenidos con los diferentes tipos de levantamiento (2011)

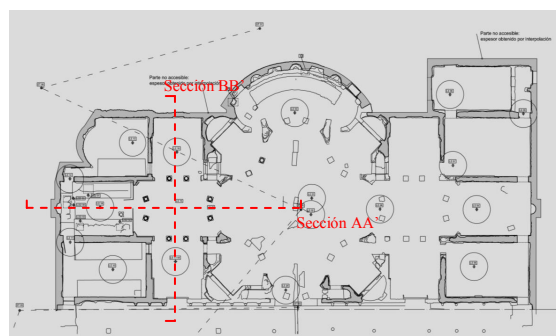
Partiendo del modelo completo de nube de puntos se genera un modelo poligonal 3D mediante representación de superficies de subdivisión. Para ello es necesario seguir todo un proceso realizado en diferentes programas. Primero se dividen en estancias la villa desde las nubes de puntos de *Cyclone*. Después, utilizando los software *Geomagic* y *Rapidform XOR3*, se realizan modelos *mesh* de cada una de las estancias a alta resolución (HP). Será necesario realizar también modelos de baja resolución (LP) para poder usarlos en los programas que no soportan modelos tan “pesados”, pero mediante las superficies de subdivisión comentadas, realizadas en *Modo*, será posible mantener el nivel de detalle. Teniendo los modelos a baja resolución se consigue generar un modelo que integra todas las estancias.

Teniendo el conjunto de estancias, con niveles de detalle variables, se registran las huellas de los elementos arquitectónicos en la ruina, a fin de estudiar los vestigios de la posición del orden arquitectónico en los alzados. Con este criterio, y sobre este segundo modelo digital, se realizan las dos secciones verticales principales que completan los documentos gráficos del levantamiento base.



Figuras 6.27 y 6.28. Arriba sección transversal (sección AA') de la zona de estudio de la Piazza d'Oro. Abajo sección longitudinal (sección BB') de la misma zona.

Figura 6.29. Planta aclaratoria de las secciones.



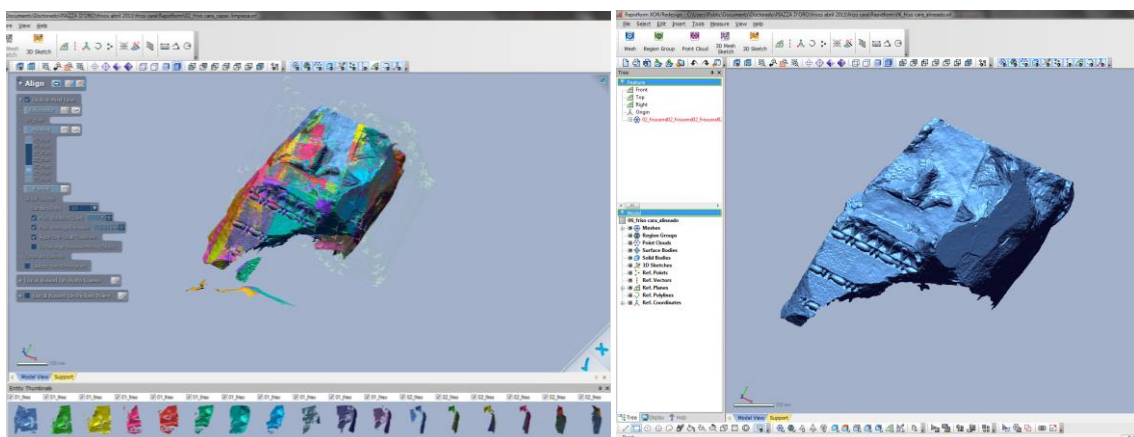
FRISOS:

Por otra parte, paralelamente a las elaboraciones de los modelos arquitectónicos, se realiza el tratamiento de datos de los frisos de caza. Como se comenta en el apartado de metodología, el modelo final de la mayoría de los frisos escaneados, son el resultado de una integración del

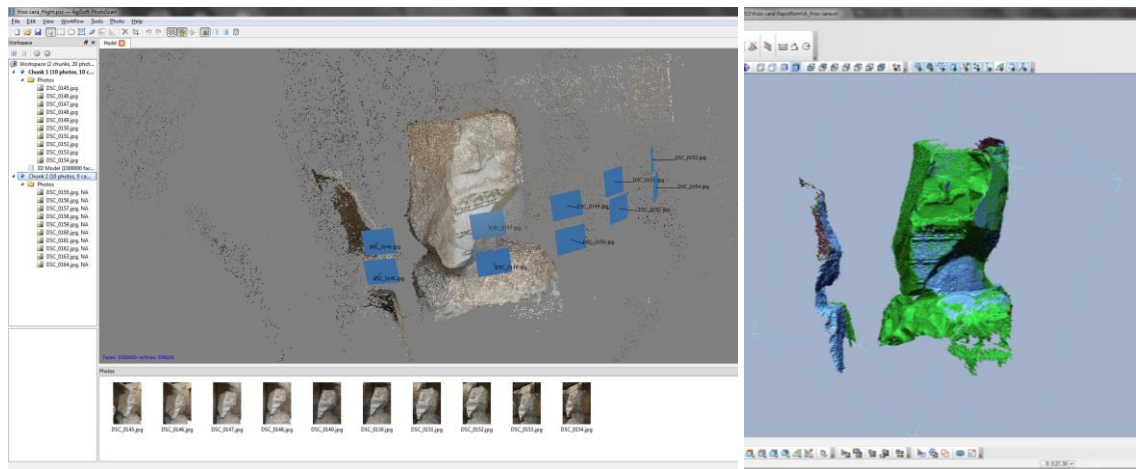
modelo obtenido mediante *Range-based Modelling* y el obtenido mediante *Image-based Modelling*.

Se utilizará en todos los casos el modelo obtenido con escáner láser como modelo base, por tener una mayor precisión, usando el otro para reintegrar las zonas que no se han podido capturar con el escáner por problemas de distancias, luz solar, etc. También se usarán las técnicas fotogramétricas para la captura de las zonas sin decoración, debido a que con el modelado, a través de *Agisoft PhotoScan*, la velocidad de obtención es mayor, ahorrando tiempo.

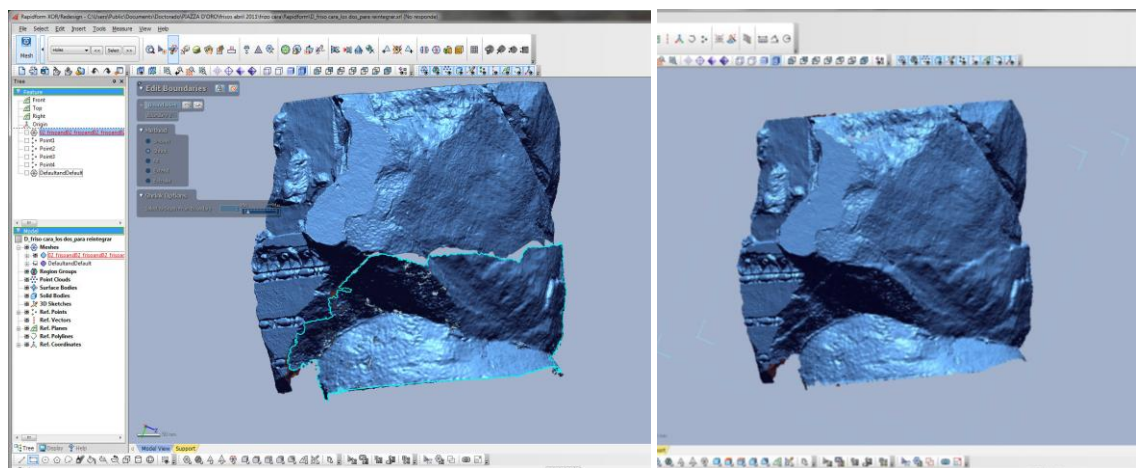
Los pasos seguidos para la integración, una vez obtenidos los dos modelos han sido: primero comparación de la desviación entre ambos modelos, como comentábamos en el apartado de metodología, y una vez ratificada una desviación aceptable, se procede a tomar del modelo del *Agisoft PhotoScan* la parte necesaria. Debe aclararse que cuando se hace el modelo en *Agisoft PhotoScan* no se hace solo de la parte faltante del modelo del escáner, sino que se hace el modelo completo. Sin embargo, las partes que ya están presentes en el modelo del escáner, se deberán eliminar en el otro, para no tener *mesh* duplicadas que causarían errores. Por ello, se deben eliminar con mucha delicadeza las partes coincidentes entre los dos modelos y controlar con especial atención las zonas de bordes entre ambos modelos para que no se presenten superposiciones. Teniendo esta parte controlada, se pasa a la fase de unión de ambas *mesh*. Para realizar esta unión se utiliza un comando del software *Rapidform XOR3*, dentro del relleno de huecos, que consiste en hacer pequeños puentes entre las mallas. Concluidas las uniones, se rellenan los huecos subsistentes, y con eso se ultima el modelado de los frisos.



Figuras 6.30 y 6.31. Imágenes del proceso para obtener el modelo con técnicas *Range-based modelling*. A la izquierda se están alineando las diferentes *mesh* obtenidas con el escáner a triangulación y a la derecha se presenta el modelo una vez se han fusionado las *mesh* en una sola.



Figuras 6.32 y 6.33. A la izquierda, modelo obtenido con técnicas de *Image-based Modelling*, a la derecha, imagen de las dos *mesh* superpuestas, en azul la del escáner y en verde la del *Agisoft PhotoScan*.



Figuras 6.34 y 6.35. Imágenes de la integración de ambas técnicas para obtener el modelo final (a la derecha)

E. ANÁLISIS

ESTUDIOS TIPOLÓGICOS

Cuando se comienza a plantear la idea de reconstruir virtualmente parte de la edificación, hay partes que se pueden inducir hipotéticamente a partir de aquello que aún queda en pie. Se distinguen las bóvedas de cañón, gracias a los arranques que todavía se conservan. La posición de los frisos, por las trazas que se pueden observar aún en los muros. La bóveda de crucería de la estancia que se sitúa al fondo del lado Este de la plaza. Sin embargo, también surgen dudas en algunos elementos no tan evidentes. En esos casos la hipótesis se ha formulado mediante transposición de otras soluciones tipológicamente similares, observadas en las proximidades, bien en la misma Piazza d'Oro, bien en sus proximidades dentro de Villa Adriana.

Entre los elementos no tan evidentes, se observa la finalización de las cubiertas de las estancias de los dos laterales del ninfeo. La primera opción considerada es el acabado mediante cubiertas inclinadas a dos aguas (figura 6.36). Sin embargo, se decide analizar la zona de estudio para buscar elementos que sugieran la posible solución y estudiar las tipologías utilizadas en las proximidades buscando esa armonía formal característica de los romanos. Al realizar el análisis, se encuentran las trazas de un arco en el muro de la estancia intermedia del grupo de las 3 estancias de la zona del Este. Este arco, en dicho muro, no parece cumplir ninguna función, sin embargo, se considera la posibilidad de que se presente como un simétrico de uno situado precedentemente en la pared opuesta. Estudiando, como se comentaba, las tipologías



Figura 6.36. Croquis de la hipótesis inicial

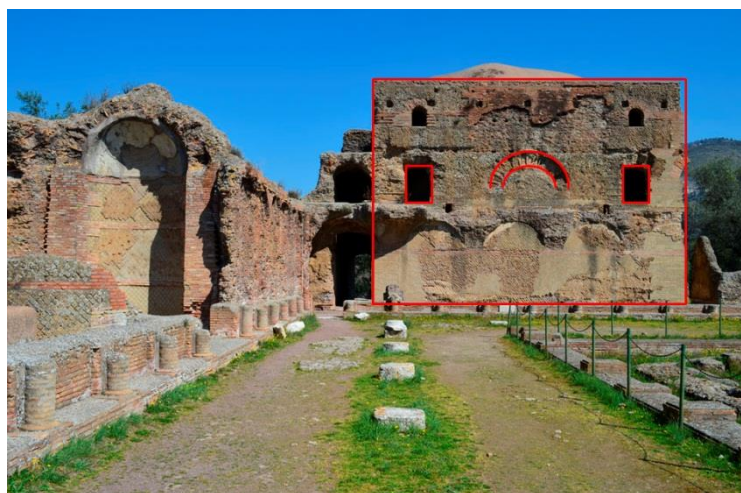


Figura 6.37. Imagen de la edificación situada al Noreste de la Piazza.

empleadas en la zona, se descubre un uso similar al de la edificación que se encuentra en la misma Piazza d'Oro, pero cercana al vestíbulo, situado también en la zona del Este (figura 6.37).

Planteadas la hipótesis de finalización de la parte de las 3 estancias contiguas, queda otro elemento por resolver: el cierre de las estancias que se sitúan en la parte delantera y posterior del atrio. Así continuando con el estudio tipológico de la zona, se encuentra en el vestíbulo (figura 6.38), una combinación de triángulos y arcos alternos que situándolos en la zona de estudio, concordarían con coherencia integrando el arco comentado en el párrafo precedente. Por lo tanto, las dos estancias presentarían cubiertas a dos aguas, alternando con el arco de la estancia intermedia. Con esta hipótesis quedan definidas todas las estancias que cierran el atrio (figura 6.39).



Figura 6.38. Imagen del vestíbulo de *Piazza d'Oro*

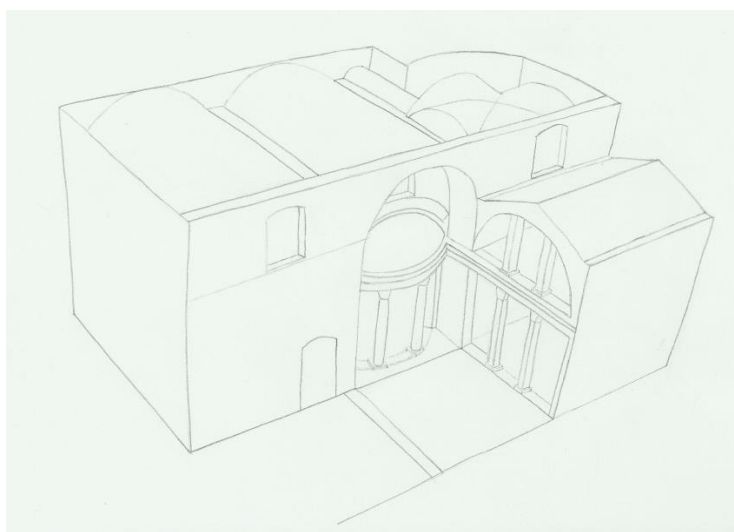


Figura 6.39. Croquis de la hipótesis final.

De este modo, la única pregunta que queda en el aire es la cubierta final del conjunto de las 3 estancias contiguas. Entre otras, cabrían dos soluciones. Una que tuviese una cubierta única, a un agua, con inclinación hacia el exterior, o sea, hacia la parte trasera. La otra solución sería que las bóvedas llevasen una capa aislante y que la cubierta quedase tal y como se ve en la figura 6.39, teniendo las limahoyas inclinación hacia las bajantes para la evacuación del agua.

El problema que se presenta en este caso, es que no se ha encontrado nada que pueda ratificar una de estas dos soluciones. Por ello, se dejaría así, ya que no se considera oportuno intervenir introduciendo elementos inventados.

ESTUDIO DEL MÓDULO CORINTIO

Paralelamente, y de forma independiente, se restituye un fragmento del orden arquitectónico partiendo de sus restos. Se toma como referencia la proporción del orden corintio según Vitruvio. Siguiendo dicho canon, las columnas deben tener una altura total, incluyendo basa, fuste y capitel, de 9 diámetros y medio (medio para la basa, 8 para el fuste y uno el capitel). Sin embargo, asumiendo que en la época imperial las medidas de Vitrubio se aplicaban con cierta flexibilidad, se comprueba que los capiteles corintios de Piazza d'Oro superan ligeramente la altura canónica, como era habitual en los casos de capiteles con decoraciones más complejas, ajenas al modelo vitruviano. También los entablamentos (arquitrabe, friso y cornisa), decorados con un repertorio ornamental particular, superan en altura las proporciones vitruvianas.

En todo caso las medidas, incluso cuando presentan diferencias respecto a las proporciones canónicas, se ajustan a unidades métricas romanas prácticamente exactas. Por ejemplo, comparando el diámetro en el imoscapo del fuste de nuestra columna con las medidas romanas (1 pie romano = 295,6 mm), obtenemos que 1 diámetro imoscapo = $442,404 \text{ mm} / 295,6 = 1,4966 \approx 1,5$ pie romano = 6 palmos = 1 codo.

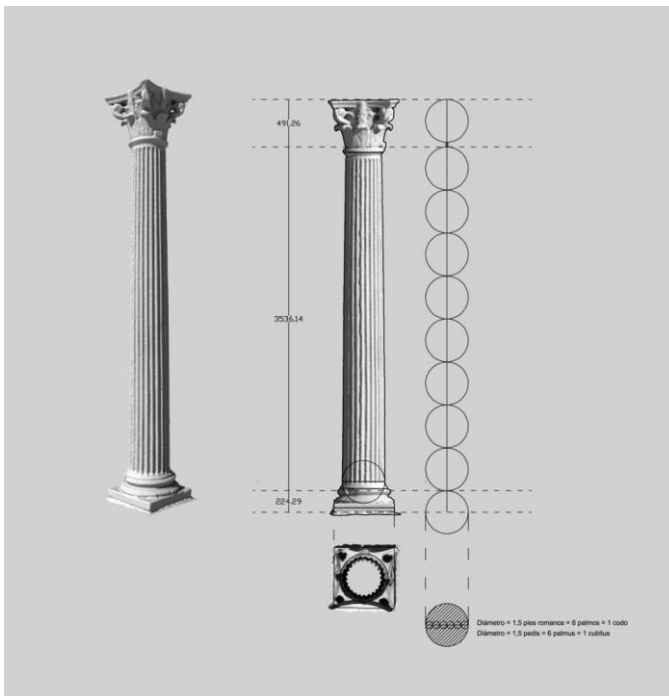


Figura 6.40. Imagen de una columna corintia de la Piazza d'Oro, obtenida a partir de la nube de puntos sacada con el escáner láser arquitectónico.

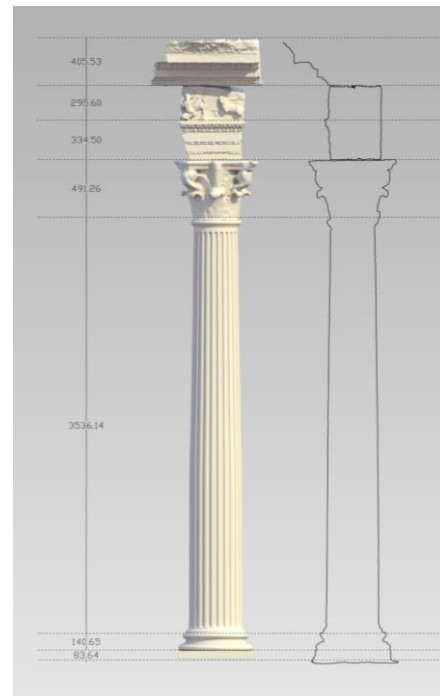


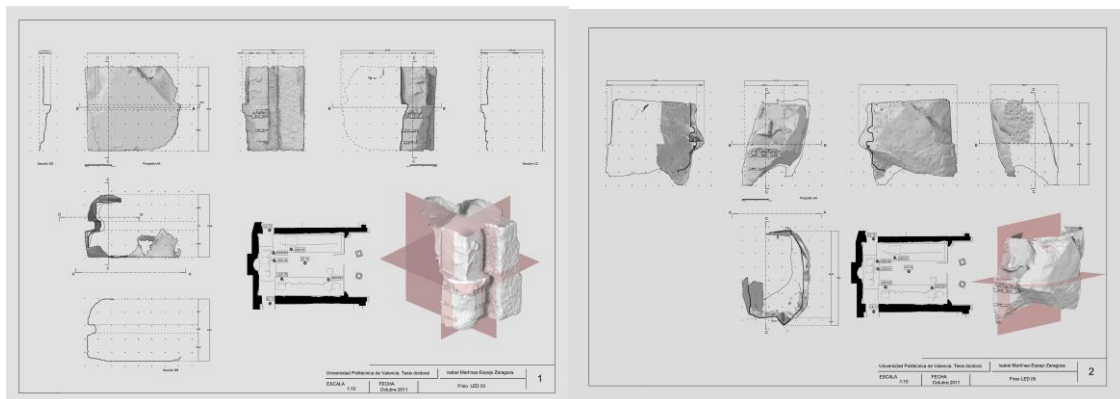
Figura 6.41. Imagen del módulo corintio obtenido a partir de la combinación de diferentes elementos escaneados

La restitución se realiza, en parte, mediante anastilosis virtual, partiendo de los diferentes restos arqueológicos conservados de piezas que formaban parte de las columnas y los entablamentos. Se escanean y los modelos 3D generados se montan digitalmente sobre el patrón vitruviano. Las zonas faltantes se restituyen con el volumen teórico del elemento, a fin de obtener un fragmento completo del orden arquitectónico, desde la basa hasta la cornisa. La principal aplicación de dicho fragmento es su utilización como patrón flotante en el estudio compositivo de la arquitectura en los alzados interiores.

ESTUDIO ESPECÍFICO DE LOS FRISOS

Para identificar la ubicación original de los fragmentos de los frisos se procedió a un examen de compatibilidad entre la geometría de las piezas y la de las fábricas del monumento en proyección horizontal. La forma de las primeras se analiza directamente en cada una de las fichas gráficas. La geometría de las fábricas se estudia en la planta obtenida en la fase de levantamiento.

La complejidad del trazado de la planta hace que muchos de los fragmentos de frisos conservados presenten múltiples caras, formando ángulos diversos entre sí. En los casos en que se identifican restos de decoración, la compatibilidad figurativa de los temas representados constituye un argumento relevante para identificar su ubicación.

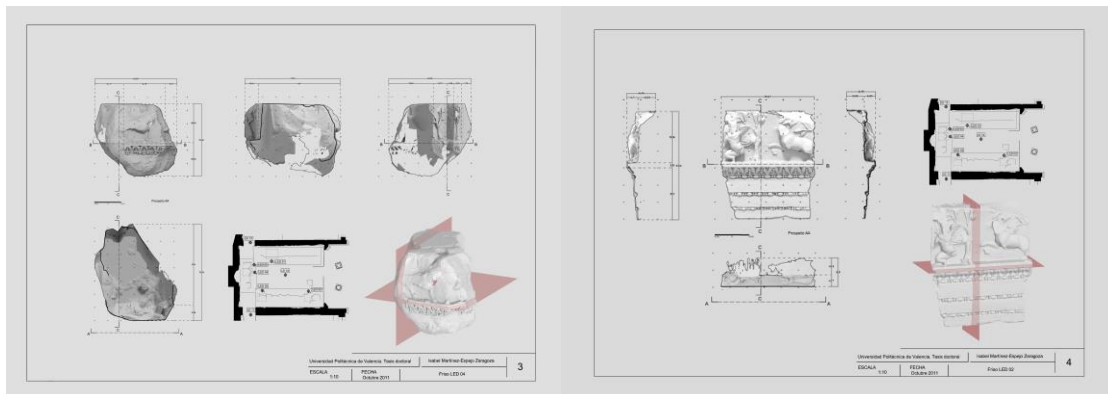


Figuras 6.42 y 6.43. Fichas 1 y 2 de los frisos escaneados.

La pieza de ejemplo (ficha 2, figura 6.43) presenta decoración solo en una de sus caras, y en la cara contrapuesta la superficie es plana con cierta rugosidad, probablemente para permitir su adhesión al muro. Además se aprecia que la cara decorada tiene una superficie dispuesta para recibir otra pieza adyacente, que define el arranque de un elemento no ortogonal.

Este otro ejemplo (ficha 3, figura 6.44) presenta decoración en sus dos caras opuestas, lo que permite definir el espesor exacto del entablamento exento. Además, presenta en una de las caras

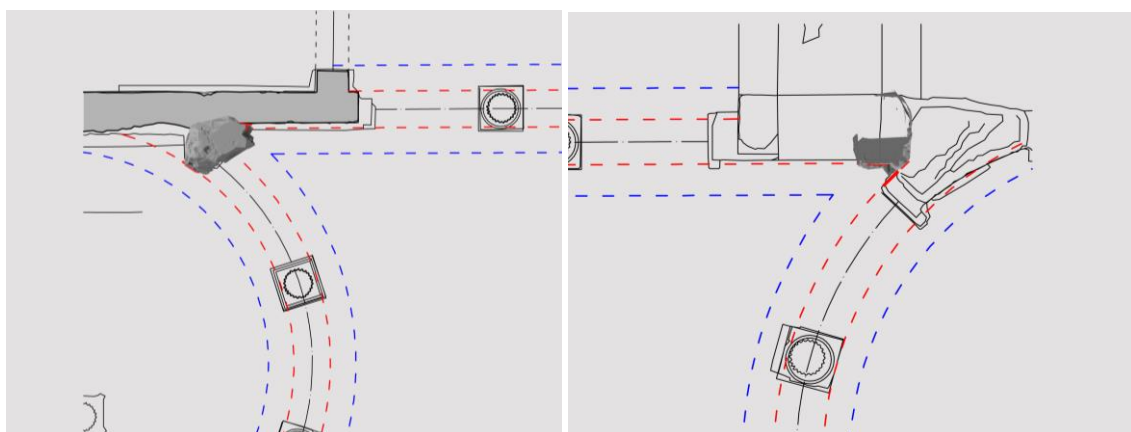
decoradas, ángulos en su plano horizontal que permiten deducir que esta pieza en uno de sus lados apoyaba directamente en el muro.



Figuras 6.44 y 6.45. Fichas 3 y 4 de los frisos escaneados

Según los estudios arqueológicos más concluyentes, los frisos de *thiasos marítimo* se encontraban situados en las zonas con presencia de agua. Por deducción recíproca se puede suponer que los frisos con temas de caza se encontraban situados en zonas donde no había presencia de agua.

Combinando los argumentos geométricos con los figurativos se puede llegar a identificar la situación de dos de los cuatro frisos escaneados en la campaña de abril de 2011.



Figuras 6.46 y 6.47. Imágenes de la demostración del posicionamiento de los frisos en su situación original.

El friso LED 04 (ficha 3) presenta decoración en dos de sus caras, siempre del mismo tema, y los ángulos permiten encontrar la posición justa ya que no se encuentra otro ángulo similar en *Piazza d'Oro*. Además, la decoración acaba justo en el punto en el que haría el encuentro con el muro.

El friso LED 05 (ficha 2) solo tiene decoración por uno de sus lados, el ángulo es coincidente y tiene una cara preparada para el apoyo de la pieza que continuaría formando el diseño justo.

Encontrada la situación de la pieza, se coloca el friso en su posición exacta comprobando que los ángulos coinciden tanto en vertical como en horizontal, a la vez que las trazas que quedan marcadas en los muros todavía en pie.

F. MODELOS OBTENIDOS

PIAZZA D'ORO

Como se comentaba en el apartado del análisis, una vez obtenida la nube de puntos en *Cyclone* y alineada, esta se exporta a otros programas para su edición. Sin embargo, las nubes de puntos son muy “pesadas” así que la exportación se debe hacer por partes. Esta edición realizada entre el *Geomagic* y el *Rapidform XOR3* lleva a obtener un modelo de alta calidad en *Rapidform XOR3*, pero demasiado pesado para trabajar (figura 6.48).

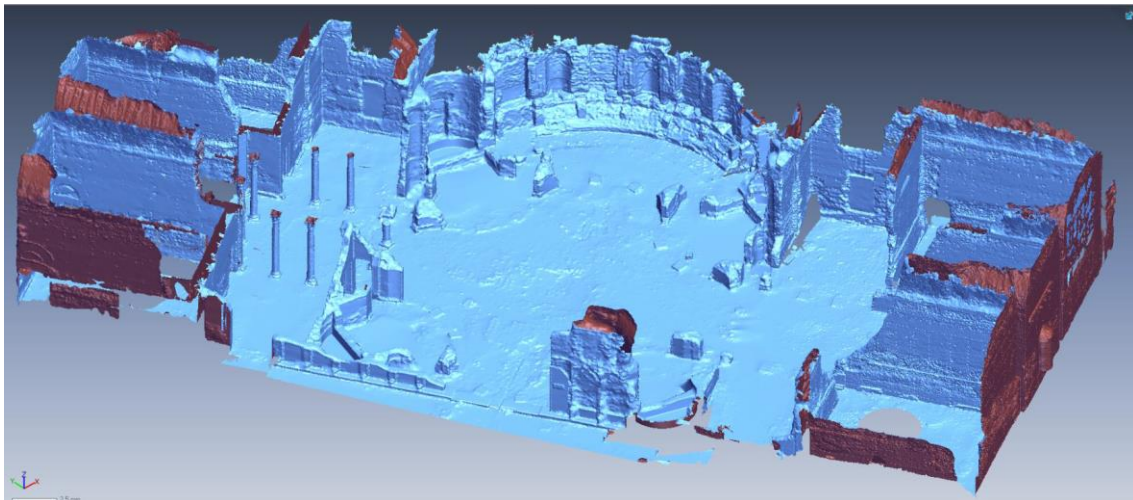


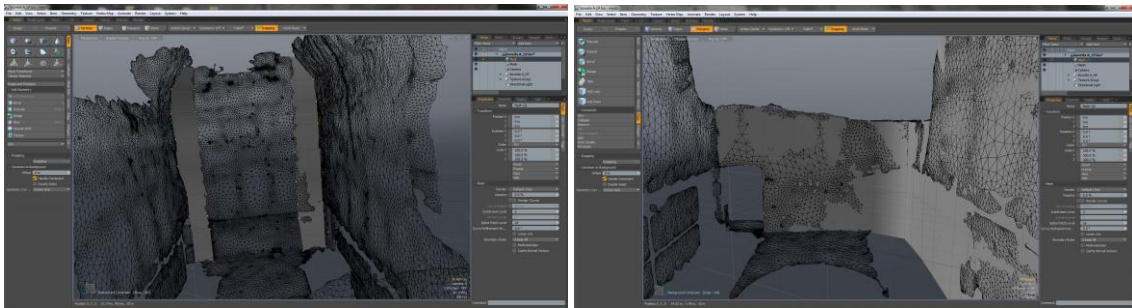
Figura 6.48. Modelo de toda la Piazza en Rapidform XOR3

Para permitir la manipulación y tener modelos utilizables se realizan modelos de superficies de subdivisión, con nivel de detalle variable. Para ello, se realiza un proceso que consiste en el siguiente:

Se comienza trabajando singularmente con cada una de las estancias. Esta que tiene un alta resolución (millones de polígonos) mediante en proceso de “*decimation*”, permite una reducción de la cantidad de polígonos (a miles de polígonos) y con ello su reducción de peso, en sentido de Mb. Teniendo los dos modelos, el de alta resolución, llamado en general HP (*High-Poly*) y el de baja resolución, LP (*Low-Poly*), se exportan ambos modelos al programa *Modo*. En este

programa se realiza un proceso llamado “*retopology*”. Este proceso es definido por Fantini y Martínez-Espejo Zaragoza (2012) como “*la modificación de la topología de un objeto*”, dentro del campo del *computer graphic*, y en el de las matemáticas. Sin embargo, se define como “*la rama que estudia las propiedades de una figura geométrica que no se modifican mediante el estirado, la flexión y homeomorfismos similares*”.⁵ En síntesis, se trata de un proceso que permite redibujar el objeto, pero solo a base de cuadrángulos.

En el caso de la Piazza d’Oro, se realiza el *retopology* de toda la zona de estudio. Se importa en el Modo cada uno de los modelos LP (por separado, se hace el proceso para cada uno de forma independiente) y se “calcan” utilizando polígonos cuadrangulares.



Figuras 6.49 y 6.50. Imágenes del proceso de *retopology* de una de las estancias de la Piazza.

Tras la fase de *retopology*, se realiza el *UVmap* de la estancia (figura 6.51), que permitirá en una segunda fase realizar los modelos a nivel de detalle variable.

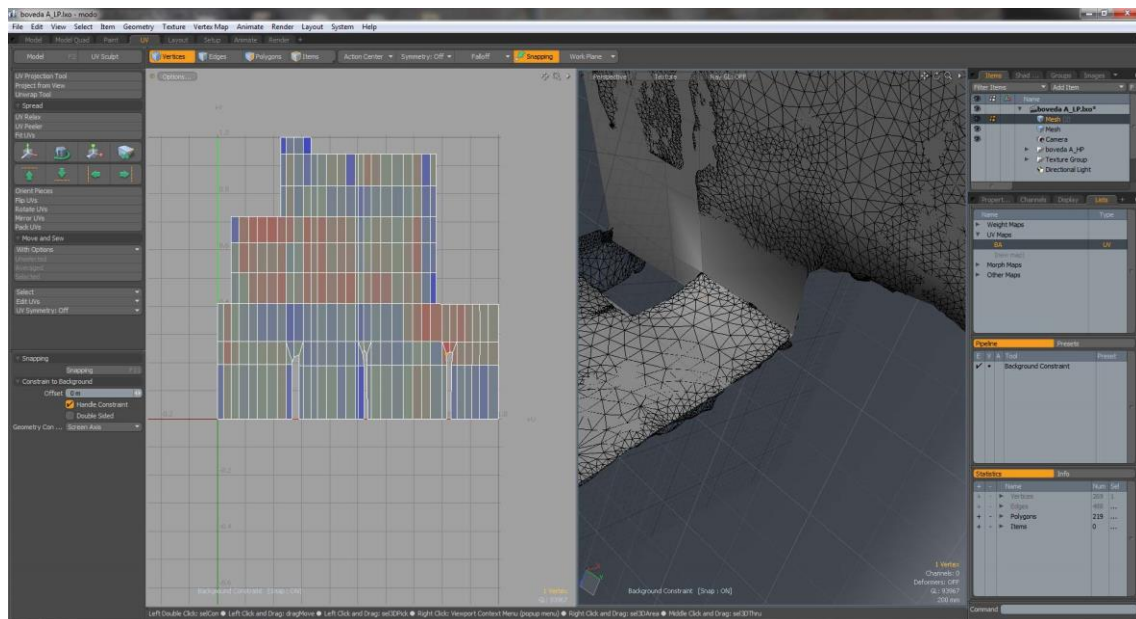


Figura 6.51. Imagen en la que se puede observar una de las UVmap.

⁵ Definiciones sacadas de Fantini, F. y Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2012.

Terminada la *UVmap* se introduce en el programa en el mismo sistema de referencia el modelo HP. Con el modelo HP, se realiza un proceso llamado “*baking*”, que permite copiar la información presente en el modelo HP, en el modelo a cuadrángulos, copiando dicha información en la *UVmap* (figura 6.52). Después de este proceso, se ha generado una nueva textura para el modelo generando así los modelos de niveles de detalle variables

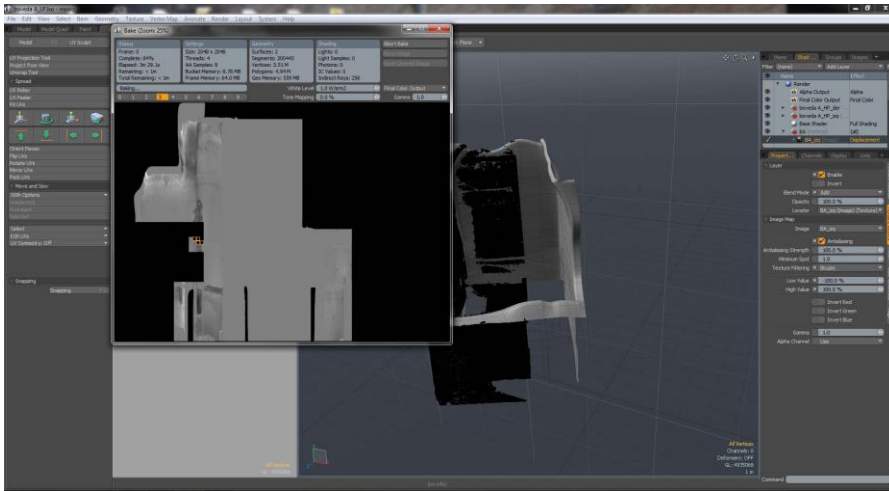


Figura 6.52. Screenshot del momento en el cual se está generando la nueva textura a partir del *baking*.

Realizando este proceso con todos se obtiene un modelo final de bajo “peso” y con un alto nivel de detalle de toda la plaza (figura 6.53)

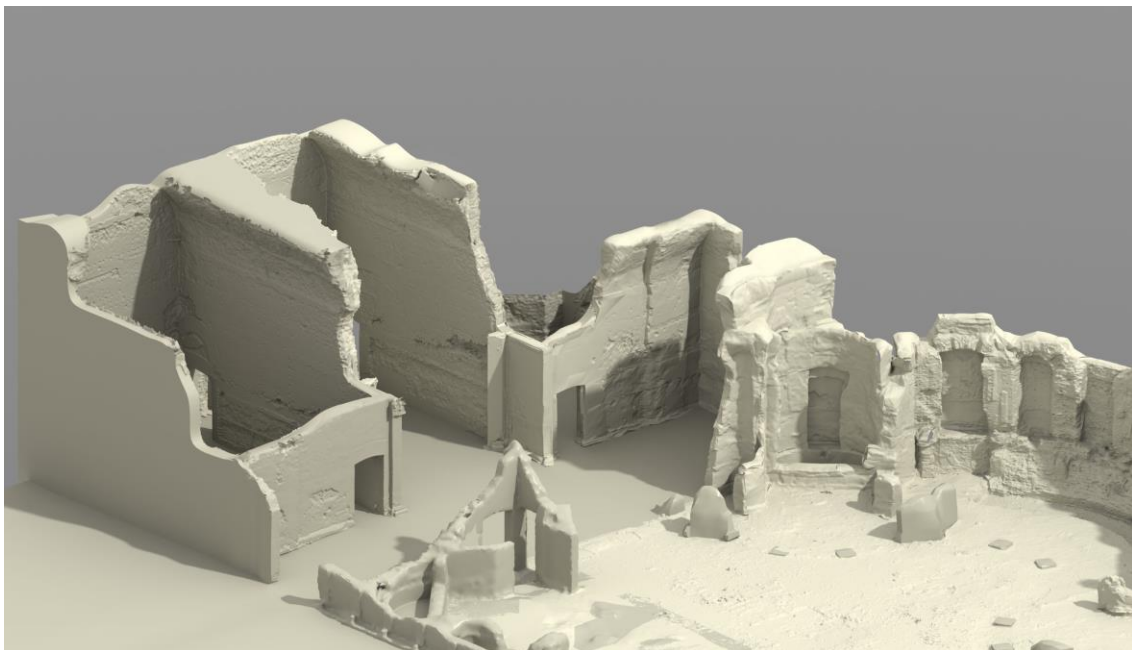
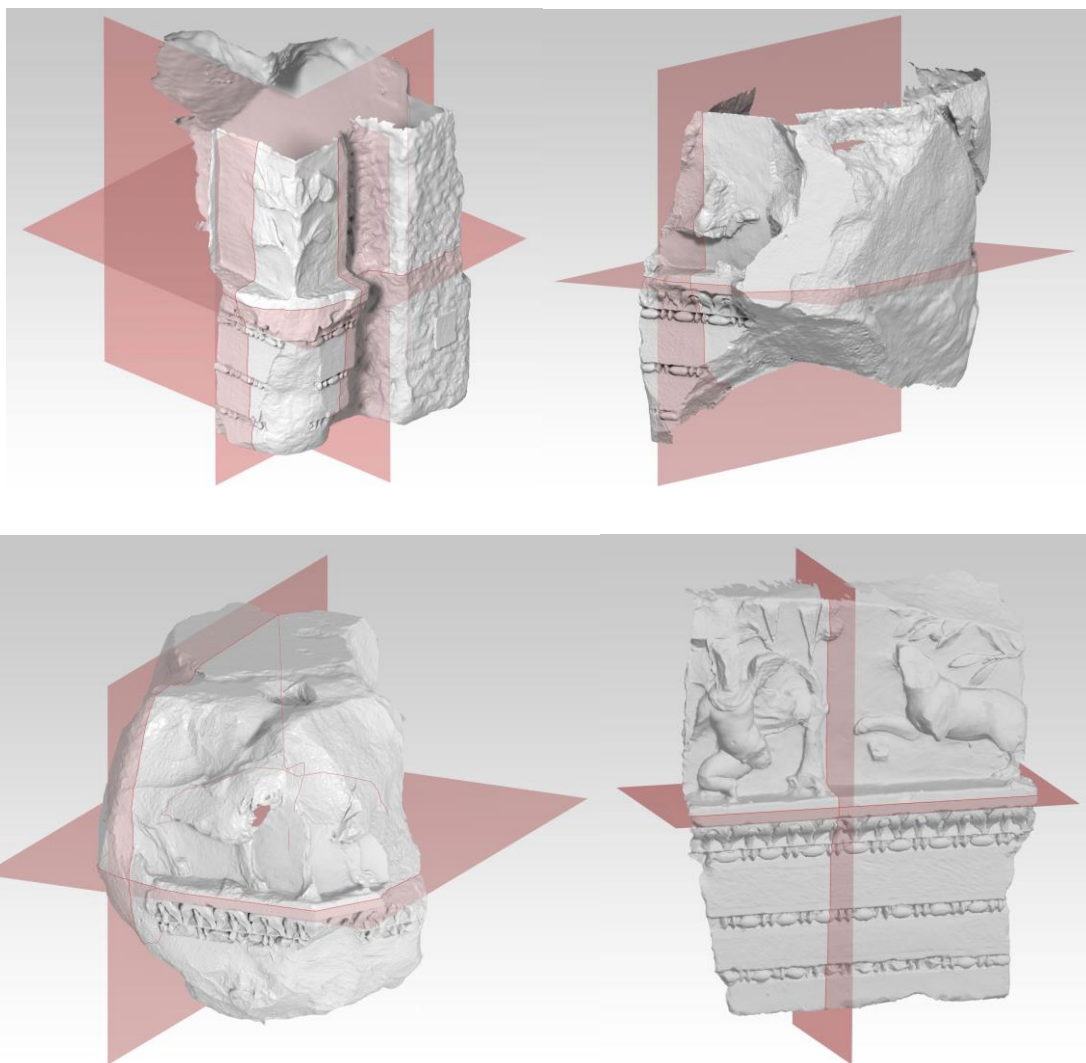


Figura 6.53. Render de la zona del atrio de la parte Este de la *Piazza* a partir de modelos de subdivisión a alto nivel de detalle.

FRISOS DE CAZA

A partir de los modelos de los frisos realizados mediante las dos técnicas comentadas y su reintegración, se obtienen modelos que permiten en algunos casos encontrar su posición original.



Figuras 6.54, 6.55, 6.56 y 6.57. *Render* de los cuatro frisos levantados y modelados.



G. RESULTADOS

PROPUESTA DE MUSEALIZACIÓN

Aprovechando este estudio detallado, y la generación de un modelo tridimensional de alta resolución, ha sido posible plantear una hipótesis museográfica, pormenorizada en la tesis del master de museografía realizado por la autora (Mtnez-Espejo Zaragoza, I., 2012).

Después del estudio realizado sobre la edificación de la Piazza d'Oro, y en particular, de los atrios que esta contenía, por ser la zona donde se situaban los frisos de tipología de caza, se llega a una propuesta de intervención que se considera apropiada, por su doble carácter didáctico y práctico.

La intervención que se propone es diferente en las estancias que envuelven los dos atrios que constituyen la Piazza. En el caso de las estancias que se sitúan en el lado oeste del lugar, se propone realizar únicamente una limpieza y consolidación de ésta. De ese modo, la gente que visite la zona podrá ver el estado actual de las ruinas, y así interpretar la evolución y el deterioro que ha sufrido la *Piazza d'Oro* hasta llegar a la época actual. Sin embargo, al otro lado de la Piazza, en la zona este, se propone realizar una reconstrucción de las bóvedas de las estancias que conforman los dos ejes del atrio, zonas de exposición, y de las bóvedas anterior y posterior a la que forma parte el eje longitudinal (observar la figura 6.58), que tendrán usos diferentes. La estancia que da a la zona ajardinada (la granate en la imagen), se utilizará como estancia multimedia, en la cual se explicará la historia de la plaza, su evolución, los trazados que conformaron el lugar... y toda la información de interés que se ha investigado y que puede suponer un enriquecimiento para los visitantes. La estancia que contiene un ábside (verde en la imagen), será dividida en dos zonas, siendo una un lugar de estudio y la otra un taller interactivo, de carácter didáctico, donde las personas podrán aprender de una forma participativa. El resto de las salas reconstruidas (azul en la imagen), se utilizarán como museo, permitiendo resguardar los frisos, que en la actualidad se encuentran a la intemperie, lo que supone un constante peligro para éstos. Además, los frisos de la zona este, que se logre encontrar su posición, serán colocados en su posición original, colocando el resto en la zona de exposición con una ficha al lado, en el que explique su posición, y los datos pertinentes que se consideren oportunos para una mayor comprensión del lugar y de éstos en particular.

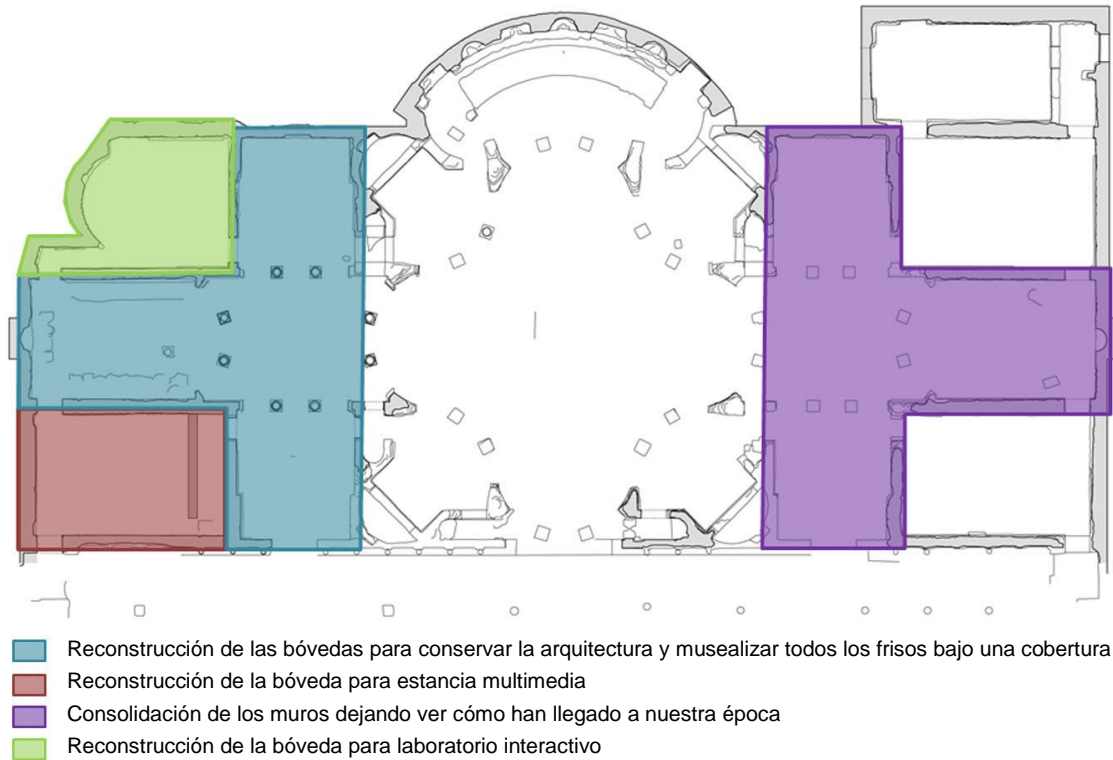


Figura 6.58. Imagen esquemática de las zonas de actuación.



Figura 6.59. Sección longitudinal de la parte intervenida por la zona del atrio.

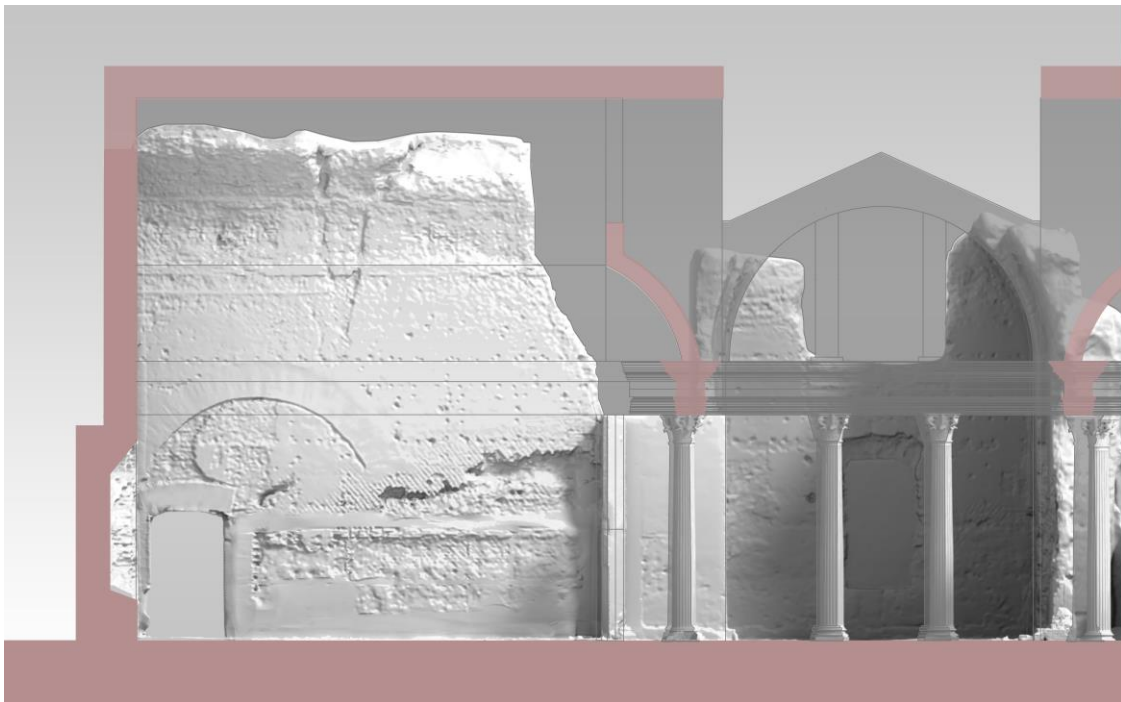


Figura 6.60. Sección transversal de la parte intervenida por la zona del atrio



Figura 6.61. Modelo de la intervención en 3D realizada sobre el modelo de superficies de subdivisión, quitando la parte de la bóveda delantera del eje longitudinal para permitir la visión de la intervención en las 3 estancias consecutivas.



INTERVENCIÓN FRISOS

En el caso de los frisos, el estudio de adscripción de piezas de frisos a su ubicación supuestamente original, basado en la compatibilidad formal, geométrica y temática, se propone como un posible uso del modelo tridimensional, permitiendo de este modo formar parte del contenido museológico de la propuesta nueva instalación museográfica, disponiendo incluso de una instalación (taller interactivo), de carácter didáctico, donde el visitante podría adscribir virtualmente piezas a lugares concretos del edificio, por sí mismo.



H. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA DE REFERENCIA:

- ❖ Adembri, B. (a cura di), 2000. *Adriano: Architettura e progetto*. Ministero per i beni e le attività culturali. Soprintendenza archeologica per il Lazio. Editorial Mondadori Electa. Milano.
- ❖ Aurigemma, S., 1996. *Villa Adriana*. Istituto Poligrafico e zecca dello stato. Libreria dello stato. Roma.
- ❖ Benedetta, A., Juan Vidal, F. y Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2011. Hunting friezes of the Piazza d'Oro at the Hadrian's Villa: new hypothesis for a virtual reconstruction inside an integrated research strategy. Texto incluido en el libro de Actas de *16th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*. Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie. Viena. ISBN: 978-3-200-02740-4, pp.140-153.
- ❖ Fantini, F., 2008. *Il modello di stadio da Villa Adriana. Indagine su un progetto incompiuto*. Università degli Studi di Firenze. Florencia.
- ❖ Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2012. *Interpretazione museografica dei portici con fregi di caccia della "Piazza d'Oro"*. Tesis del Máster Itinerante en "Museografía, Architettura e Archeologia. Progettazione Strategica e Gestione Innovativa del Patrimonio Archeologico" instituido por la "Accademia Adrianea di Architettura e Archeologia Onlus" dirigida por Francisco Juan Vidal. Roma, Italia.
- ❖ Ortíz y Sanz, J., 1787. *Los diez libros de la architectura de M. Vitruvio Polión*. Madrid en la Imprenta Real. Madrid.
- ❖ Perrault, C., 1981. *Compendio de los diez libros de arquitectura de Vitruvio*. Comisión de cultura del Colegio Oficial de aparejadores y arquitectos técnicos. Galería-Librería Yerba. Consejería de Cultura del Consejo Regional. Murcia.
- ❖ Sirano, F., 2000. "Caestia Animalia" a Villa Adriana? Considerazione sul fregio con amorini della Piazza d'Oro. Adembri, B. *Adriano: Architettura e progetto*. Ministero per i beni e le attività culturali. Soprintendenza archeologica per il Lazio. Editorial Mondadori Electa. Milano.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ❖ Bozzoni, C., Franchetti Pardo, V., Ortolani, G., Viscogliosi, A., 2010. *L'Architettura del mondo Antico*". Editori Laterza. Bari (Italia).



- ❖ Conti, G., 1970. *Decorazione Architettonica della “Piazza d’Oro” a Villa Adriana*. Studia Archaeologia (“Erma” di Bretschneider). Roma.
- ❖ Fantini, F. y Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2012. Procedure per la realizzazione di modelli digitali 3D ottimizzati: da Cyclone a Modo. *Seminario Tematico: Rilevare e progettare nel contesto storico: Pietrabuona (Pescia, PT)*. Università di Firenze. Florencia.
- ❖ Girault, C. Louis. 2002. *Peristilio del palazzo dell’imperator Adriano, 1885*. dentro de Jacques, A., Verger, S., Virlovet, C.: *Italica Antiqua. Envois degli architetti francesi (1811 – 1950). Italia e area mediterranea*. École nationale supérieure des beaux-arts. Paris.
- ❖ Hansen, E., 1960. “La “Piazza d’Oro” e la sua cupola” dentro de la Revista: *Analecta Romana Instituti Danici. 1º Supplementum*. Copenhagen. Denmark (escrito en italiano)
- ❖ Moneti, A., 1992. “Nuovi sostegni all’ipotesi di una grande sala cupolata alla “Piazza d’Oro”” dentro de la Revista: *Analecta Romana Instituti Danici*. Nº 20. Roma.
- ❖ Sapelli Ragni, M. (a cura di) 2010. *Villa Adriana. Una historia mai finita. Novità e prospettive della ricerca*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali. Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio. Editoriale Mondadori Electa S.p.A., Milano.



CAPÍTULO 6. CASO DE ESTUDIO 3



**Integración de frescos: Bóveda con frescos del
Palacio Roncioni**

A. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

EL PALACIO RONCIONI

El Palazzo Roncioni se encuentra situado sobre los márgenes del Arno en la ciudad de Pisa. Es la única residencia sobre los “*Lungarni*”¹ de las cuales se conserva aún la escalera hacia el río, una escalinata de acceso a los diques.

El Palacio presenta una fachada de la mitad del 600² en la cual se sitúa el emblema de los propietarios, un caballo robusto, llamado el “*concione*” o “*ronzone*”. Poco más adelante se encuentra “*lo scalo Roncioni*”, una de las últimas rampas de acceso que quedan hacia el Arno después de las reestructuraciones del siglo XIX. El edificio surge gracias a la fusión de varias casas medievales, claramente diferenciables en algunas trazas sobre los lados externos. La conformación planimétrica hacia el interior es en forma de herradura con amplias vistas que se abren por una logia hacia un jardín a la italiana encerrado por algunas dependencias.

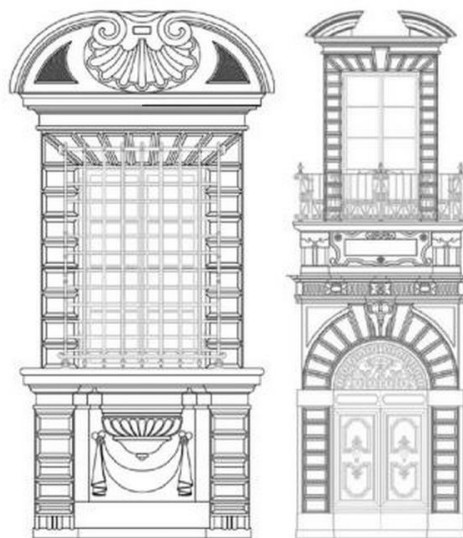


Figura 7.01. Detalles arquitectónicos de la fachada tardo manierista (Ciampa, M., 2010: 128)

Los interiores conservan hermosos frescos del setecientos, y una reciente restauración han puesto en valor también decoraciones de pintura medieval datadas del siglo XIII y XIV¹. Se trata de 4 decoraciones pictóricas referidas a dos diferentes planos temporales de un edificio que engloba un conjunto de tapices atacados a los muros. El más antiguo está decorado con un fresco a ondas blancas y rosas, dominado por una cornisa superior a cinco haces, de los cuales el central es rosa y los otros son blancos y negros. Se trata de una simple figuración de un ideal revestimiento textil, adherido al muro y delimitado en su parte superior por un resalto continuo. La decoración a ondas se encuentra abundantemente en muchos otros ejemplos de pintura mural pisana (Ciampa, M., 2010: 127-134), utilizados entre los siglos XII y XIV. Reflejo paralelo se encuentra también en las fuentes escritas.

¹ *Lungarni*, plural en italiano de *Lungarno*, palabra utilizada para designar las zonas que confrontan los márgenes del Arno.

² <http://www.turismo.pisa.it/it/cultura/dettaglio/Palazzo-Roncioni-00002/> (fecha de la última consulta: 25/10/2013)



El otro está decorado con pieles de vero³ estilizadas, presentando en el nivel superior un fingido tapiz con caballeros en armadura y una simulada pared pétreo.

En un segundo momento se decide decorar la habitación con una nueva pintura al fresco, más articulada pero de tipología fundamentalmente similar: el aparato a ondas se adapta a los gustos del tiempo y se sustituye por una decoración estilizada. Esta tipología de decoración se encuentra en modo recurrente en la arquitectura pisana y a menudo atribuida al siglo XIV.

El palacio pertenece en gran parte aún a la familia Roncioni, descendiente de una de las más antiguas casas nobiliarias de la Toscana, desde su adquisición por Bali Cesare Roncioni, en 1630 (Ciampa, M., 2010). Un siglo después de su adquisición, el Bali Angiolo Roncioni (1748-1812) apasionado por el arte, convenció al pintor G.B. Tempesti para decorar con frescos los muros y las bóvedas y a J.B. Desmarais para realizar algunos retratos de familia. En el 1795, Vittorio Alfieri recitó “*il Saul*” en un teatrillo situado en un amplio salón de la planta noble construido por el arquitecto Alessandro Gherardesca, que desde entonces unió su nombre a la familia. Entre el Setecientos y el Ochocientos el Palacio alojó temporalmente huéspedes ilustres entre los cuales se pueden citar: Granduca Pietro Leopoldo, Madame de Staël, Paolina e Luigi Bonaparte e Lord Byron. En el 1879 el Palacio Roncioni fue sede de reuniones clandestinas de los Mazzini.

Los Roncioni pertenecen a una de las familias que han escrito la historia de la ciudad y del territorio; la herencia monumental unida al nombre Roncioni se mantiene aún hoy en vastas porciones de la provincia, basta citar la Rocca di Ripafratta y su relativo sistema de torres de vigilancia. Además, redescubriendo las intensas y excelentes relaciones de la familia, estratificadas en los siglos de vida del palacio urbano y en la Villa de Pugnano, se puede imaginar la vivacidad cultural relativa a los estratos más altos de la sociedad pisana, cualificados por la misma historia de la ciudad.

³³ Vero o Vay es un tipo de forro heráldico, se cree inspirado en la piel de una marta cebellina o una ardilla rusa de pelaje gris argento. El vero se compone de campanas pequeñas, colocados en faja y opuestos unos a otros, de modo que la base de cada uno de metal esté siempre junto a la base de uno de color [[http://es.cyclopaedia.net/wiki/Vero-\(heraldica\)](http://es.cyclopaedia.net/wiki/Vero-(heraldica))] (última visita: 02/02/2014)

El núcleo del Palacio Roncioni anteriormente propiedad de Gaspare di Orazio Franchi, fue adquirido por Luigi Navarrette con un acta del notario Ser Iacopo Bizzarri. El 13 de julio de 1630 Navarrette vendió la misma parte del inmueble a Balí Cesare Roncioni: en esta ocasión viene redactada la primera descripción constatada del monumento (Ciampa, M., 2010): *“Casa di Lungarno con orto e 25 buche da grano e sue appartenenze [...] confina al I° di via del Lungarno, II° chiasso che va a San Luca, III° le casette delle monache di San Matteo, IV° via che divide tra Lafranchi e Navarrette”*⁴.



Figura 7.02. Vista cenital del Palacio. Imagen obtenida de google map.

⁴ Casa de Lungarno con huerta y 25 huecos para el grano y sus pertenencias [...] confina con: 1° de la vía Lungarno, 2° camino que va a San Luca, 3° las casas de las monjas de San Mateo, 4° vía entre los Lanfranchi y los Navarrette.

Durante la Guerra Mundial el palacio sufrió daños considerables, por ello el conde Girolamo Roncioni realiza algunas restauraciones necesarias: la atención de Girolamo por la edificación histórica pisana es confirmada en su manuscrito sobre los palacios de Pisa, que recientemente se han publicado siendo Alessandro Panajia su editor (Panajia, A. y Melis, A. 2004).

Durante la reorganización de la estructura en el seiscientos, que los Roncioni encargan presumiblemente al ingeniero Stefano Maruscelli, se llega a arrasar una manzana completa medieval, convirtiendo la mitad del complejo más distante del lado del río en jardín, que llega a extenderse hasta el límite de la Iglesia de San Luca, eliminada en 1783. Así como bien recoge Paolo Caroli, este jardín, en el levantamiento de la planta de la ciudad de Pisa realizada por Van Lint en el 1846, “*presentava un disegno geométrico con esedre semicirculari e un’ aiola centrale a forma romboidale*”⁵, luego de impostación “italiana” y debida a la reforma del complejo en el seiscientos. El Palacio asume una conformación planimétrica, como se comentaba, a “herradura” con doble cuerpo sobre el lado este y, organizada en el interior, según modelos recurrentes del Seiscientos, un “*cortile*” interno con un pórtico compuesto por arcos y con frescos con motivos florales en estilo del seiscientos.



Figura 7.03. Interior del Palacio Roncioni. Alzado abierto hacia el jardín, donde se puede observar el pórtico compuesto por arcos.⁶

De la época del seiscientos se encuentran hasta cuatro estratos de decoración, pero sobre este se sitúa el aparato pictórico de los siglos setecientos-ochocientos, de gran importancia, que engloba algunas de las más altas realizaciones de Giovan Battista Tempesti.

Pisa, aun siendo rica de testimonios similares, no dispone de un estudio sistemático y multidisciplinar sobre su pintura medieval, aunque no falten validas profundizaciones sobre el tema, entre las cuales la más reciente es conducida por la doctora Mariagiulia Burresti.

En la fachada que da al Arno se revela, a través de su unidad formal, la voluntad de expresar una nueva imagen urbana que ve los frentes sobre el río como parte de una representación escenográfica.

⁵ Presentaba un diseño geométrico con exedras semicirculares y un lecho central en forma romboidal.

⁶ M. Ciampa (2010: 129)

Este fenómeno, en particular, es visible si se compara la fuerza expresiva de la fachada de lenguaje tardo-manierista con el efecto de “*rigiranza*” (de “*regiro*”), bien subrayado por el objeto de cubrición que se extiende poco más allá del frente en piedra. La constitución del Palacio evidencia una fuerte presencia de la fachada, frente a una voluntad marginal de incluir los lados del edificio, de nueva solución formal, permitiendo la lectura de las trazas marcadas por su historia. Este “permanecer” de la edificación medieval se inserta en la larga tradición edificatoria pisana donde el “*rimaneggiamento*” (persistencia) de las arquitecturas se demuestra recurrente ya a partir de los siglos centrales del Medievo.



Figura 7.04. Vista del Palacio Roncioni desde el Lungarno Mediceo.

LA BÓVEDA CON FRESCO

La superficie con el fresco objeto del levantamiento pertenece a la estructura abovedada de uno de los vanos en la planta baja del *Palazzo Roncioni* de Pisa, uno de los ejemplos más valiosos de arquitectura manierista de la ciudad.

Además del valor arquitectónico, el edificio conserva un rico aparato pictórico decorativo realizado por Giovan Battista Tempesti, activo en Toscana y especialmente en Pisa en la segunda mitad del siglo XVIII, autor de importantes frescos entre los cuales se puede citar aquel de la sala de la música en el Palacio Pitti en Florencia y la figuración de la última cena en la catedral de Pisa.



Figura 7.05. Imagen de la bóveda decorada con el fresco de Giovan Battista Tempesti.

La raíz geométrica constructiva de la bóveda en examen es referible a la tipología de las bóvedas esquifadas, impostada sobre una planta rectangular, aunque no propiamente regular.



El fresco es en gran parte conservado, menos algunas evidentes lagunas creadas en tiempos recientes por fenómenos de deterioro ambiental. La bóveda presenta además difusas lesiones debidas a un disector de naturaleza estructural.

El levantamiento de la bóveda se convierte en una necesidad para permitir la documentación del fresco en vista de los trabajos de restauración, que se están realizando en algunas partes del palacio.

B. OBJETO

Este caso de estudio se desarrolla en la estancia efectuada en el Laboratorio A.S.T.R.O (*Applicazioni Scientifiche Topografiche per il Rilievo Operativo*, Aplicaciones Científicas Topográficas para el Levantamiento Operativo) del Departamento de Ingeniería Civil e Industrial de la Università di Pisa, junto a los profesores Gabriella Caroti, Andrea Piemonte y Marco Bevilacqua.

Con estas premisas se realiza este caso de estudio, elaborando un levantamiento con escáner láser y fotogramétrico de la bóveda esquifada del siglo XVIII, decorada con un fresco, del Palacio Roncioni en Pisa. La utilización contemporánea de técnicas activas (láser escáner) y pasivas (fotogrametría) permite un análisis de las precisiones obtenidas con metodologías de *Image-based modelling*. Además, se puede profundizar en la utilidad para la ingeniería y el cálculo estructural de los modelos obtenidos, así como para la de restauración de los frescos. De estos levantamientos se realiza también la validación en escala real.

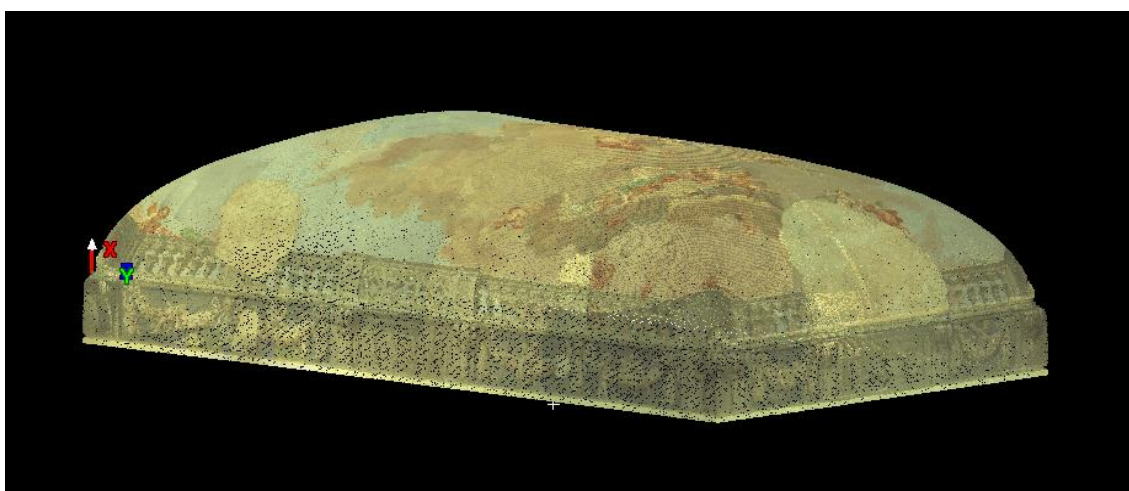


Figura 7.06. Imagen de la nube de puntos resultante del levantamiento con escáner láser 3D.

La finalidad de este proyecto a parte del estudio de las precisiones, es resolver un problema de cuadratura ligado a la bóveda decorada con el fresco del siglo XVII. Esta bóveda presenta un fresco que ha sufrido algunas pérdidas en el revestimiento y algunas grietas, debido a un

pequeño asentamiento. Mientras el problema estructural ha sido resuelto mediante un estudio independiente, cuando se intenta resolver la reintegración de los faltantes decorativos, los restauradores se encuentran con una necesidad hasta el momento no resuelta. La necesidad de obtener el diseño del fresco en verdadera dimensión y en 2D.

En general cuando se desarrollan trabajos de levantamiento de bóvedas en 3D, la presentación en 2D es realizada mediante rectificaciones fotogramétricas. Éstas, sin embargo, no representan el diseño real cuando la superficie en sí no es un plano. Por lo tanto en el caso de las bóvedas, y sobre todo en aquellas que presentan frescos como decoración de las mismas, esta representación no es suficiente.

Así se concluye con la necesidad de un desarrollo de la superficie de la bóveda, en vez de una definición básica mediante rectificaciones. Sin embargo, el problema es que aparte de las bóvedas simples (ej. De cañón), existen muchas bóvedas no desarrollables, por ser el resultado de más de una superficie simple, como se explica en el apartado de la tipología de bóvedas.

El conocimiento de la arquitectura es necesario para poder resolver los problemas geométricos que surgen una vez tenemos la nube de puntos o la “mesh”: Necesitamos la ayuda de la Geometría Descriptiva.

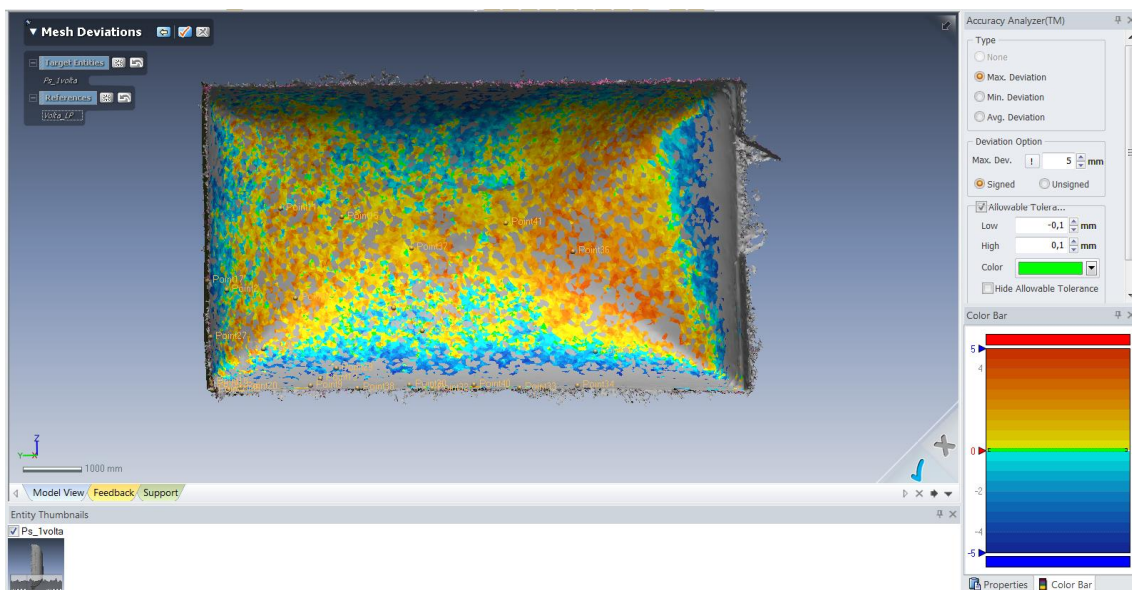


Figura 7.07. Imagen de la desviación entre el modelo realizado con *Range-based modelling* y el de *Image-based Modelling*.

Conseguido el desarrollo plano de la bóveda, además se buscará la calidad en la textura de los modelos digitales obtenidos por los dos métodos, *Image-based Modelling* y *Range-based Modelling*. Se prueban diferentes técnicas para dar al modelo, obtenido a partir del escáner láser, la mejor textura foto-realista y se realizan diferentes modelos con técnicas de fotogrametría que se comparan con el modelo de escáner láser, para el cálculo de su precisión y desviación.

C. MEDIOS, SISTEMAS Y METODOLOGÍA DE LEVANTAMIENTO

Como se comentaba en el apartado anterior, uno de los objetivos principales de este estudio es la comparación entre ambos levantamientos para determinar la precisión. Esto en parte se debe a que también se busca un levantamiento alternativo al escáner láser, además de complementario.

Para el estudio de esta bóveda, se realizan levantamientos fotogramétricos y uno con escáner láser.

El primer reportaje para el levantamiento fotogramétrico se realiza con una cámara Nikon D700.



Figura 7.08. Imagen de la cámara Nikon D700

Para que las fotografías tengan la calidad que precisa un levantamiento fotogramétrico, se deben atender los siguientes parámetros (Cueli López, J.T. 2011):

- Sensibilidad ISO: La sensibilidad ISO cuanto más baja mejor. Cuanto menor es el ISO el grano es más fino y la nitidez mayor.
- Distancia Focal: Conviene utilizar una distancia focal mínima de 28mm, para una cámara analógica tradicional, que equivale en el tipo de cámara digital a una de 50 mm. Tiene un menor ángulo de visión, pero genera menor distorsión y mayor precisión.
- Apertura del diafragma f: Un f bajo produce escasa profundidad de campo (hace que si se fotografía a una persona, la figura en primer plano salga muy nítida, presentando el segundo plano difuminado). En el caso de la fotografía para la restitución, sin embargo, interesa que toda la fotografía esté enfocada, por lo que cuanto mayor sea el número que divide a la f mejor. f/11, f/16 o f/22 serían los correctos.
- Con los parámetros anteriores el tiempo de exposición aumentará, pero no tiene importancia porque se usará el trípode para hacer las fotos.

Así se puede concluir que para hacer fotografías nítidas, de buena calidad para una restitución a partir de imágenes es aconsejable el uso de una distancia focal de 50 mm, una ISO baja y un factor de división de la "f" alto. De este modo se obtienen fotografías sobrepuesta con una calidad buena para el uso de un modelo con textura foto-realista.



Aunque en una segunda fase se realiza un levantamiento de una calidad mayor debido a todos los problemas presentados, son diversas las pruebas realizadas con ese primer levantamiento, como se explica más adelante.

Paralelamente se realiza el levantamiento con escáner láser, para obtener el modelo que permitirá el estudio preciso de la bóveda, y comparable con los modelos obtenidos con *Image-based Modelling*.

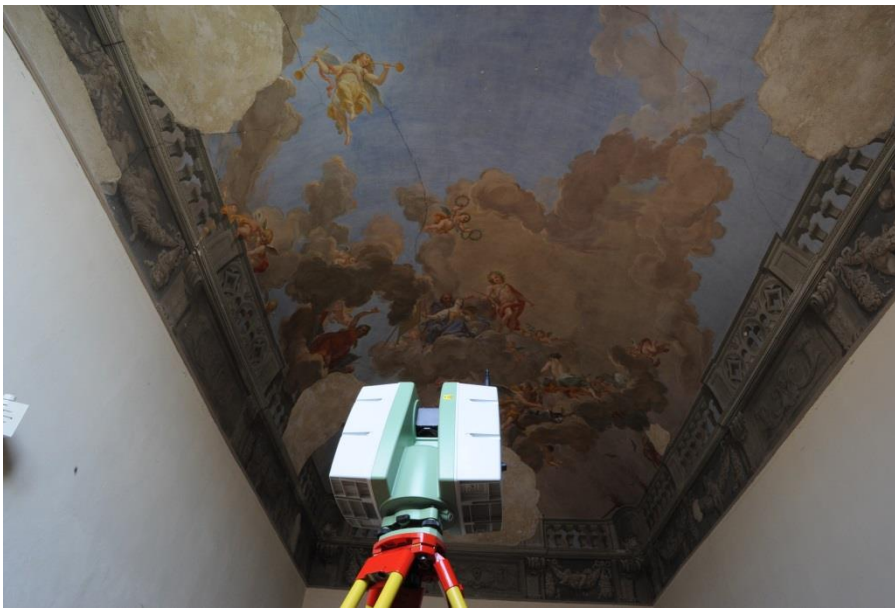


Figura 7.09. Imagen del escáner realizando el levantamiento de la estancia con la bóveda objeto de estudio.

i. Láser escáner

Para el levantamiento con escáner láser se realizan dos estaciones, situadas aproximadamente a 1/4 y a 3/4 en el sentido longitudinal de la sala, y ambas en el centro en sentido transversal.

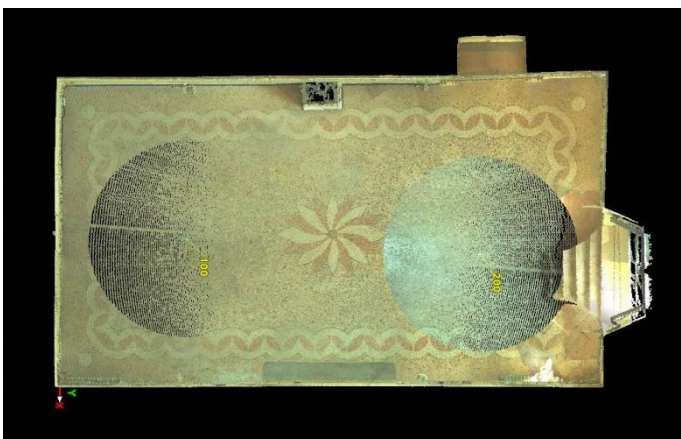


Figura 7.10. Planta de la estancia obtenida con el escáner láser, en la que se puede deducir las dos zonas de estación de éste.

El levantamiento se realiza a alta densidad, 4mm a 10 metros, permitiendo obtener una nube de puntos muy cuantificada. En una segunda fase, se exportan las nubes de puntos a un programa de *Reverse Modelling* (*Inus Technology Rapidform XOR3*), para su conversión en *mesh*.

En el software *Cyclone* se realiza la alineación de las nubes de puntos, que será prácticamente automática debido al uso de target. A continuación, se realiza la eliminación de los puntos sobrantes y tras ello, se aísla en un *ModelSpace* independiente solo la parte de la bóveda. A partir de éste, se efectuará el estudio de la bóveda para su desarrollo en 2D, haciendo las secciones en las 3 direcciones perpendiculares y los *screenshot*, como se explica más adelante.



Figura 7.11. Sección vertical de la nube de puntos de la estancia.

Paralelamente, se realizará la exportación de la nube de puntos por partes: por un lado se efectúa un modelo de la estancia completa, a excepción de la bóveda, y por el otro se ejecuta un modelo de la bóveda, ambos a alto nivel de detalle. Trabajando en *Inus Technology Rapidform XOR3*, se pasan las diferentes fases de edición del modelo (conversión a *mesh*, eliminación de los polígonos con errores topológicos, relleno de huecos...). Tras los procesos de edición, y centrándose ya solo en la bóveda, se realiza la “*decimation*” de ésta para permitir su exportación a un programa de *entertainment*, donde se insertará la textura foto-realista a partir de fotografías.

ii. Levantamiento fotogramétrico para aplicación de la textura

Como ya se ha dicho anteriormente, se realiza un levantamiento fotogramétrico, para la inserción de la textura foto-realista en los modelos digitales obtenidos a partir de levantamientos con sensores activos. Se efectúa, como se comentaba, un primer reportaje fotográfico con una Nikon D700.

Después del reportaje se procede al trabajo de gabinete. El primer paso es la calibración de la cámara. Se efectúan 2 calibraciones diversas: una con *Rigel* y otra con *PhotoModeler Scanner*.

La calibración a partir de *Rigel* presenta un problema, se debe ejecutar a partir de un modelo exacto dado por el programa y éste se debe imprimir a un tamaño preciso y es necesario tener un plotter calibrado, si no el error de impresión es superior y se añade al error presentado por la cámara sin calibrar.

En el caso del *PhotoModeler* la calibración no presenta ningún problema, dando buenos resultados y por lo tanto, se concluye como el mejor método para la calibración.

Solucionado el problema de la calibración se procede a la corrección de la distorsión en las fotografías. Sin embargo, esto también presenta algunos problemas. Las imágenes corregidas dan errores cuando se realiza su orientación, necesaria para obtener la posición de la cámara.

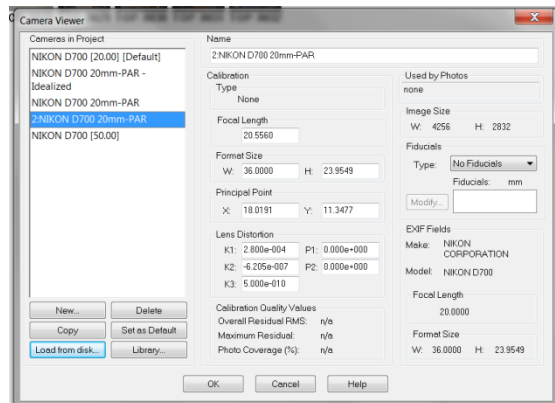


Figura 7.12. Calibración de la cámara Nikon D700

También las fotografías corregidas dan problemas al intentar generar el primer modelo digital 3D realizado con *Agisoft PhotoScan*, como se ha comprobado en las pruebas realizadas. Utilizando las mismas fotografías en dicho software, corregidas y sin corregir, los resultados son totalmente diversos: con las fotografías corregidas el programa no consigue orientarlas, realizando nubes de puntos sin coherencia, mientras que en el caso de las fotografías sin corregir, realiza la orientación de las cámaras sin problemas y, por lo tanto, un conjunto de nubes de puntos con un único e igual sistema de referencia.

iii. Image-based Modelling

Como ya se comentaba, paralelamente a la búsqueda de la inserción de fotografías al modelo de escáner, se efectúan diferentes pruebas para la obtención de modelos tridimensionales a partir de fotografías.

Se intenta generar un modelo con *Photomodeler Scanner* a partir del primer levantamiento, dando pésimos resultados: las imágenes poco nítidas generan puntos homólogos con una cantidad de píxeles, como desviación, demasiado alta. Por ello se realizará un segundo levantamiento, teniendo en cuenta esta vez, lo comentado de los diferentes factores que se deben impostar para la realización de fotografías.

Cámara fotográfica	Nikon D700	Nikon D600
Objetivo	20 mm	50 mm
Punto f	f/2.8	f/16
Tiempo de exposición	1/5 s	½ s
Velocidad ISO	ISO-400	ISO-200
Distancia focal	20 mm	50 mm
Apertura máxima	3	1,6

Figura 7.13. Tabla con los parámetros impostados en las cámaras usadas en las dos calibraciones realizadas.

Se intenta generar también dos modelos con *Agisoft PhotoScan*, uno con las imágenes corregidas, que el programa no consigue efectuar, y un segundo con las imágenes distorsionadas que si saldrá pero obteniéndose una textura con una baja resolución (por las imágenes algo desenfocadas).

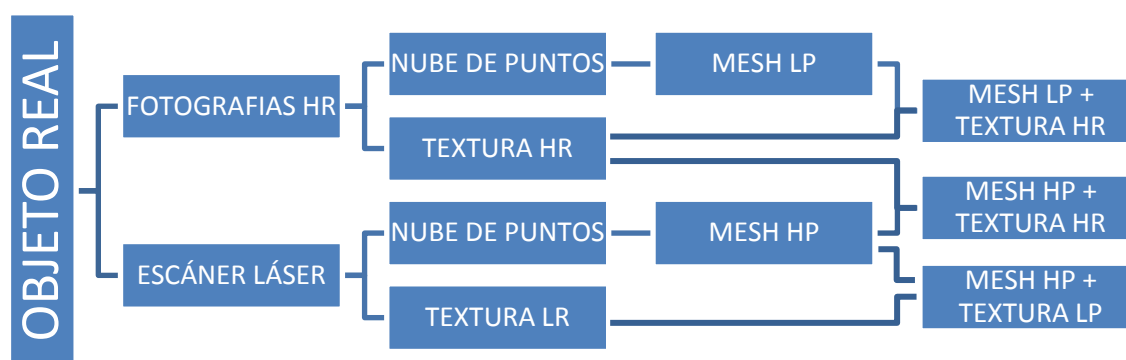


Figura 7.14. Diagrama de la *pipeline*, donde HR es *High-Resolution*, LR es *Low-Resolution*, HP es *High-Poly* y LP es *Low-Poly*.

Tras estos resultados se realiza el nuevo levantamiento, que permite generar un modelo en *PhotoModeler* “aceptable”. Este modelo como se comenta en el capítulo del estado del arte, es recomendable si se busca un modelo para el “*entertainment*” o para uso como documentación de la bóveda con una textura de alta calidad, es bastante más económico, menos aparatoso y requiere un tiempo de trabajo menor. Sin embargo, se debe aclarar que no es un modelo usable para un estudio estructural o de precisión milimétrica del volumen de la bóveda. Como se puede observar en la figura 7.15, el modelo presenta bastante ruido, pero la calidad de la textura es alta (figura 7.16).

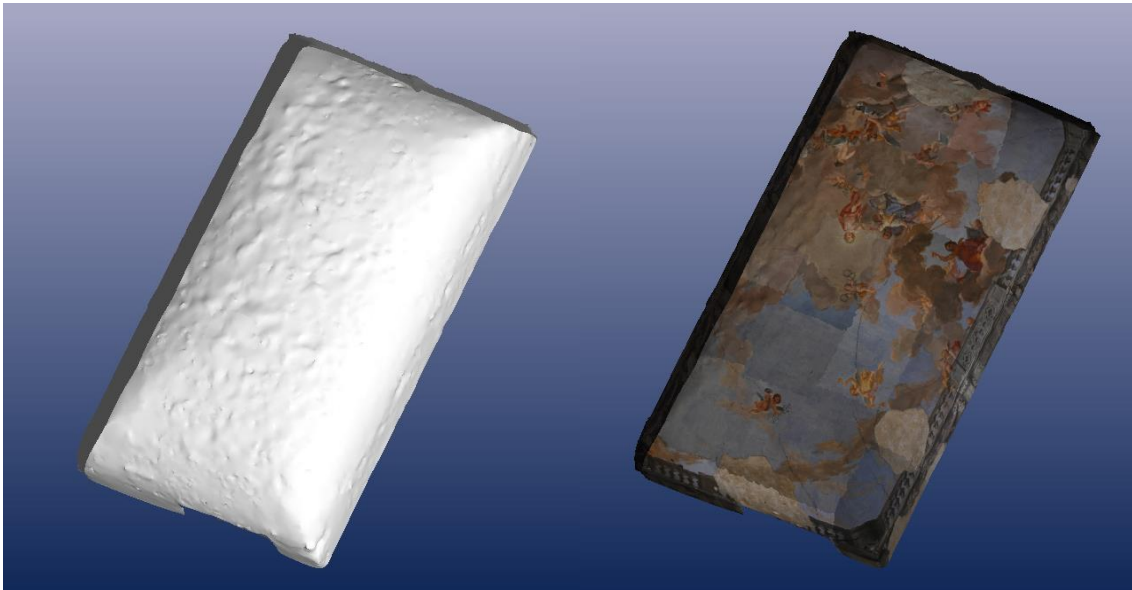


Figura 7.15 y 7.16. Modelo Digital 3D obtenido mediante técnicas de *Image-based Modelling*. A la izquierda sin textura, a la derecha con textura.

La generación de este modelo, sin embargo, permite la orientación de todas las fotografías en un mismo sistema de referencia, dando la posición de las cámaras para cada captura. A partir de esta orientación de las cámaras, se podrá usar las fotografías para introducir la textura fotorealista al modelo realizado con escáner, exportado en *Photomodeler*, situando las dos bóvedas en un único sistema de referencia.

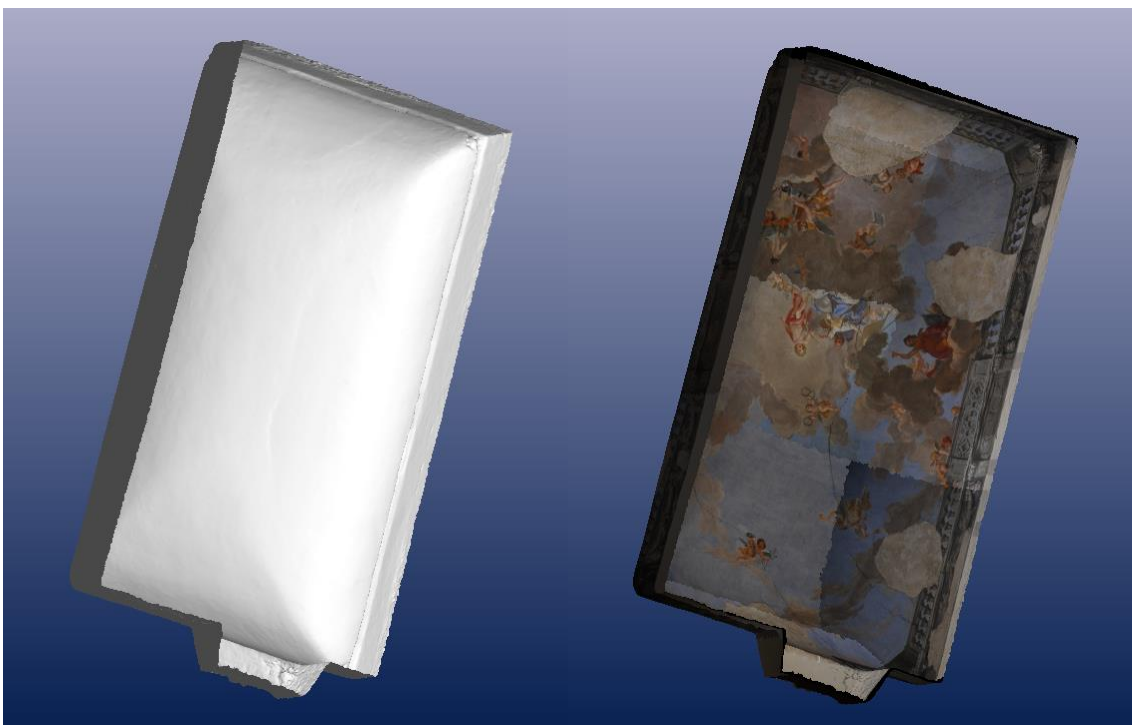




Figura 7.17 y 7.18. Modelo Digital 3D obtenido mediante técnicas de *Range-based Modelling*. A la izquierda sin textura y a la derecha con la textura aplicada a partir de las fotografías en *Photomodeler Scanner*.

Además, se genera, utilizando las fotografías del segundo levantamiento un modelo con el *Agisoft PhotoScan*. Este modelo presenta una geometría y una textura de alta calidad. Sin embargo, como se comenta en el apartado del análisis, el problema de este modelo es que la escala está basada en un solo dato⁷, y que el tamaño de los triángulos no es directamente controlable (no es un parámetro que se puede introducir cuando se va a realizar la *mesh*), de ahí que la precisión del modelo pueda ser bastante relativa.

	Software utilizado	Cantidad de fotografías	Calidad deseada	Cantidad de polígonos	Tipo de geometría	Calidad de la mesh	Calidad de la textura
Primer levantamiento	Agisoft PhotoScan 0.8.2.985	32	Media	200.000	Rasgos acusados	Media-baja	Media
Segundo levantamiento	Agisoft PhotoScan V0.8.3	47	Media	200.000	Rasgos acusados	Media-alta	Alta

Figura 7.19. Comparación de los dos modelos generados con *Agisoft PhotoScan*, utilizando fotografías de dos levantamientos diferentes y utilizando dos diversas versiones del mismo software.

⁷ Esta afirmación es relativa, ya que depende de la versión usada del software. En las primeras versiones del software (*Agisoft PhotoScan 0.8*) la escala del modelo solo se podía introducir a partir de un dato. En las versiones posteriores (*Agisoft PhotoScan 0.9*) se introduce una mejora en el software permitiendo introducir la cantidad deseada de puntos de control, que además pueden ser medidos en un sistema de coordenadas definido, conociendo de antemano las coordenadas de dichos puntos de control. La generación de dichos modelos se realizan con las versiones 0.8, que aún no permiten introducir diferentes datos para escalar el modelo.



D. TRATAMIENTO DE LOS DATOS.

NECESIDAD DE LOS RESTAURADORES DE TENER LA REPRESENTACIÓN “DESARROLLADA” DE LAS BÓVEDAS.

Las nuevas tecnologías avanzadas son usadas difusamente tanto globalmente para el levantamiento complejo histórico arquitectónico en su conjunto, como localmente para el levantamiento de su aparato decorativo y de detalles arquitectónicos. Entre estos, las decoraciones pictóricas (frescos, pinturas superficiales en general, etc.) constituyen los elementos a veces más significativos pero ciertamente más frágiles, hacia los cuales se direcciona la atención constante de todas las profesiones que con diferente especialidad están interesadas en la programación y en la realización de intervenciones de restauración y conservación (arquitectos, gestores, técnicos, historiadores del arte, restauradores, etc.).

Si en el pasado las técnicas de restauración del aparato pictórico se basaban en sistemas de investigación tradicionales a vista, hoy con la llegada de las nuevas tecnologías digitales es posible obtener un dato objetivo, tridimensional y geoméricamente correcto, al cual es posible referir todos los resultados de las diferentes tipologías de investigación. El levantamiento térmico, por ejemplo, proporciona índices útiles para describir la situación de deterioro o conservación de las superficies murales decoradas, poniendo en evidencia la presencia de patologías superficiales presentes en los muros, unido a fuertes transiciones termo-hidrométricas; la integración entre el dato térmico y el métrico a mayor resolución es después esencial para una representación y mapeado preciso del deterioro. Las nuevas tecnologías han dado por lo tanto un fuerte impulso a la catalogación digital, a la documentación de las decoraciones pictóricas y al monitoreo de su estado de conservación, y la disponibilidad de los modelos virtuales constituye ya un indispensable instrumento de valoración del patrimonio figurativo.

Si por un lado las nuevas tecnologías han determinado una sustancial innovación en las técnicas de diagnósticos, por el otro, debe entenderse que la parte operativa de la restauración queda y debe quedar por su naturaleza fuertemente unida a las técnicas tradicionales pictóricas. Al restaurador, de hecho, se le pide la manualidad “*di bottega*” (de taller), o lo que es lo mismo el conocimiento de las técnicas y la capacidad de aplicarlas en la realización de la decoración, al mismo nivel de los artistas que en el pasado aprendían la técnica de pintura al fresco en talleres de arte. También el cierre de una pequeña laguna, por ejemplo, requiere toda una serie de operaciones, desde la investigación del diseño sobre papel y la preparación de la superficie hasta la aplicación del color; operaciones que, como en el pasado, se resuelven en el tiempo en el cual se completaba el proceso de carbonatación del yeso.

Parece claro, por lo tanto, que es en el paso desde la fase cognoscitiva y de investigación a la fase operativa, donde a las nuevas tecnologías se les pide interconectarse e integrarse con las técnicas tradicionales y metodologías de intervención.



Por estas razones, los restauradores, aunque pueden visualizar en ámbito virtual el bien en su tridimensionalidad y consultar y gestionar la información a él asociada, requieren, sin embargo, poder planificar las intervenciones sobre representaciones planas convencionales del fresco impreso sobre soportes de papel o similares.

Si para las pinturas parietales, generalmente localizadas sobre superficies planas o a ejes aproximables, el problema es fácilmente resoluble con los instrumentos que los softwares en comercio ya tienen para la generación automática de representaciones proyectivas ortogonales, la cuestión aparece más compleja en el caso en el cual las pinturas están situadas sobre superficies de intradós de estructuras abovedadas.

En las obras de restauración, los operarios necesitan, de hecho, poder trabajar sobre elaborados gráficos que reporten las proporciones en verdadera magnitud de las superficies abovedadas pintadas. En el caso de una bóveda de cañón, por ejemplo, la representación es generada por el “desarrollo” de la superficie cilíndrica de la bóveda y de la sucesiva representación en verdadera magnitud sobre el plano horizontal. Tal necesidad aparece más urgente a la luz del hecho de que también los estamentos encargados de la protección del patrimonio histórico, con frecuencia requieren de este tipo de representación para la documentación del estado de las pinturas y de los proyectos de restauración.

A la luz de cuanto se ha dicho, se hace necesario definir una metodología de trabajo que, a partir de un levantamiento con escáner láser tridimensional de la superficie abovedada, permita la generación de las proyecciones en verdadera magnitud como en el caso de la bóveda de cañón, limitando el trabajo que por vía gráfica es necesario para la reconstrucción geométrica de la superficie sobre el plano y la sucesiva proyección de la imagen de la pintura.

PANORAMICA SOBRE VARIAS TIPOLOGÍAS DE BÓVEDAS. GEOMETRÍAS IDEALIZADAS DE PROYECTO

La bóveda ha ocupado un puesto preeminente en las arquitecturas del pasado, resolviendo un conjunto de problemas espaciales, volumétricos, estéticos y constructivos, que los primitivos sistemas trilítricos no habían satisfecho plenamente.

Las bóvedas se encuentran en la arquitectura en una amplia gama de soluciones constructivas e interpretaciones arquitectónicas, a menudo majestuosas y brillantes como para crear un sentido de admiración y asombro. Muestra de ello son las primordiales bóvedas de cañón, como cobertura de los ambientes asirio-caldea, las grandiosas bóvedas de romanas, con o sin monturas de ladrillo, las cúpulas semiesféricas bizantinas de terracota, las bóvedas encasetonadas dispuestas en una espiral de los sistemas bizantino-latinos, los imponentes complejos arcos abovedados románico-góticos, las ingeniosas cúpulas dobles y las bóvedas con lunetos del Renacimiento, del seiscientos y del setecientos, hasta la ardita bóveda de rincón de claustro del ochocientos de la *Mole Antonelliana*, en Turín.

Formalmente, las bóvedas pueden ser divididas en dos grupos, bóvedas simples y bóvedas compuestas. Las primeras son construidas por superficies únicas, por lo que la superficie del intradós aparece continua y sin bordes o ángulos entrantes. Las segundas, sin embargo, derivan de la asociación de más bóvedas simples, las cuales intersectándose o uniéndose entre ellas, forman sobre el intradós bordes o ángulos, que rompen el sentido de continuidad y de uniformidad que se revela entre las otras. Resulta, en consecuencia, un aspecto mucho más variado y complejo.

Con referencia a su raíz geométrica, son pertenecientes al grupo de bóvedas simples:

1. Las bóvedas de cañón o cilíndricas. Son generadas por una común superficie cilíndrica. Éstas tienen como sección recta un arco a pleno centro o rebajado, elíptico, policéntrico, etc., que representa la curva directriz, mientras las generatrices son paralelas a las líneas de imposta. Son por lo tanto delimitadas por dos arcos frontales (o de pared) y de la línea de imposta. Las bóvedas de cañón pueden ser también inclinadas si son inclinadas sus líneas de imposta, así como ocurre, por ejemplo, en los vanos de las escaleras; o, como ocurre en los arcos, cuando son rampantes, si tienen las impostas situadas a diferente altura.

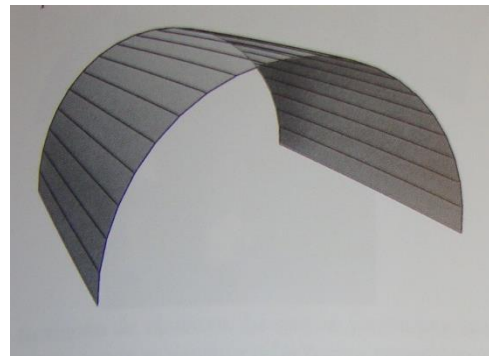
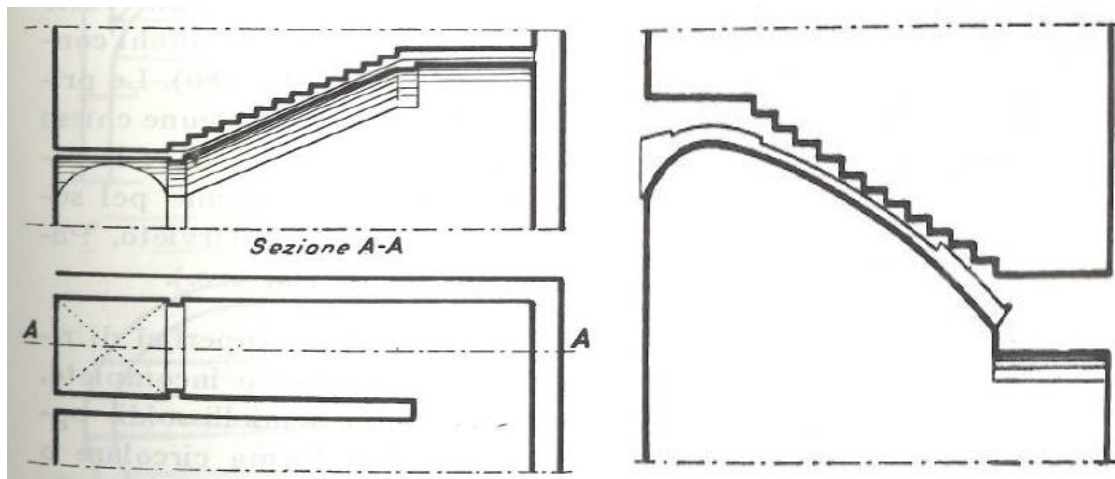


Figura 7.20. Bóveda de cañón (De la Plaza Escudero, L., 2008: 115)



Figuras 7.21 y 7.22. Imágenes de bóvedas cilíndricas. A la izquierda, bóveda de cañón inclinada para sujetar una escalera encasada. A la derecha, Bóveda rampante para sostener una escalera exenta (Pera L., 1987: 63).

2. Las bóvedas anulares y helicoidales. Pueden considerarse como las bóvedas de cañón, con la diferencia de que las líneas de imposta han asumido la forma de círculos concéntricos, o de dos hélices de paso y de ejes comunes.
3. Las bóvedas semiesféricas o cúpulas. Tienen por intradós superficies de revolución esféricas o elipsoides. Éstas pueden ser completas o incompletas, según sean constituidas de semiesferas o de semielipsoides.

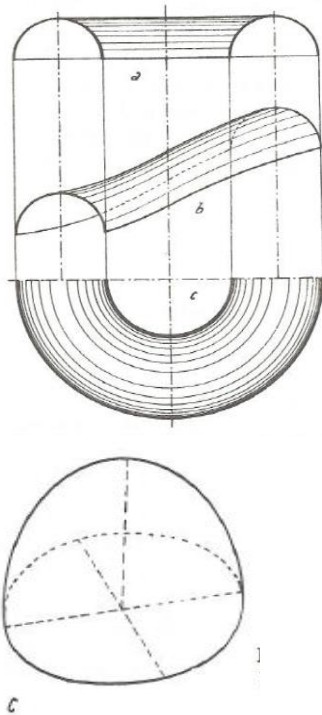


Figura 7.23 y 7.24. A la izq., bóveda anular y bóveda helicoidal. A la derecha, bóveda semiesférica (Pera L., 1987: 64-65).

4. La bóveda vaída. Proveniente de las cúpulas y originada de la intersección de éstas con los planos verticales conducidos por los lados de un cuadrado o de un rectángulo inscrito en la planta de la bóveda de origen. Por su forma es apropiada para cubrir espacios cuadrados.

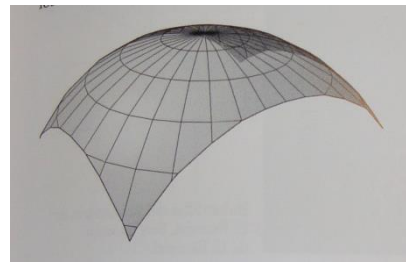
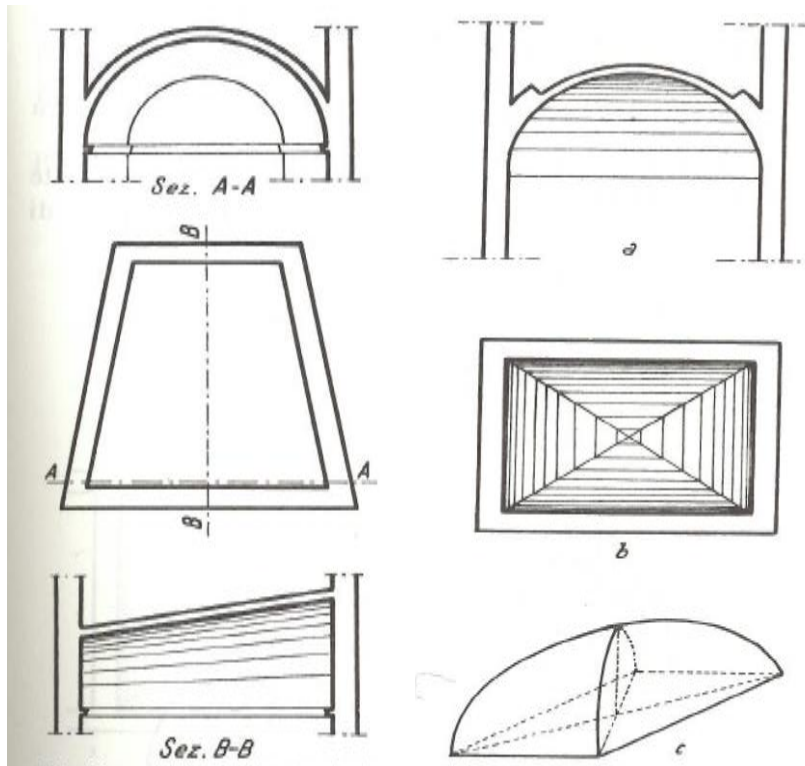


Figura 7.25. Bóveda vaída (De la Plaza Escudero, L., 2008: 119).

5. Las bóvedas cónicas o conoidales (figura 7.26). Formadas de las análogas superficies geométricas y empleadas para cubrir ambientes en planta circular o poligonal con un gran número de lados, así de poder considerarse como circular. Se encuentran interesantes aplicaciones bajo forma de porciones, como elementos de recuerdo en las cúpulas o como cubierta de ambientes en planta trapezoidal.

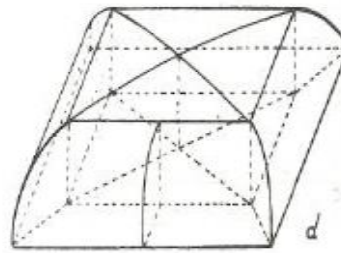
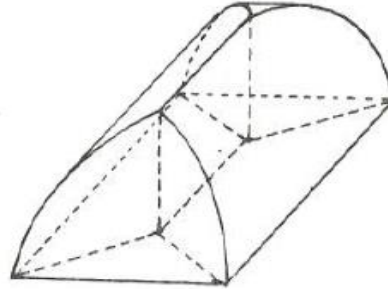


Figuras 7.26 y 7.27. A la izquierda, bóveda cónica sobre planta trapezoidal. A la derecha, Bóveda de rincón de claustro sobre planta rectangular (Pera L., 1987: 69).

Las bóvedas compuestas derivan, como se ha dicho, de la asociación de partes de bóvedas simples, generalmente de raíz cilíndrica o cónica o en algún caso esférica. Éstas pueden ser distinguidas en:

1. Bóveda de rincón de claustro (figura 5.27). Originada por la intersección de más bóvedas de cañón, o mejor de la asociación de más husos cilíndricos, tomado un número correspondiente a los lados que forman la planta del ambiente a cubrir. Las líneas de intersección sobre la superficie de intradós, definidas por arcos diagonales, son curvas planas, cuya proyección, en planta, es representada por líneas rectas que se unen en el centro geométrico del polígono de imposta con los ángulos individuales. Por tal razón, los arcos diagonales se encuentran en los planos verticales proyectados en las diagonales de la planta, los husos tienen la misma montea y un sexto tal que las curvas que delimitan cada uno de ellos coinciden exactamente con los de los husos adyacentes, a fin de ser común entre ellos. En las bóvedas de rincón de claustro, por lo tanto, la línea de imposta está constituida por redes horizontales, encontrándose en un mismo plano y formando el polígono base, mientras las generatrices de cada huso, son paralelas al respectivo lado de imposta.

2. Bóveda de aljibe. Se utiliza generalmente en ambientes cuadrangulares (rectangulares o trapezoidales). Éstas provienen de la intersección de bóvedas de cañón, de la cual una principal, impostada sobre los lados largos del polígono de base, y dos menores, impostada sobre los lados cortos, que forman los lunetos.
3. Bóveda esquifada, constituida de cuatro husos cilíndricos de igual monta y sesto, impostados sobre los lados del ambiente y conectado de forma centralizada por una superficie ligeramente curva, dicha espejo. Ésta tiene analogía con las bóvedas de rincón de claustro o de cañón con lunetos, y es utilizada habitualmente con fin decorativo, como bóveda fingida, para cubrir grandes ambientes.



Figuras 7.28 y 7.29. Arriba, bóveda de aljibe. Abajo, bóveda esquifada (Pera L., 1987: 71-72).

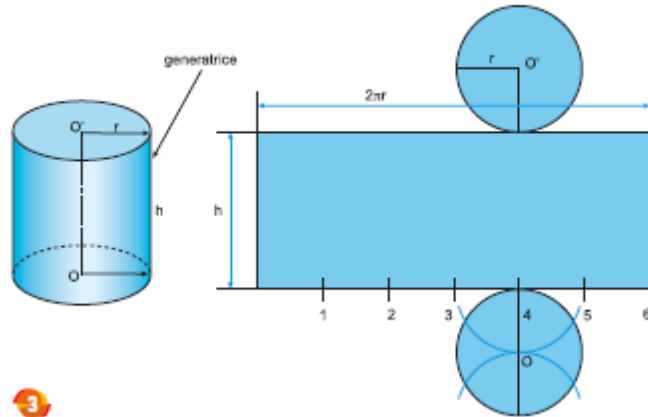
DIFERENCIAS ENTRE SUPERFICIES DESARROLLABLES E NO DESARROLLABLES.

Como dicho en precedencia, en las usuales operaciones de levantamiento de superficies abovedadas pintadas es buscado habitualmente la producción de elaborados gráficos que representan el desarrollo plano de las superficies de intradós, con el fin de poder documentar las figuraciones pictóricas en verdadera magnitud.

Dicha operación es aplicable, en línea general, a todas las superficies geoméricamente desarrollables y como tales referibles a raíces cilíndricas o cónicas o troncocónicas.

En línea teórica, el desarrollo del cilindro y del cono es posible según reglas geométricas bien definidas. Las superficies laterales de un cono o un cilindro, de hecho, tendido sobre superficies de revolución generadas por una línea recta, pueden ser representadas en el plano “desarrollándolas” a lo largo de un arco de amplitud apropiada.

En este modo, el desarrollo de una superficie cilíndrica está constituido por un rectángulo que tiene la base igual a la longitud de la curva directriz y la altura igual a aquel del cilindro mismo (fig. 7.30).

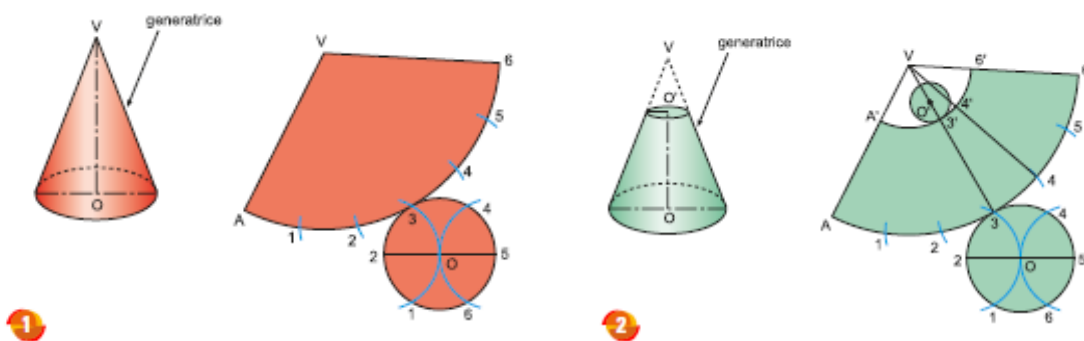


3

Figura 7.30. Desarrollo en 2D de un cilindro⁸

Por cuanto se refiere al cono, su desarrollo está definido por un sector circular que se obtiene desarrollando sobre el plano su área lateral y que tiene el radio igual a la apotema del cono y el arco largo cuanto la circunferencia de base. (fig. 7.31)

Sobre la base de estas suposiciones y de la clasificación precedente, el problema del “desarrollo” sobre el plano es geoméricamente solucionable para las superficies de intradós de las bóvedas de cañón, cónicas o conoides y de todas las bóvedas compuestas que presentan raíces geométricas cilíndricas o cónicas, como las bóvedas de rincón de claustro, de aljibe, esquifadas.



1

2

Figura 7.31 y 7.32. Imágenes del desarrollo de conos en 2D.⁹

⁸ <http://www.sergiosimone.it/public/upload/arearecords/287/Lo%20sviluppo%20dei%20solidi.pdf> (última consulta: 13/11/2013)

⁹ <http://www.sergiosimone.it/public/upload/arearecords/287/Lo%20sviluppo%20dei%20solidi.pdf> (última consulta: 13/11/2013)

E. ANALISIS

DESARROLLO DE LA BÓVEDA

Como ya se ha subrayado anteriormente, la bóveda esquifada no representa una superficie directamente desarrollable. Ésta, sin embargo está constituida por porciones de geometrías elementales, en particular, cilindros unidos entre ellos.

En primer lugar, se han buscado estas geometrías elementales para determinar la desviación del modelo ideal con respecto a la bóveda real. Con este fin han sido aisladas las nubes de puntos parciales que, siguiendo líneas de separación teóricas, deberían pertenecer a porciones de diversos cilindros. En principio se han separado las dos “Faldas” cortas de las largas siguiendo las líneas individualizadas visualizando, desde la vista cenital, el modelo seccionado a través de planos a un paso pequeño.

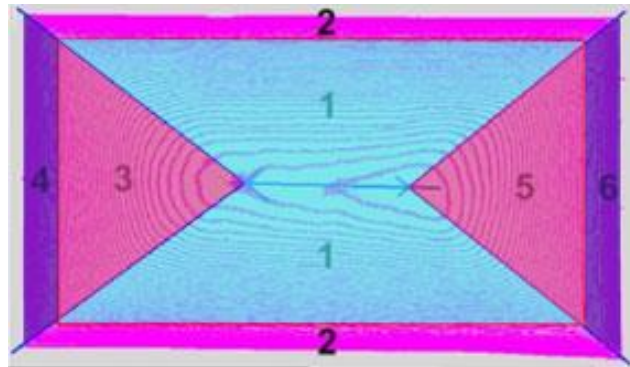


Figura 7.33. Imagen de la bóveda dividida en 6 partes o porciones.

Las “faldas” separadas son teóricamente constituidas de la unión de dos porciones de cilindros de diferente radio (menor en la porción más cercana a la imposta de la bóveda y mayor en la más cercana a la cumbre). La línea de separación teórica de las dos porciones se encuentra aproximadamente a un tercio de la bóveda a partir de la imposta.

Separando, por lo tanto, la parte baja de la bóveda de aquella de la cumbre, se han obtenido seis nubes de puntos parciales, cada una de las cuales teóricamente representa una parte de cilindro (figura 7.33).

Utilizando instrumentos de interpolación han sido identificados los cilindros que mejor se aproximan a las porciones de nubes de puntos obtenidas.

Tomando por ejemplo la “falda” larga, los dos cilindros que la componen tienen como radio 7,349 metros el de la cumbre y 5,280 metros el de la base de imposta. Además, para ambos cilindros la desviación estándar respecto a la nube de puntos es del orden de 7mm (figura 7.34). Resultados análogos se han obtenido para las otras “faldas”.

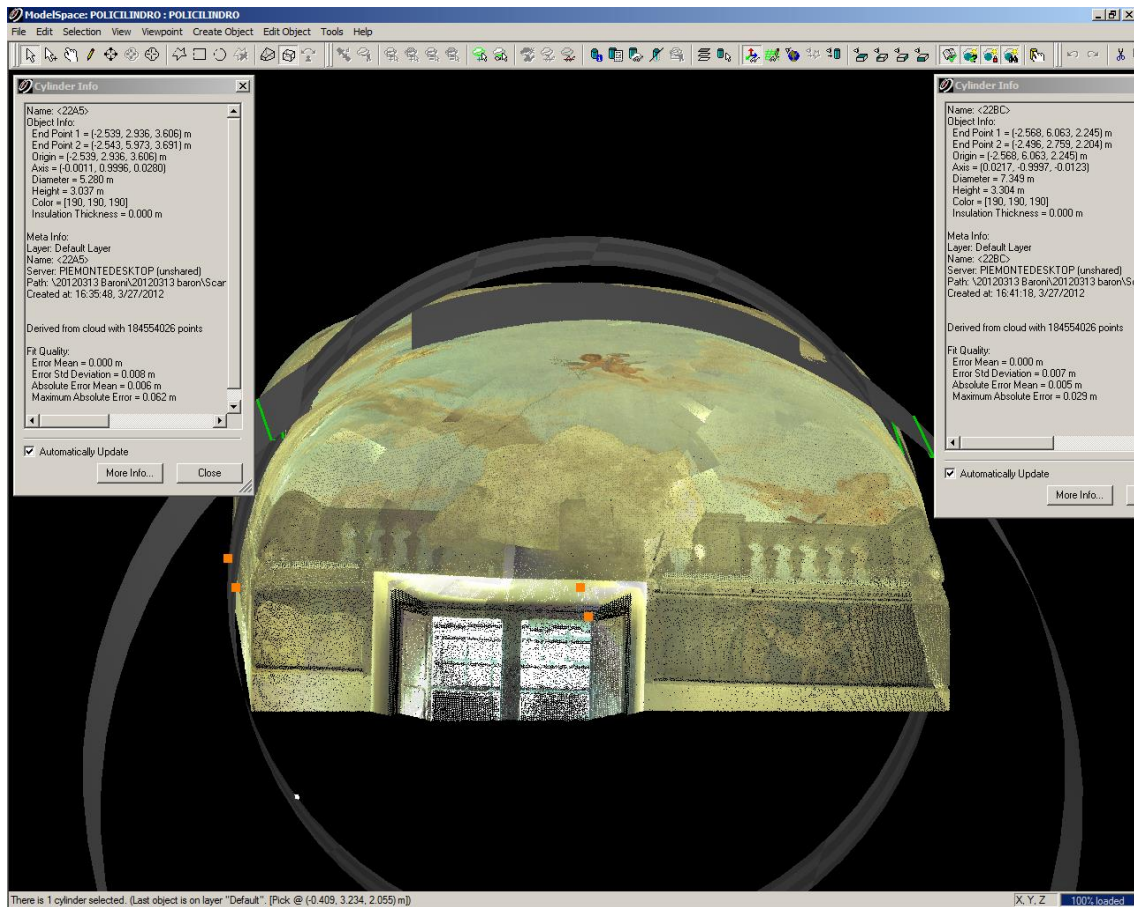


Figura 7.34. Nube de puntos de la bóveda con los cilindros que más se aproximan a ésta.

Ha sido, además, verificado que la bóveda objeto de estudio sigue con buena aproximación la geometría teórica de las bóvedas esquifadas. En la evaluación de los valores de desviación estándar obtenidos debe también considerarse que, respecto al modelo teórico, la bóveda real no tiene transiciones netas entre los cilindros y las “faldas” contiguas ya que la transición adviene gradualmente. De hecho, los valores máximos de la diferencia entre superficie real e ideal se encuentran en estas zonas de transición (figura 7.35).

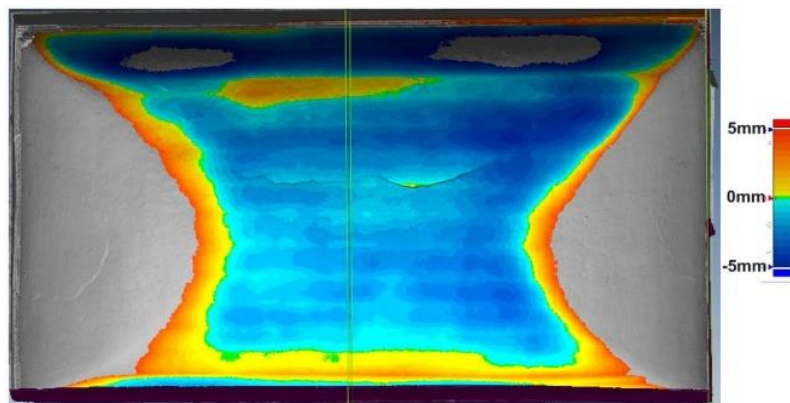


Figura 7.35. Imagen de la desviación de los cilindros con respecto a la bóveda

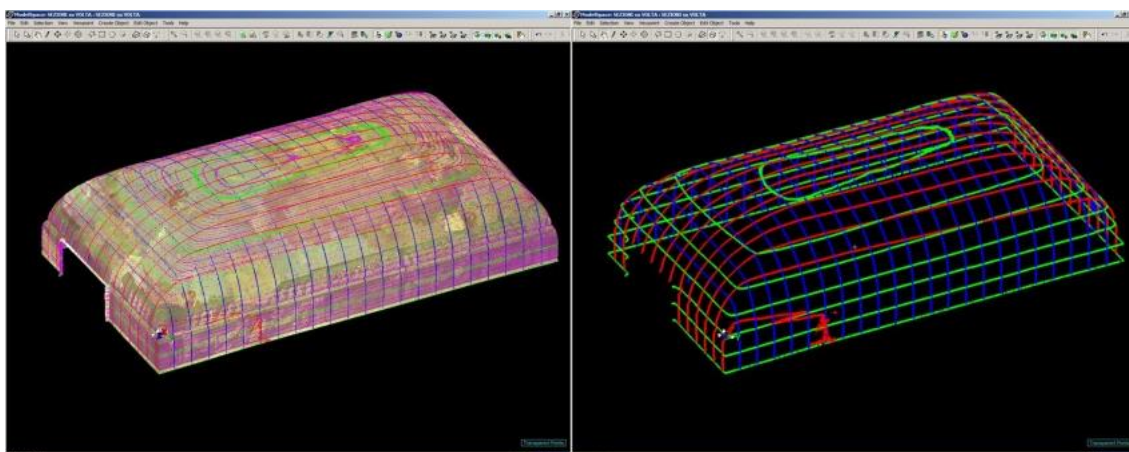
El cilindro constituye una superficie desarrollable y varios software de modelación tridimensional permiten desarrollarlo una vez definido en base a sus ejes y su radio.

En el caso de la bóveda decorada con un fresco, sin embargo, no se trata de desarrollar una superficie puramente geométrica, privada de textura. Después de haber realizado diferentes pruebas, haber utilizado diversos software y haber consultado a algunos expertos, se afirma que no se ha encontrado un software de *reverse modelling* que sea capaz de desarrollar una superficie cilíndrica manteniendo la textura aplicada a alta definición.

Además, desde el punto de vista puramente métrico, si se desarrollase la superficie cilíndrica se idealizaría la bóveda con un modelo teórico y no se mantendrían las distorsiones reales respecto al modelo. La geometría real podría ser representada mejor por un modelo *mesh* a triángulos. Sin embargo, tal modelo resultaría una superficie no desarrollable directamente. Al máximo se podría pensar en proyectarla sobre una superficie desarrollable (cilindro, plano, cono...) evaluando las inevitables distorsiones.

Se ha optado por seguir una metodología que, aunque se caracteriza por un grado menor de automatización, tiene una mayor consideración sobre la forma real de la bóveda.

Primero, a partir de haces de planos a paso constante de 20 cm con las normales paralelas a los ejes coordenados, se han generado tres familias de secciones (figuras 7.36 y 7.37).



Figuras 7.36 y 7.37. A la izquierda imagen de la bóveda con las tres familias de secciones. A la derecha imagen de las polilíneas creadas a partir de las secciones.

Las secciones obtenidas son polilíneas tridimensionales definidas en el mismo sistema de referencia de la nube de puntos. Las polilíneas han sido, después, exportadas en ambiente CAD donde se ha obtenido manualmente el desarrollo del plano de la bóveda, representado por las polilíneas mismas.

En particular han sido utilizadas para el desarrollo las polilíneas representantes de las secciones horizontales. Se ha hecho la suposición de que entre una línea de sección y la otra la bóveda tuviese un recorrido plano. Tal suposición encuentra justificación en el hecho que, siendo las secciones hechas a paso de 20 cm, la diferencia de longitud entre la cuerda y el arco delimitante entre dos secciones contiguas es del orden de pocos centímetros (figura 7.38).

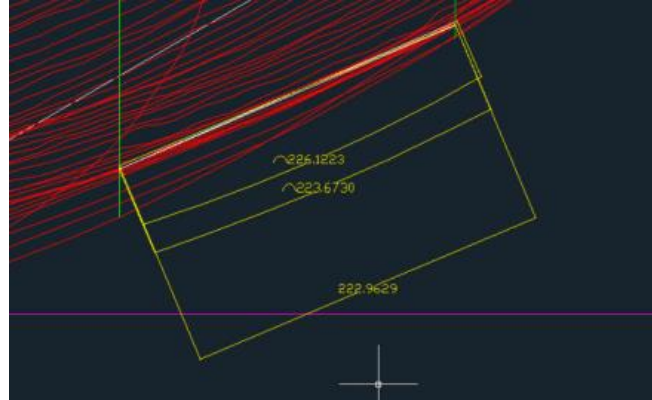


Figura 7.38. Imagen en la que se puede comprobar la desviación entre el arco real que forma la sección entre un paso de 20 cm y la cuerda usada. Medidas en milímetros.

Así, partiendo de la línea de colmo de la bóveda, identificada en la vista desde el alto de las secciones horizontales a paso pequeño (las mismas utilizadas para individualizar las diferentes porciones de la bóveda), han sido medidas, en el modelo tridimensional a secciones, las distancias entre los extremos de las líneas de secciones sucesivas y reportadas en el plano. Al mismo tiempo ha sido posible introducir en el desarrollo también las secciones obtenidas con los planos verticales. (figura 7.39)

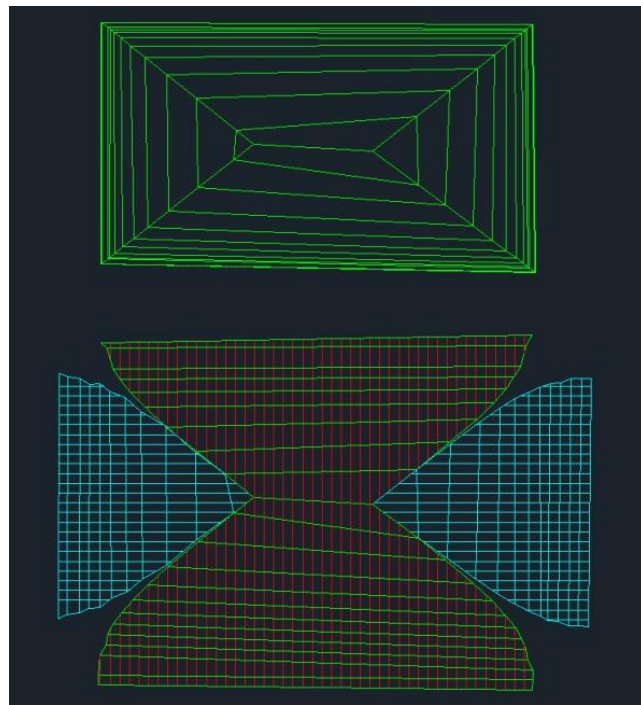


Figura 7.39. Imagen de la planta de las secciones horizontales y del desarrollo de las secciones en 2D a partir del proceso comentado en la columna de la izquierda.

Las secciones han sido utilizadas para la superposición de la textura en el desarrollo de la bóveda. Se han elegido cuatro direcciones, respecto las cuales imposter una vista ortográfica del modelo. Las direcciones son ortogonales a los ejes de los cilindros e inclinadas a 0° , 30° , 60° y 90° respecto al plano de imposta de la bóveda.

Por cada dirección de visualización se han salvado las imágenes del modelo (nube de puntos colorada o modelo texturizado) de una porción de la bóveda incluida en un ángulo de 30°, como está evidenciado en la figura 7.40.

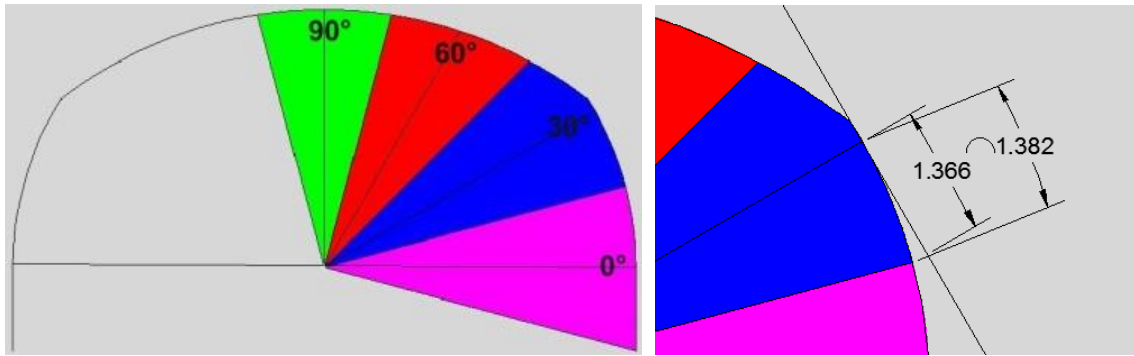


Figura 7.40 y figura 7.41. A la izquierda, imagen de la disposición de las vistas para hacer los screenshot. A la derecha, imagen que permite comparar la desviación entre la proyección ortogonal y la real. La figura 8P presenta sus medidas en metros.

Las imágenes así obtenidas son una proyección ortogonal de la textura de la bóveda sobre el plano. Contienen por lo tanto una distorsión lineal. La deformación lineal relativa resulta poco superior al centímetro en las zonas de la bóveda más desfavorables, y por lo tanto, con curvatura mayor (figura 7.41).

Tal precisión permite realizar elaborados en escala 1:50 e inferiores. En el caso de que hubiese necesidad de producir elaborados en escala mayor sería necesario aumentar las direcciones de visualización.

Por cada posición de visualización del modelo texturizado se producen dos imágenes, una con las secciones visibles y una que solo presenta la textura (figura 7.42).

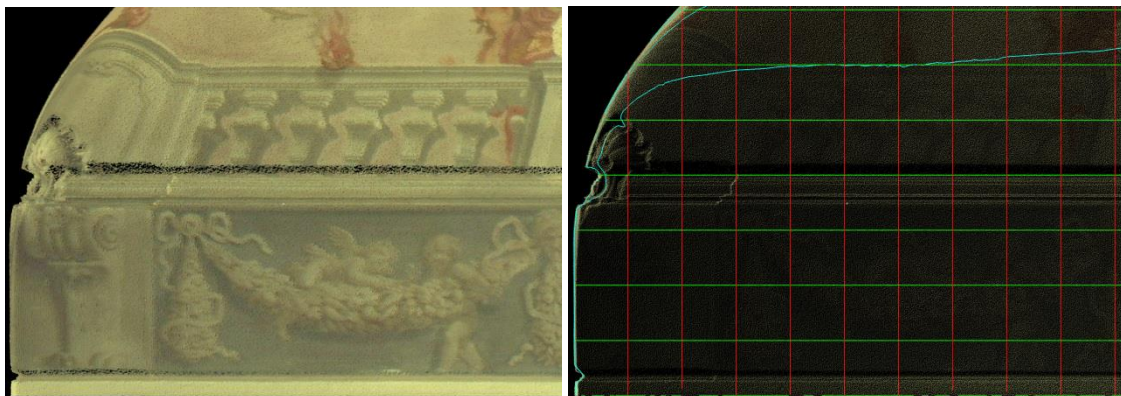


Figura 7.42. y 7.43 Imágenes de uno de los *screenshot* con y sin secciones.



PROCEDIMIENTO DE ALINEAMIENTO EN PHOTOSHOP

Obtenido el desarrollo del esqueleto de la bóveda en *Autocad* y los *screenshot* capturados en el *Cyclone*, se traspa toda esta documentación a *Photoshop* para su elaboración.

En primer lugar, se abre el esqueleto de la bóveda y se pone como fondo de referencia. A continuación se colocan los *screenshots* con y sin sección, enlazándolos entre ellos (los que son similares a excepción de las secciones presente en uno sí y en el otro no), de modo que la deformación aplicada a uno se refleje igual en el otro. Después siguiendo las secciones del esqueleto como referencia, se utilizarán los *screenshot* con secciones para adaptarlos a la forma real (la del esqueleto). Haciendo esto con cada uno de ellos se obtiene como resultado la bóveda “desarrollada” en 2D.

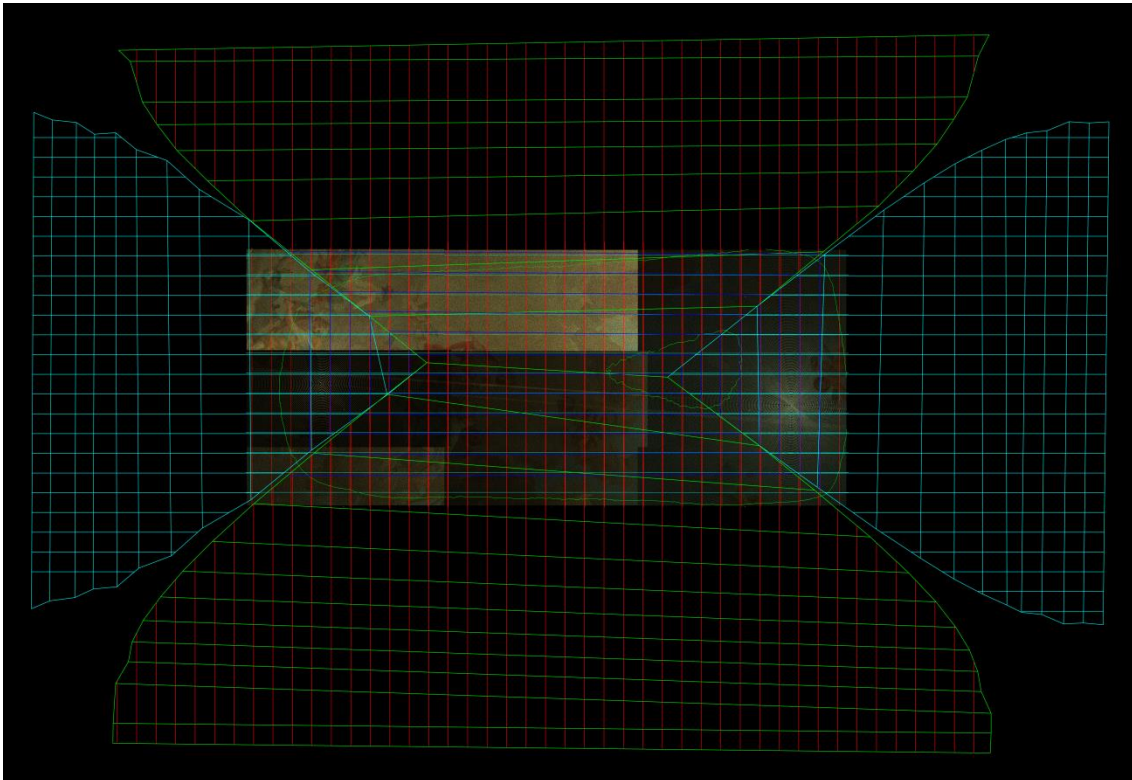


Figura 7.44. Imagen del proceso de apertura de la bóveda en *Photoshop* a partir de su esqueleto realizado en *Autocad* y de los *screenshot* capturados en *Cyclone 7*.

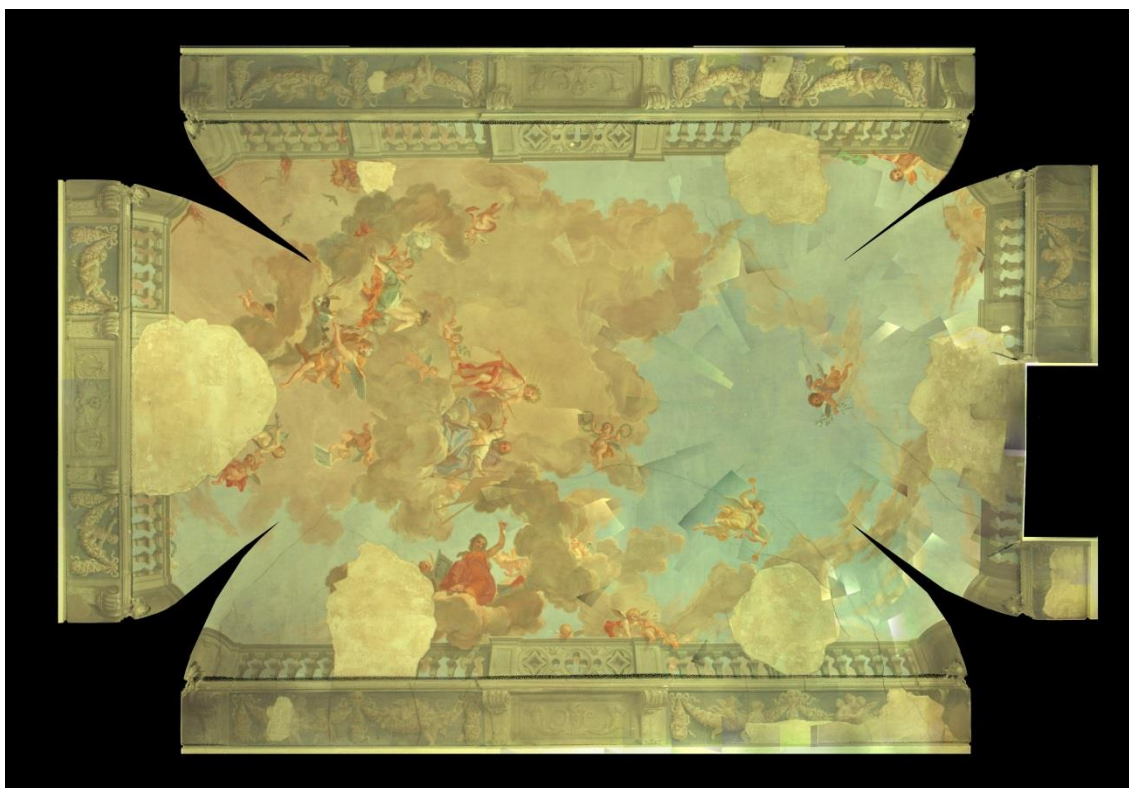


Figura 7.45. Imagen final de la apertura de la bóveda a partir de los *screenshot* realizados a la nube de puntos en el *Cyclone*.

PROCESO DEL MODELO DE ESCANER LÁSER PARA LA INTRODUCCIÓN DE LA TEXTURA FOTOREALISTA

Paralelamente al proceso de apertura de la bóveda, se trabaja en el modelo exportado al *Rapidform XOR3*. Dicho modelo, una vez editado, será exportado en *Luxology Modo 501* para la aplicación de la textura foto-realista. Para éste proceso es necesario el uso de 3 programas diferentes: el *Rapidform XOR3*, el *Photodeler Scanner* y el *Luxology Modo 501*.

En primer lugar, se escogen una serie de fotografías, lo más perpendicular posible a la zona que debe cubrir cada una, y el número necesario para cubrir toda la bóveda, eliminando de la fotografía las partes que generan demasiada distorsión.

Una vez seleccionadas las fotos, se realiza un proceso similar para cada fotografía. Este consiste en:

- 1º. Se escogen puntos en el modelo del escáner láser, en el *Rapidform XOR3*, en la zona común a la fotografía que se va a usar, con una distribución lo más homogénea posible.
- 2º. Estos puntos en 3D se exportan y se abren en el software *PhotoModeler Scanner*.

- 3°. Se introduce la fotografía en el *PhotoModeler Scanner* y se buscan los puntos homólogos en la fotografía con respecto a los seleccionados en el *Rapidform XOR3*.
- 4°. Una vez relacionados los puntos se calcula y se obtiene la posición de la cámara.
- 5°. Situada la cámara, ésta se exporta al *Luxology Modo*.

Independientemente de este proceso, exportado el modelo desde *Rapidform XOR3* a resolución media, se calcula el modelo de superficies de subdivisión y, al igual que en el 2º caso de estudio, se calculará su *UV Map* (figura 7.46).

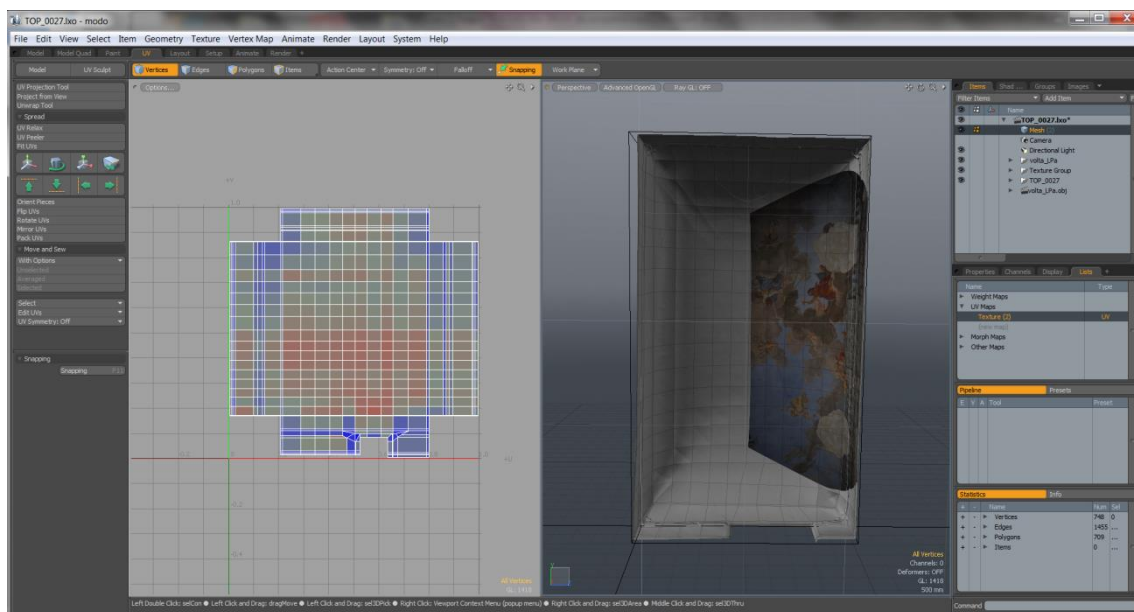


Figura 7.46. En esta imagen se puede observar el *UV Maps* del modelo de superficies de subdivisión de la bóveda y la bóveda con la proyección de una de las fotografías.



Continuando con el proceso anterior, se exporta la cámara de cada una de las fotografías, una a una, y se calcula el *UV Map* con la proyección de la imagen (figura 7.47).

Con los *UV Maps* de cada fotografía, se abren en Modo, y se realiza un “*collage*”, obteniendo de este modo un *UV Map* completo (figura 7.48)¹⁰.



Figura 7.47. *UV Map* de una de las fotografías.

¹⁰ Debe comentarse que debido a que las fotografías son del primer levantamiento fotográfico, y que como se comentaba, presentan demasiada deformación, es necesario la deformación de algunas fotografías para conseguir la continuidad entre los diferentes *UV Maps*.



Figura 7.48. UV Map resultado de la combinación de las *UV Map* “parciales”.

Arreglada la imagen, ésta se aplica en Modo y se obtiene la bóveda resultado del levantamiento con escáner láser, pero con una textura fotorealista, a partir de las fotografías (figura 7.49). Debe comentarse que en el proceso de la obtención del “*collage*” es necesario modificar entre las fotografías factores como la iluminación, la saturación, etc. para obtener una imagen continua.



Figura 7.49.
Render de la bóveda con la aplicación de la textura foto-realista.



CILINDROS PARA EL “DESARROLLO” DE LA BÓVEDA EN 2D

Como se comentaba anteriormente, se contempla otra posibilidad para el “desarrollo” de la bóveda de un modo más automático: a partir de cilindros.

Debe comentarse, que aunque se considera que el método más preciso para la obtención de la bóveda “desarrollada” en 2D es la explicada anteriormente de forma manual, se realizan pruebas para intentar obtener dicho “desarrollo” de un modo más automatizado.

Para ello se realiza la búsqueda de los cilindros ideales a partir de los cuales se forma la bóveda objeto de estudio. La primera prueba realizada parte del diseño de los cilindros en el programa *Cyclone*. Obtenidos estos cilindros, se intentan “abrir” en *Rhinoceros*, software que permite dicha apertura, para los cilindros resultado de un modelo NURBS. Al intentar dicha apertura, se comprueba que ésta no es posible porque los modelos realizados por *Cyclone* son numéricos, no matemáticos.

Comprendido esto, se utiliza los parámetros que definen los cilindros de Modo, para generar dichos cilindros en *Rhinoceros*, de modo que estos, en una segunda fase se puedan “abrir” o “desarrollar”. Estos cilindros son exportados al *PhotoModeler Scanner* para su orientación y proyección de la textura. Sin embargo, una vez obtenidos los cilindros texturizados, se descubre que en la exportación, a pesar de utilizar formatos compatibles con el traspaso de la información de la textura, igualmente pierden dicha información. Se prueban diferentes formatos, como por ejm. “.obj”, “.3dm”, pero el resultado es siempre el mismo, por lo que finalmente se descartan los cilindros como una opción viable.

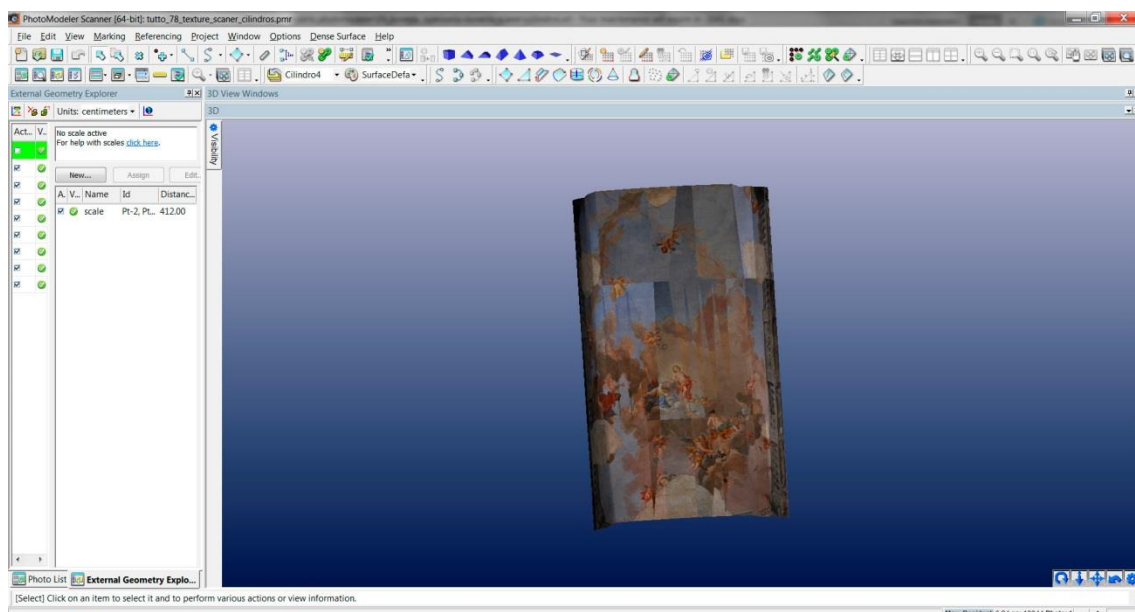


Figura 7.50. Imagen de los dos cilindros ideales unidos que formarían las faldas más largas de la bóveda, con la proyección de una de las fotografías que formaría la textura de éstos.

F. MODELOS OBTENIDOS.

En el caso de estudio, en concreto, la bóveda esquifada en sentido longitudinal es el resultado de la combinación de dos cilindros de diverso diámetro. Estos cilindros se buscan mediante una investigación minuciosa: estudiando las bóvedas de la época, la metodología de construcción... Tras dicho estudio, se busca en la bóveda escaneada los dos cilindros que definen la bóveda objeto de estudio. Una vez comprendido esto se procede a la apertura de estos cilindros. Sin embargo, se presentan diferentes problemas al intentar realizar esta apertura o desarrollo en los diferentes programas de 3D conocidos y utilizados por diferentes investigadores (Remondino, 2012; Bertocchi, 2012) de la materia. Después de diferentes pruebas se concluye que estos programas no son capaces de realizar dicho desarrollo con una medida precisa de desviación de la textura.

Así que se decide volver a la metodología geométrica no automática, realizando una apertura utilizando secciones realizadas cada 20 cm en las 3 direcciones de los ejes. A partir de estas secciones se realiza una apertura manual creando “el desarrollo” del “esqueleto” de la bóveda en 2D. Después se hacen *screenshot* de la bóveda con y sin las secciones (en *Cyclone*), utilizando diferentes planos (a 0°, 30°, 60° y 90°) buscando ser lo más paralelo posible a la bóveda, comprobando que la diferencia máxima entre la distancia real y la que puede venir representada es de 5 cm, y solo en los casos más desfavorables (las zonas transición o de cambio de plano). Así utilizando las imágenes con secciones y legando a estas las otras se reconstruye el diseño del fresco en verdadera dimensión.

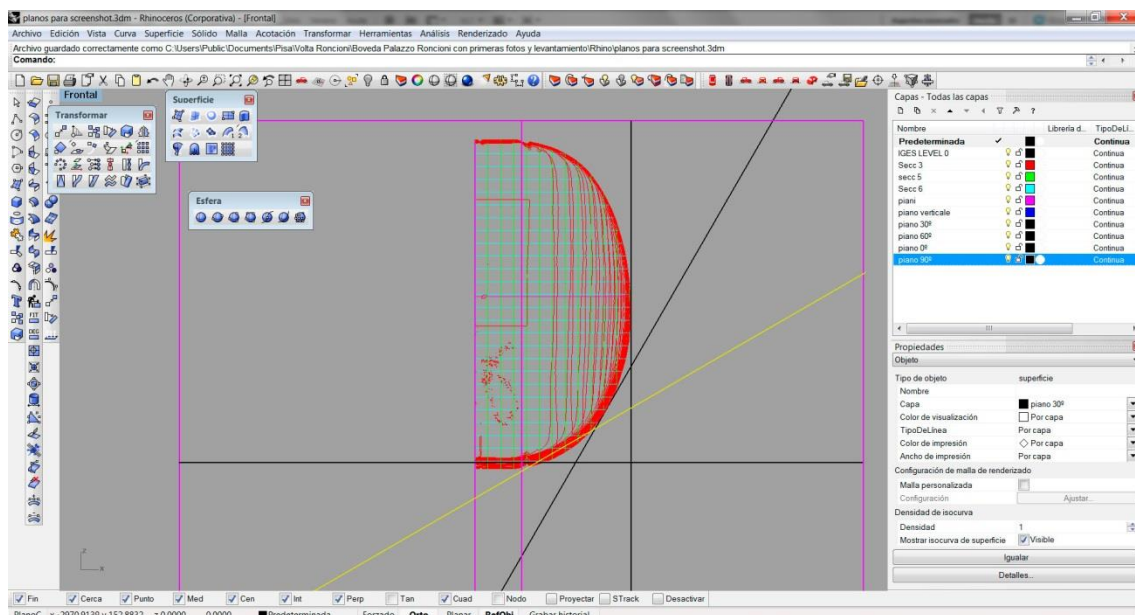


Figura 7.51. Imagen de los planos tangentes usados para el “desarrollo” de la bóveda.



Utilizando el mismo método que para la apertura de la bóveda en 3D con la textura de la nube de puntos obtenida con el escáner, se realiza la apertura de la bóveda texturizada con fotografías a partir del modelo de superficies de subdivisión.

Se utiliza el esqueleto obtenido en *Autocad*, mediante la “apertura” manual, y haciendo en *Luxology Modo* “rendering” de la bóveda con y sin secciones, como se efectúa en el caso anterior, y en las 4 inclinaciones comentadas (0°, 30°, 60° y 90°) se obtiene una bóveda abierta con una calidad visual de la textura mayor.

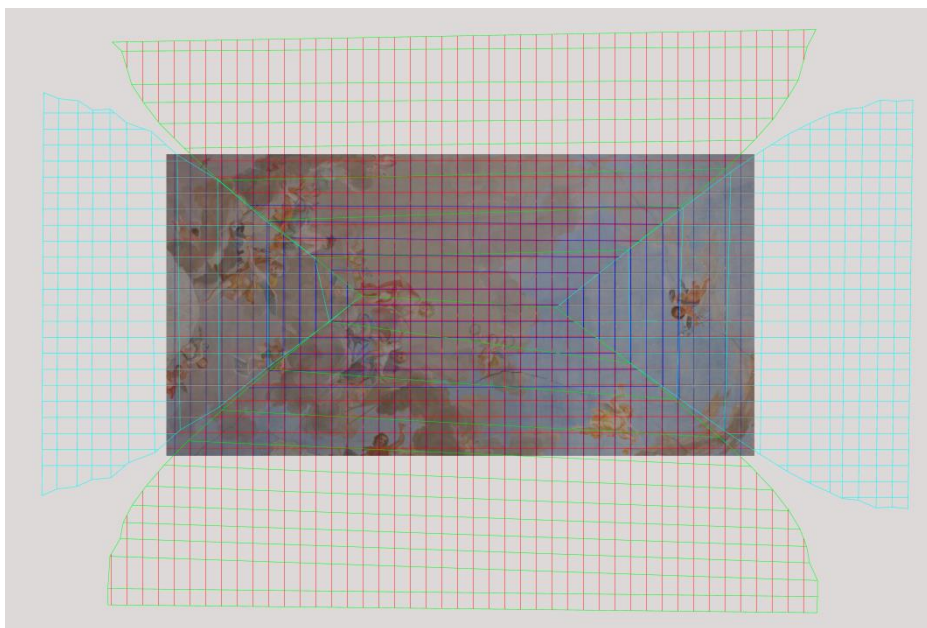


Figura 7.52. Proceso de la apertura de la bóveda con textura foto-realista, a partir de las fotografías del primer levantamiento.



Figura 7.53. Imagen de la bóveda con textura foto-realista “desarrollada”

Una vez realizado el fresco en 2D, de ambas bóvedas, se efectúa la comprobación in-situ de algunas imágenes (impresiones en A1, de partes del fresco, con papel traslucido). Se comprueba que la coincidencia de las imágenes impresas de la textura del modelo hecho con escáner láser es total. Sin embargo, no se obtiene el mismo resultado en el caso del modelo hecho con fotogrametría con fotos individualizadas.



Figura 7.54. Imagen de la comprobación in situ de los A1 impresos del desarrollo de la bóveda en 2D.

Este resultado en parte ya se esperaba, ya que cuando se intentan unir las diferentes partes de la textura resultado de cada imagen, las coincidencias en las zonas de unión no son al 100%. A partir de este resultado, se buscan alternativas en fotogrametría, ya que si bien, la textura del

modelo del escáner es perfecta, no lo es tanto el color, debido a la resolución que tienen las fotos del escáner que es de una calidad media.

Partiendo de esta premisa, se hacen diferentes pruebas de textura, intentando conseguir una calidad lo más alta posible, para presentar una imagen de alta calidad que permita a los restauradores trabajar con fidelidad y precisión. En estos trabajos, se utilizan diferentes técnicas de fotogrametría que darán resultados diversos, presentando la necesidad de compararlos hasta llegar al resultado, según nuestra opinión, más completo.

Realizado el segundo levantamiento fotográfico, éste se utiliza, como se comentaba para generar un modelo digital tridimensional. Se realiza con *PhotoModeler*. Presenta un color en la textura de alta calidad, pero como se comentaba la precisión geométrica no es la adecuada para un estudio de precisión milimétrica, ya que presenta demasiado ruido. Sin embargo, en este caso, se observa que existe una continuidad en la textura a nivel de las imágenes que son representadas en el fresco de la bóveda, cosa que no sucedía cuando se orientan las fotografías en *PhotoModeler* de forma individual para obtener la textura para el modelo del escáner.

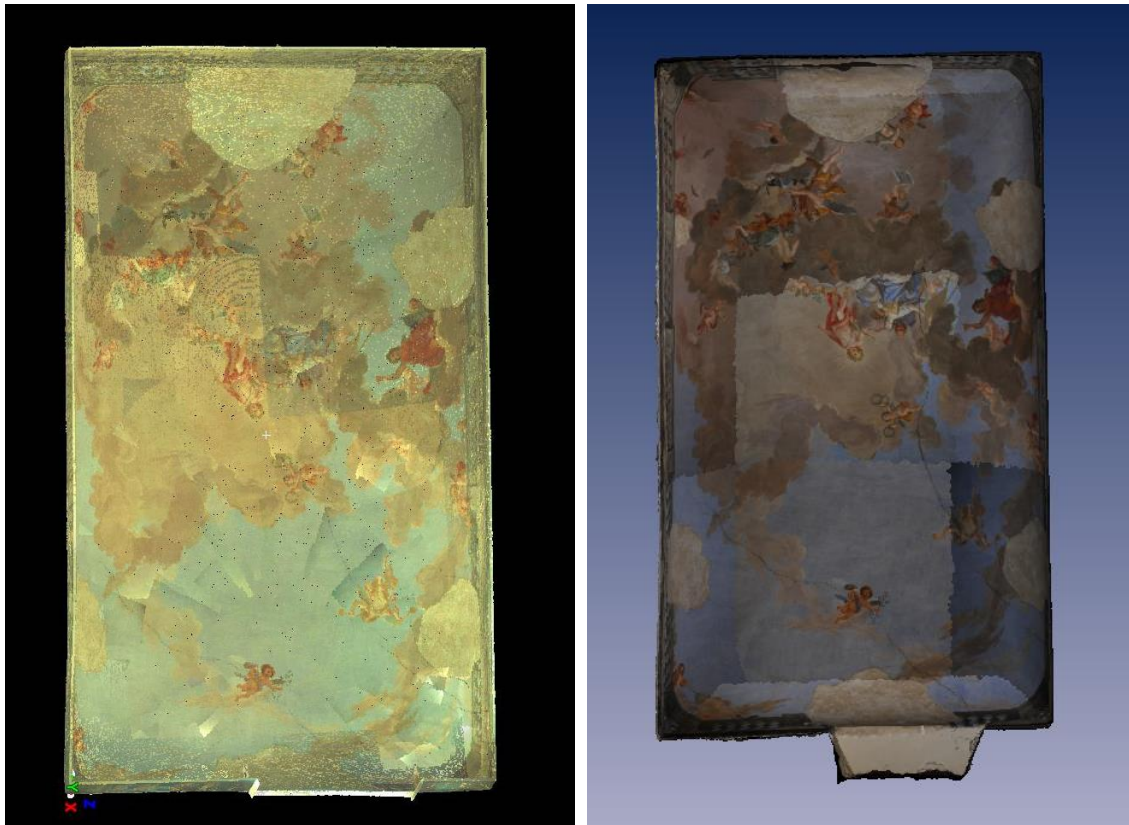


Figura 7.55 y 7.56. Imágenes de la bóveda obtenida con escáner láser. A la derecha textura de la nube de puntos coloreada con las fotos que realiza la cámara que tiene integrado el escáner. A la izquierda textura a partir de las fotografías del segundo levantamiento en el que se pueden ver las partes que se toman de cada fotografía, por presentar una irregularidad con respecto a la iluminación, sin embargo presenta una continuidad de los dibujos que la forman.

Considerando esta cuestión se toma la opción de orientar la bóveda del escáner con respecto a la generada con *PhotoModeler*. Para ello se importa la bóveda de *PhotoModeler* al *Rapidform* y se orienta la bóveda del escáner para meterla en el mismo sistema de referencia. Una vez situada en ese sistema de referencia, ésta se exporta al *PhotoModeler*. Teniendo la bóveda generada por el escáner orientada y a la misma escala, es posible proyectar las fotografías que se han utilizado para generar el modelo digital tridimensional con *PhotoModeler*. De este modo se consigue el modelo más completo: un modelo geoméricamente modelado a partir de la nube de puntos del escáner láser y con una textura de alta calidad, a partir de las fotografías tomadas en el segundo levantamiento fotográfico (figura 7.56).

Debe comentarse también, que el modelo obtenido por *Agisoft PhotoScan* aunque no presentaba una buena textura debido a las fotografías (del primer levantamiento), la calidad del modelo a nivel geométrico es bastante superior al modelo realizado con *PhotoModeler* (figura 7.57). Así que al hacer el modelo con las fotografías del segundo levantamiento se obtiene un modelo con alta calidad geométrica y de textura. Como se puede observar en la figura 7.59, en la cual se compara con el modelo del escáner, la desviación media de la bóveda es de 5mm. El problema de este programa sigue siendo la imposibilidad de controlar algunos parámetros, como por ejemplo, el tamaño de los polígonos, o el que la escala del modelo se base exclusivamente en una medida¹¹.

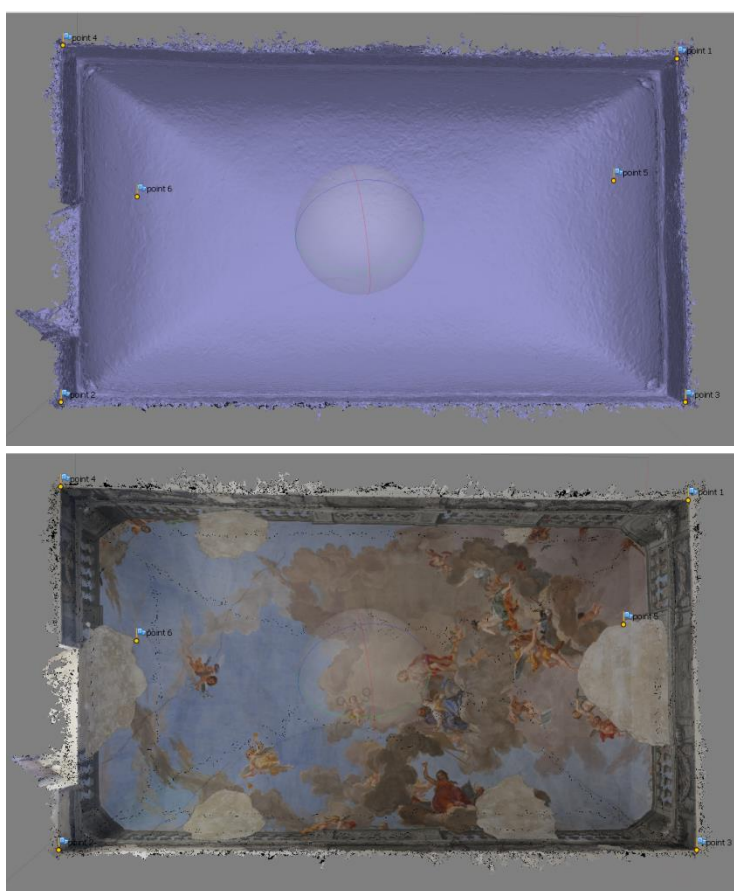


Figura 7.57 y 7.58. Imágenes de la bóveda obtenida con PhotoScan con y sin textura de color.

¹¹ Debe recordarse que esta afirmación se realiza sobre una versión específica del programa, como se comenta a lo largo de la tesis.

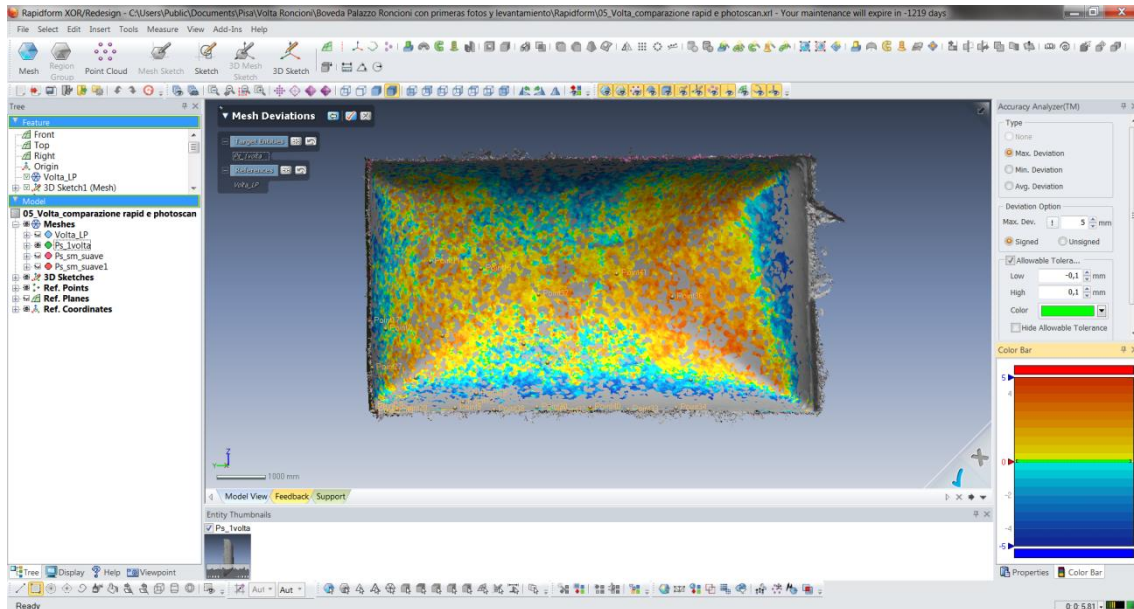


Figura 7.59. Programa *Rapidform XOR3* en el momento de la comparación entre el modelo de escáner y el modelo del *PhotoScan*.

G. RESULTADOS

Por un lado, se obtiene el “desarrollo” de la bóveda, que era uno de los objetivos principales, con un precisión milimétrica, comprobada in-situ, a partir del modelo de nube de puntos. Por lo que se puede confirmar, que el método de desarrollo de la bóveda es correcto y que la precisión del escáner para este estudio es totalmente adecuado.

Por otra parte podemos concluir que el uso de fotografías aisladas para la integración de la textura foto-realista, no ha dado un buen resultado, ya que en la comprobación in-situ de éstos, los dibujos son en parte no coincidentes, presentando pequeñas desviaciones. Esta consideración, además, ya era previsible, debido a que como se observa en la imagen de la derecha, cuando se estaban uniendo las diferentes partes de la textura obtenidas con el *UVMaP* de cada fotografía individual, se encontraban discontinuidades, que se resuelven uniendo las imágenes en la zona de superposición coincidente.



Figura 7.60. Imagen del proceso de unión de las diferentes partes de la textura foto-realista para la composición de una única.

Se realiza un cuadro comparativo en Excel (figura 7.62), con las dos texturas, tomando como correcta la textura “desarrollada” del modelo de nube de puntos, y a partir de ahí haciendo una medición de la otra para calcular su desviación. Marcando una alta cantidad de puntos (171), repartidos por toda la bóveda, con una distribución lo más homogénea posibles (teniendo en cuenta que debe ser mediante dianas naturales, puntos reconocibles claramente), se obtiene una desviación media, en valores absolutos, con respecto a la distancia de 0.071 metros, con respecto al ancho 0.018 metros y con respecto al alto de 0.057 metros.

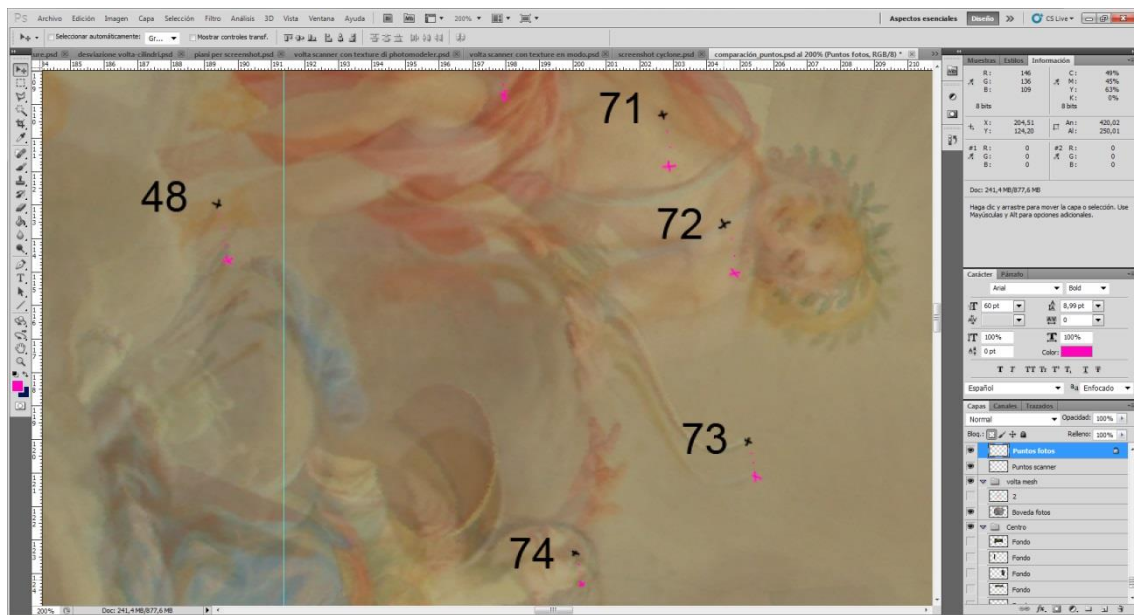


Figura 7.61. Imagen parcial de las dos texturas sobrepuestas, que se han usado para calcular la desviación.

Medidas a Escala 1:20					
Puntos	Angulo	Distancia	Ancho	Alto	
1	-79,40	4,61	0,85	4,53	
2	-70,90	4,26	1,39	4,02	
3	-61,70	3,43	1,62	3,02	
4	-61,90	2,73	1,29	2,41	
5	-51,40	1,96	1,23	1,53	
6	-39,40	1,74	1,34	1,10	
7	-23,70	0,64	0,58	0,26	
8	-170,60	0,92	-0,91	0,15	
9	-143,00	2,47	-1,98	1,49	
10	-107,00	2,50	-0,73	2,39	
11	-83,70	4,20	0,46	4,17	
12	-137,70	0,80	-0,59	0,54	
13	-78,80	2,45	0,48	2,40	



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



14	-91,70	1,78	-0,05	1,78
15	-84,30	0,90	0,09	0,89
16	-112,20	1,26	-0,48	1,16
17	-69,30	0,62	0,22	0,58
18	-102,70	0,44	-0,10	0,43
19	38,70	0,11	0,09	-0,07
20	-45,70	2,03	1,42	1,46
21	-44,50	2,20	1,57	1,54
22	-71,10	0,98	0,32	0,93
23	-84,10	2,90	0,30	2,88
24	11,30	0,22	0,22	-0,04
25	-82,50	1,97	0,26	1,95
26	-70,60	2,81	0,93	2,65
27	-89,60	2,69	0,02	2,69
28	-107,30	2,49	-0,74	2,37
29	-80,00	2,38	0,41	2,34
30	-76,40	2,13	0,50	2,07
31	-117,60	1,53	-0,71	1,35
32	-115,10	1,21	-0,51	1,09
33	-113,90	1,18	-0,48	1,08
34	-44,40	1,68	1,20	1,17
35	-36,80	1,31	1,05	0,78
36	-115,60	1,47	-0,64	1,32
37	-60,50	0,47	0,23	0,41
38	-48,80	0,56	0,37	0,42
39	-20,30	0,43	0,41	0,15
40	-79,60	0,34	0,06	0,34
41	-80,80	2,48	0,40	2,44
42	-79,80	2,48	0,44	2,44
43	-78,20	2,62	0,54	2,57
44	-83,50	1,55	0,18	1,54
45	-94,90	1,54	-0,13	1,53
46	-79,50	2,38	0,43	2,34
47	-79,50	2,38	0,43	2,34
48	-79,20	1,70	0,32	1,67
49	-13,40	0,99	0,96	0,23
50	-18,40	0,47	0,45	0,15
51	-7,90	0,32	0,32	0,04
52	24,80	0,25	0,23	-0,11
53	9,50	1,17	1,16	-0,19
54	1,70	1,18	1,18	-0,04
55	0,00	1,04	1,04	0,00



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



56	-2,40	1,07	1,07	0,04
57	-5,10	1,19	1,18	0,11
58	-28,50	1,18	1,04	0,56
59	-74,90	3,53	0,92	3,40
60	-77,10	2,89	0,64	2,81
61	-70,40	3,39	1,14	3,19
62	-75,30	3,12	0,79	3,02
63	-74,70	3,00	0,79	2,89
64	-82,30	3,43	0,46	3,40
65	-73,20	2,50	0,72	2,39
66	-69,10	1,83	0,65	1,71
67	-70,70	2,37	0,78	2,24
68	-70,70	1,81	0,60	1,71
69	-75,90	1,80	0,44	1,74
70	-86,30	1,96	0,13	1,95
71	-83,20	1,54	0,18	1,53
72	-78,00	1,49	0,31	1,46
73	-78,50	1,07	0,21	1,04
74	-76,50	0,97	0,23	0,94
75	-17,50	0,66	0,63	0,20
76	15,60	0,76	0,73	-0,20
77	7,70	0,26	0,26	-0,04
78	-4,10	0,79	0,79	0,06
79	6,10	0,80	0,80	-0,08
80	-32,10	0,78	0,66	0,42
81	-39,60	0,53	0,41	0,34
82	50,50	0,31	0,20	-0,24
83	-18,20	0,65	0,62	0,20
84	-25,10	0,62	0,56	0,26
85	-116,60	0,03	-0,01	0,03
86	-31,90	0,55	0,47	0,29
87	-80,90	3,56	0,56	3,51
88	-84,10	3,07	0,32	3,05
89	-93,70	3,10	-0,20	3,10
90	-96,20	3,00	-0,33	2,98
91	-88,20	0,44	0,01	0,44
92	-90,00	0,50	0,00	0,50
93	-124,10	0,29	-0,16	0,24
94	-99,50	0,30	-0,05	0,30
95	-87,90	0,38	0,01	0,38
96	-178,00	0,41	-0,41	0,01
97	0,00	0,00	0,00	0,00



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



98	-121,90	0,44	-0,23	0,37
99	92,00	0,20	-0,01	0,20
100	-74,50	0,48	0,13	0,46
101	-59,90	0,51	0,25	0,44
102	-139,90	0,51	-0,39	0,33
103	114,60	0,57	-0,24	-0,52
104	-84,20	3,16	0,32	3,15
105	-85,80	3,02	0,22	3,01
106	-84,90	2,89	0,26	2,88
107	-87,00	2,89	0,15	2,88
108	-85,00	3,16	0,27	3,15
109	-96,80	2,74	-0,33	2,73
110	-87,00	1,68	0,09	1,68
111	-98,70	2,03	-0,31	2,01
112	-100,70	1,96	-0,36	1,92
113	-99,40	0,81	-0,13	0,80
114	-99,70	1,15	-0,19	1,14
115	-57,80	1,52	0,81	1,29
116	-77,80	1,71	0,36	1,68
117	56,90	0,45	0,25	-0,38
118	-73,90	0,54	0,15	0,52
119	67,20	0,15	0,06	-0,13
120	103,00	0,09	-0,02	0,09
121	74,50	0,34	0,09	-0,33
122	44,30	0,41	0,30	-0,29
123	34,90	0,28	0,23	-0,16
124	-83,80	0,45	0,05	0,45
125	-102,20	0,43	-0,09	0,42
126	160,80	0,40	-0,38	-0,13
127	180,00	0,04	-0,04	0,00
128	-85,40	3,52	0,28	3,51
129	-78,00	3,82	0,79	3,74
130	-84,00	2,97	0,31	2,95
131	-71,00	2,89	0,94	2,73
132	-70,40	2,29	0,77	2,16
133	-16,10	0,48	0,46	0,13
134	10,90	0,89	0,87	-0,17
135	-12,90	1,15	1,12	0,26
136	96,30	0,24	-0,03	-0,24
137	9,10	1,06	1,05	-0,17
138	-10,10	0,56	0,55	0,10
139	-13,70	0,64	0,62	0,15



140	-14,40	0,64	0,62	0,16
141	-50,20	0,34	0,22	0,26
142	100,20	0,35	-0,06	-0,34
143	-42,90	0,17	0,12	0,11
144	67,20	0,18	0,07	-0,17
145	-5,20	0,10	0,10	0,01
146	60,60	0,39	0,19	-0,34
147	1,70	0,29	0,29	-0,01
148	63,40	0,04	0,02	-0,04
149	-88,60	3,49	0,09	3,49
150	-72,40	3,76	1,14	3,58
151	-	-	-	-
152	-37,80	1,35	1,07	0,83
153	-55,30	1,15	0,65	0,94
154	-36,50	1,05	0,85	0,63
155	-34,30	0,91	0,75	0,51
156	-41,80	1,11	0,83	0,74
157	6,80	1,19	1,18	-0,14
158	-33,30	0,80	0,67	0,44
159	-21,70	1,17	1,08	0,43
160	-18,40	0,92	0,87	0,29
161	-26,20	0,68	0,61	0,30
162	-8,70	0,87	0,86	0,13
163	23,70	0,24	0,22	-0,10
164	67,00	0,83	0,33	-0,77
165	-65,80	2,15	0,88	1,96
166	-77,30	1,84	0,41	1,80
167	-65,50	1,42	0,59	1,30
168	-71,70	1,54	0,49	1,46
169	-59,30	1,21	0,62	1,04
170	-54,00	0,80	0,47	0,64
171	115,90	0,69	-0,30	0,62
Sumatorio	-7836,30	242,47	62,02	195,13
Media		1,43	0,36	1,15
Medida real en metros		0,07131471	0,01824118	0,05739118

Figura 7.62. Tabla copiada de excel en la que se calculan las desviaciones con respecto a la distancia, el ancho y el alto.

En cuanto a los modelos realizados para el cálculo de las precisiones, como se comentaba anteriormente, los modelos obtenidos con *PhotoModeler* no presentan una precisión a nivel geométrico que se considere óptimo para análisis estructurales, para estudios de altas

precisiones, valoraciones de superficies, volúmenes, centros de gravedad, producciones de modelos físicos a través de prototipos, etc. Sin embargo, sí será adecuado para imágenes sintéticas y animaciones con fines divulgativos, realización de partes integrativas en el ámbito por ejemplo de restauraciones virtuales para la evaluación comprensiva de las propuestas proyectuales, aplicaciones *real-time*, etc.

En el caso del modelo obtenido con *Agisoft PhotoScan*, debe comentarse que se puede llegar a conseguir un modelo geométrico bastante preciso, y presenta una textura foto-realista de alta calidad. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el problema de la escala a partir de un valor (ya solucionable con las nuevas versiones), es lo que limita dicha precisión, y también el hecho de que no se pueda controlar el tamaño de los polígonos directamente. Este será el resultado de la relación entre el tamaño del modelo a realizar y la cantidad de polígonos elegidos en la fase de la construcción de la geometría (en este proyecto se ha elegido una resolución media y una cantidad de polígonos de 200.000, parámetros marcados por la capacidad de procesado del ordenador).

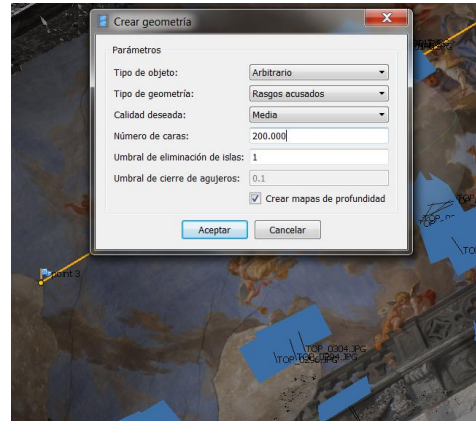


Figura 7.63. Parámetros impostados para la generación de la geometría

La cantidad de polígonos a veces está limitada por el procesador del ordenador utilizado. Para este estudio se ha utilizado un ordenador INTEL® Core™ i5 CPU M520 @ 2.40 GHz 2.40 GHz, con una RAM de 4.00 GB y un sistema operativo de 64 bits.



Figura 7.64. Imagen del modelo realizado con *PhotoScan*, con textura foto-realista de alta calidad.



H. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA DE REFERENCIA:

- ❖ Bertocci, S. 2012. *Architettura dell'inganno: artifici prospettici dei quadraturisti nella grande decorazione di età barocca in toscana. XI Congreso internacional de expresión gráfica aplicada a la edificación.* Edita la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2012. ISBN: 978-84-8363-964-1.
- ❖ Cueli López, J.T., 2011. *Fotogrametría práctica.* Ed. Tantin. Santander. ISBN 978-84-9692-093-4.
- ❖ Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P., Di Tondo, S., 2012. Il problema della mappatura del colore nei modelli digitali 3D a displaced subdivision surface da rilevamento laser scanner in ambito archeologico. Dentro de *Colore e colorimetrica. Contributi multidisciplinari. Vol. VIII.* Italia.
- ❖ M. Ciampa, 2010. Alle radici dei palazzi pisani: il caso di Palazzo Roncioni, in E. Daniele (a cura di), *Le dimore di Pisa, l'arte di abitare i palazzi di una antica Repubblica Marinara dal Medioevo all'Unità d'Italia*, Alinea, Firenze. p. 127-134.
- ❖ Pera L., 1987. *Tecnica dell'architettura. Tipologia strutturale. Parte seconda.* Ed. Goliardica, Pisa, p. 31-84.
- ❖ De la Plaza Escudero, L., 2008. *Diccionario visual de términos arquitectónicos.* Ed. Grandes Temas Cátedra. Madrid.
- ❖ Remondino, F., Lo Buglio, D., Nony, N., De Luca, L., 2012. Detailed primitive-based 3D modeling of architectural elements. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.* P. 285-290.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ❖ Fantini, F., 2012. Modelos con nivel de detalle variable realizados mediante un levantamiento digital aplicados a la arqueología. *Revista EGA. Expresión Gráfica Arquitectónica. N°19.* Universidad Politécnica de Valencia. Valencia P. 306-317.
- ❖ Panajia, A. y Melis, A. 2004. *I palazzi di Pisa nel manoscritto di Girolamo Camici Roncioni*, ETS, Pisa.
- ❖ Regidor Ros, J.L., Delhom Solaz, S., Valcárcel Andrés, J., Zalbidea Muñoz, A. y Soriano Sancho, P., 2008. Transferencia de impresiones Ink Jet, una herramienta para la reconstrucción pictórica de faltantes. *Arché. Publicación del Instituto Universitario de*



Restauración del Patrimonio de la UPV, 3. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia P.33-42.

- ❖ Regidor Ros, J.L., Palumbo, M., Gómez, G., Clavel, I., 2006. Restauración y solución propuesta para la exposición de los fragmentos conservados en la bóveda de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia. *Arché. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV, 1.* Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. P. 45-52.
- ❖ Zalbidea Muñoz, M.A., Clavel Piá, I., Gómez Chaparro, G. y Palumbo, M., 2007. Los lunetos de la Iglesia de los Santos Juanes: su proyección arquitectónica y su ejecución pictórica. ”, *Arché. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV, 2.* Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. P. 39-46.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



CAPÍTULO 7. CASO DE ESTUDIO 4



Nueva herramienta para el levantamiento de cubiertas: Iglesia San Miniato en Marciana (Cascina, Pisa)

A. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

El primer documento hasta hoy encontrado que cita el nombre de la Iglesia de San Miniato en la localidad de Marciana, es un pergamino del 1011 (Ciampi, F., 2011), que habla de herencias de terrenos y de la iglesia entre diferentes sacerdotes. Se sabe que la Iglesia de San Miniato en Marciana Minore, existía antes de este documento.

Ciertamente fue construida sobre otra Iglesia, sobre un templo pagano preexistente o, como parece más probable, sobre una casa romana. Esta última hipótesis es considerada por algunas notas escritas en el periodo de la restauración hecha en el 1926, en el cual aparecen muros particulares, al rehacer el pavimento.

Un pergamino del 12 de abril del 970 cita (Ciampi, F., 2011), entre los pueblos sujetos a la iglesia parroquial de S. Casciano, Marciana Maggiore, por lo tanto la iglesia de S. Michele di Marciana Maggiore nació antes que la de Marciana Minore. La razón de que hubiese dos Iglesias en Marciana es debido a que en aquellos siglos, frecuentemente había aluviones del Arno con las consiguientes desviaciones del río. Antes del 1000 el Arno, durante un desbordamiento en Lugnano, creó un recodo y el río pasando por Marciana la dividió en dos. El nuevo curso alcanzó la localidad de Arnaccio y después de un amplio recodo llegó a la altura de Navacchio para después reencontrarse en Zambra. Siendo el pueblo de Marciana dividido por el Arno, algunos marcianesi no podían asistir a las celebraciones religiosas oficiadas en la Iglesia de San Michele y por ello se construyó la Iglesia de San Miniato di Marciana Minore, después llamada comúnmente Marcianella.



Figura 8.01. Imagen de la fachada principal de la iglesia.

La nueva construcción probablemente fue erigida, como se ha dicho en precedencia, sobre las ruinas de un templo pagano. Debe marcarse que, la forma particular y la ubicación de las casas que se encuentran a pocos metros de la Iglesia, dejan presuponer la existencia de un convento, ya que, el acceso a la Iglesia, antes de su restauración en 1927, era del lado de la casa Diodati. Parece que unos dos siglos después, el convento se transfirió a una distancia de unos kilómetros del anterior. Después de otros dos o tres siglos, la mayor parte de los monjes abandonaron también este convento, porque su número estaba disminuyendo o por la venta de aquellas tierras.

San Miniato en Marciana Minore era Parroquia independiente de la de Marciana Maggiore, con un solo oficio en los días festivos. Durante siglos fue dirigida por monjes que sucedieron a los sacerdotes. En el 1575, se realizó la unión de las dos Iglesias y la historia de la Parroquia de S. Miniato en Marciana Minore se unió a la de S. Michele de Marciana Maggiore.

La Iglesia Monumental de S. Miniato de Marcianella, cita Ciampi, F. (2011), es una auténtica joya del arte Románico del siglo X. De forma rectangular, tiene una longitud de 20 metros, una anchura de 7 y una altura de 8 metros, con 5 ventanas a “aspillera”, de las cuales una se sitúa en el ábside, tres en la parte de mediodía y una en forma de cruz en la fachada. Tiene dos puertas, una pequeña, al Sur, y la principal en la fachada, al Oeste. En esa misma fachada se encuentra un campanario a “Vela o Ventola” con campana. Toda ella es de piedra verrucana perfectamente cuadrada y suavizada. En el interior de la iglesia, a la derecha de quien entra, hay una característica pila para el agua Santa apoyada sobre una columna de granito. Sobre el único altar, perfectamente entonado con el estilo de la Iglesia, hay una tabla del siglo XVI. Esta representa la Virgen con el Niño que tiene en la mano una golondrina, a los lados de la Virgen se encuentran S. María Magdalena penitente y San Miniato.



Figura 8.02. Imagen del interior de la iglesia en la que podemos ver el altar de piedra y la tabla con la pintura del siglo XVI de la Virgen con el niño, Santa María Magdalena y S. Miniato.

Al llevar a cabo los trabajos de restauración de la Iglesia de Marcianella, Don Andrea Del Seppia transfirió el fresco sobre la tabla a la Iglesia di Marciana poniéndolo en el coro. De un

inventario seguido por la República Francesa del 1799, se puede tener una idea de cómo fueron efectuadas las restauraciones: la Canónica, contigua a la Iglesia, tenía seis estancias en la planta baja y las mismas en la planta superior en el palco, con techos inservibles. La Iglesia cubierta con estucos y yesos, tenía un Altar con un muro en la pared izquierda y encima un cuadro figurativo de la Virgen, San José con el Niño y otros Santos, propiedad de la familia Del Seppia cuyo escudo de armas resultaba esculpido en el pedestal de las columnas del Altar. El Altar Mayor, con los lados apoyados al muro, dividía la Iglesia del coro. Encima estaba la pintura sobre la tabla, del siglo XVI. En 1872 se realizó una posterior restauración de la Iglesia. Realizando una síntesis, anotaba Don Giuseppe Pecori, fue demolido el Altar de S. Giuseppe de la familia Del Seppia, dado que el lugar en el que estaba situado, resultaba inútil y engorroso. El cuadro que se encontraba sobre el Altar Mayor, fue trasladado al coro de la Iglesia de S. Michele y en su lugar fue colocado el de San Giuseppe. Así continuó el arbitraje de la familia Del Seppia. Además, se hicieron dos muros al lado de la puerta de la iglesia y se abrió una pequeña estancia al lado.

En el año 1803, Don Stanislao Ercolini quiso demoler la Iglesia de Marcianella, y con el material de ésta pretendía agrandar la Iglesia de Marciana. Pero afortunadamente hubo quien se opuso impidiendo que se cometiese una masacre al patrimonio artístico de Marciana. El 10 de noviembre llegó una carta a Don Ercolini del Arzobispo de Pisa Mons. Angiolo Frateschi. Hubo una reunión y con ella se rechazó la demolición de la Iglesia.

Don Ercolini se peleó tanto con la viuda Del Seppia, que el Arzobispo, al que llegaron las noticias, consideró oportuno contactar con el Parroco para saber la razón y lo hizo con una carta el 14 de abril del 1805. Así fue impedida la demolición del monumento más insigne de Marciana.

El ayuntamiento de Cascina envió a Don Giuseppe Pecori una circular en la cual le recordaba la responsabilidad del cuidado y la intervención para la conservación de los edificios monumentales, siendo responsables directos sus propietarios, y por lo tanto en ese caso, él con respecto a la Iglesia de S. Miniato y Marcianella. Después de algún que otro año la Iglesia de la Marcianella cayó en un total estado de abandono. El tejado inseguro había hecho que la Iglesia fuese cerrada al sagrado culto y los visitantes aparecían solo alguno de vez en



Chiesa monumentale di S. Miniato a Marcianella.

Figura 8.03. Imagen de la iglesia antes de su última intervención. (Imagen de Ciampi, F., 1984: 23)

cuando, los muros apenas se entreveían, detrás de la hiedra y otras plantas trepadoras que se habían aferrado a las grietas de las piedras.

Para que esta obra no se perdiese Don Giuseppe Mazzei constituyó en Marciana un comité pro-restauraciones. Con las generosas ofertas de algunas personas y de todo el pueblo, se iniciaron los trabajos de restauración para devolver al culto y al pueblo de Marciana, su Iglesia.

En el archivo parroquial se encuentra un diario de todos los trabajos seguidos en la restauración de la Iglesia de Marcianella, escrito por Don Mazzei. Este tiene un valor histórico no indiferente porque refleja el conocimiento de detalles tan interesantes que sin el diario habrían sido irremediablemente perdidos.



Figuras 8.04 y 8.05. A la izquierda imagen del campanario de la iglesia con la campana bajo el arco. A la derecha imagen interior de la ventana en forma de cruz que da a la fachada principal.

En él cuenta la intervención de restauración, detallada, entre el año 1926 y 1927. En junio del 1926, se realizó la demolición completa del tejado y se construyó uno nuevo. Se demolió el altar de piedra arenisca del 1686. Se eliminó el yeso de todas las paredes internas y un viejo arco que separaba la Iglesia de un pequeño coro, se devolvieron al desnudo las pequeñas ventanas románicas y se tiró un pequeño campanario de ladrillos situado sobre la parte posterior, en la parte de levante de la Iglesia. Además, se eliminó una lápida sepulcral situada en el interior del muro, a mitad de la Iglesia de la parte Norte, dedicada a Giuseppe Del Seppia. La campana, una vez quitada del antiestético arco de ladrillos, se volvió a poner en su verdadero lugar sobre la fachada, en mitad del campanario bajo un arco (figura 8.04).

En abril del 1927 se continúan las obras de restauración. Se levantó el pavimento y se abrieron muchas tumbas. Los huesos se mantuvieron en su lugar y las tumbas se rellenaron con

tierra. Unos días después, se quitaron del Camposanto los restos de los sacerdotes Francesco Batini y Giuseppe Pecori y se transportaron a Marcianella, donde se sepultaron en el centro de la Iglesia, bajo los escalones del Presbiterio. El lugar principal fue ocupado por el sacerdote Francesco Batini, ya párroco de Pontasercchio, mientras que más abajo, hacia el centro de la Iglesia, al lado del mismo Don Batini se situaron las dos tumbas que contenían los restos mortales de Don Giuseppe Pecori, ya párroco de esta Parroquia y de Don Flaminio Batini ya Oficiante de Marcianella. En esta susodicha Iglesia de Marcianella se sepultaron los cadáveres de las personas muertas en la Primera Guerra Mundial, o por causas de ella.



Figura 8.06. Imagen de la lápida situada en el pavimento de la iglesia, en la que se pueden leer el nombre de las personas del lugar muertas en la primera Guerra Mundial.

Hasta la época de las restauraciones, el acceso a la Iglesia era desde la corte Diodati. El Señor Guglielmo Rossoni cedió todo el terreno circundante a la Iglesia e hizo un nuevo ingreso, tal como se presenta en la actualidad. El pueblo se volcó mucho en el trabajo de movimiento de tierras del suelo de la Iglesia: en el arreglo de la nueva y ampliada plaza, en el transporte de la arena, los ladrillos y los escombros, en la plantación de los cipreses, etc. El trabajo de demolición del tejado inseguro, que comenzó en mayo del 1926, fue parado y retomado más de una vez por falta de dinero, y, finalmente, después de tantas peticiones de ofertas desde diferentes partes, se terminó en octubre del 1927. Ese mismo mes, se realizó la apertura de la monumental Iglesia de S. Miniato Mártir de Marcianella, con una ceremonia de bendición y una misa celebrada por el Cardinal Pietro Maffi, Arzobispo de Pisa (Ciampi, F., 2011).



B. OBJETO¹

Este caso de estudio, al igual que el anterior, se desarrolla en la estancia realizada en el Laboratorio A.S.T.R.O del Departamento de Ingeniería Civil e Industrial de la Università di Pisa. Al profundizar en el tema de la restauración arquitectónica, basada en levantamientos realizados con escáner láser terrestre a diferentes niveles de precisión, trabajando desde una dimensión escultórica hasta llegar a modelos arquitectónicos, surgen: algunos problemas unidos al uso del escáner láser, y, como se ha visto en los casos anteriores, la necesidad de integrar los levantamiento mediante metodologías fotogramétricas. Las integraciones resultantes necesarias son relativas tanto a la modelación geométrica tridimensional como a la creación de texturas foto-realistas aplicadas a dichos modelos.

Sin embargo, solventado este problema, aún se presenta una problemática no resuelta, las zonas no accesibles, derivadas de una altura superior a la alcanzable con el escáner, o, simplemente, no transitables. En este caso, tanto el escáner como la fotogrametría terrestre no es una opción. En muchos casos las cubiertas inclinadas, las cúpulas, fachadas situadas en zonas cercanas a barrancos, o, sencillamente, zonas que presentan muy poco espacio entre una fachada y la otra, no permiten hacer fotografías o capturas con el escáner que permitan un levantamiento para generar modelos en 3D. Ante este problema, se busca como solución la introducción de un nuevo componente en los levantamientos, los UAV (*Unmanned Air Vehicle*, vehículo aéreo no tripulado). Se introduce una nueva técnica de adquisición del dato fotogramétrico: los drones.

Los UAV, en el sentido más amplio del término, existen desde hace más de cincuenta años y han sido desarrollados principalmente en ámbito militar. Un UAV está compuesto por:

- Un vehículo aéreo, sin presencia humana a bordo.
- Una estación de control a tierra (*GCS Ground Control Station*) para el pilotaje
- Un sistema *on-board* que permita ser completamente automatizado (es decir, seguir un perfil de vuelo pre-programado) o semi-automatizado telecomandado a distancia desde la GSC.
- Un sistema de comunicación (*communication link*)
- Un sistema de lanzado y recuperación.

Desde hace tiempo los drones han sido considerados solo como un sistema de adiestramiento para pilotos u operadores de baterías antiaéreas y operadores radar. El desarrollo viene con los llamados UAV tácticos, aviones sin piloto con instrumentos de ELINT (*Electronic Intelligence*) y máquinas fotográficas o tele-cámaras para el control del territorio. El uso de los UAV en

¹ Información adquirida a través de la empresa CAM (*Costruzioni Aero Meccaniche* - Construcciones Aéreo Mecánicas) de Pisa en el *Open Day della Ricerca. Incontri con la scienza, conferenze e progetti di ricerca in mostra*. Università di Pisa. Pisa. 8 y 9 Mayo 2013.

campo civil se convierte recientemente en objeto de gran interés consecuencia del desarrollo de las tecnologías complementarias y de la creciente fiabilidad y reducción de los costes de estos vehículos aéreos. Tales sistemas son ya un elemento clave en la actividad de inteligencia, vigilancia y reconocimiento, y se están expandiendo también hacia otros tipos de actividad operativa. En ámbito geomático, las aplicaciones hasta ahora desarrolladas se ocupan principalmente del levantamiento fotogramétrico y de las definiciones de los modelos digitales del terreno y consecuentemente de las ortofotos.

La mayor parte de las investigaciones y ofertas comerciales en el ámbito de la geomática han sido conducidas a través de helicópteros con uno o más rotores. Las casas de producción se están multiplicando, ofreciendo modelos de prestaciones y costes muy diversos.

Si se estudian las experiencias de vehículos aéreos sin piloto, entre los últimos congresos y artículos, es fácil darse cuenta que apenas ha habido resultados aún en este campo, y que las principales aplicaciones desarrolladas son en ambiente militar. Sin embargo, en la parte que se refiere al procesado tras la adquisición de las fotos, el desarrollo en las técnicas fotogramétricas en los últimos años ha sido bastante intenso, como ya se ha comentado en los casos anteriores.



Figura 8.07. Imagen del drone en el inicio del vuelo para capturar las fotografías de San Miniato.

En esta situación se presenta este caso de estudio. Tras diferentes pruebas de ejecución y elaboración en un campo de vuelo, se procede a la utilización de un drone para realizar el levantamiento de la cubierta de la iglesia de San Miniato en Marciana, en la Provincia di Pisa. El objetivo es realizar la planimetría de la iglesia, incluyendo la planta de cubiertas, no adquirible a través de otra metodología de alta precisión. Para ello, se realiza una captura con el drone de una alta cantidad de fotos que después con métodos automáticos y semi-automáticos permiten obtener diferentes modelos de la cubierta. Además, se realiza una captura de la fachada principal, que ha sido también levantada con escáner láser, para permitir la comparación entre estos dos métodos de levantamientos en una zona que permite la captura de datos mediante ambos procedimientos.

La integración de los dos levantamientos para obtener la planimetría permite evidenciar la problemática unida al registro en un único sistema de referencia y a la diferente precisión característica de las dos diversas metodologías.

C. MEDIOS, SISTEMAS Y METODOLOGÍA DE LEVANTAMIENTO

En este caso de estudio se plantea como objetivo principal el levantamiento integrado mediante las técnicas de *Range-based modelling* e *Image-based modelling* y la comparación entre ambas.

La iglesia de San Miniato, es una iglesia bastante sencilla, de una sola nave, con dos puertas y una sola planta. Está situada en el centro de un solar exenta de cualquier edificación adosada. Por lo tanto para su levantamiento, no se presentan excesivas dificultades, más allá de la restricción de dos de las fachadas (Norte y Este) por presentar una zona adyacente (zona de paso) bastante estrecha. Se realizan cuatro barridos en el interior y siete en el exterior. Al mismo tiempo que se realiza el levantamiento con el escáner láser, se capturan los puntos de estación con el GPS, lo que permitirá situar la iglesia en un sistema de referencia global y no solo en uno local.



Figuras 8.08 y 8.09. Imagen del GPS sobre un punto de estacionamiento en el exterior de la iglesia, a la izquierda, y a la derecha, imagen del escáner láser sobre un punto de estacionamiento en el interior.

También mientras se efectúa el levantamiento con escáner láser, se ejecuta el levantamiento de la fachada principal y de la cubierta con el dron. La metodología de trabajo empleada en este caso, es la del levantamiento en paralelo de dos metodologías diferentes, una bastante conocida a nivel de precisión y errores y otra totalmente nueva y en fase de exploración.

i. Láser escáner

Para el diseño de la planimetría de la iglesia se utilizará como base el levantamiento realizado mediante escáner láser. Se realizan 4 barridos en el interior de la iglesia y 7 barridos en el exterior. En el interior se efectúan dos centrales con respecto al eje transversal, en la zona de los bancos y dos en paralelo con respecto al eje transversal, en la zona del altar (fig. 8.11). En el exterior, se sitúan 4 en cada una de las esquinas, a una distancia que permite obtener lo máximo posible de las dos fachadas perpendiculares que forman dichas esquinas, otros dos escaneados situados a lo largo de las dos fachadas de los dos lados mayores de la planta rectangular y un último barrido enfrente a la puerta principal, que permitirá la conexión con los escaneados del interior de la iglesia.



Figuras 8.10 y 8.11. Arriba, imagen de las estaciones del escáner en el exterior de la iglesia. Abajo, imagen de las estaciones del escáner en el interior. La estación 500 se utiliza como estación de referencia para realizar la alineación con las escaneados del interior; desde la posición 500 se escanea el target situado en el punto 100, y viceversa.

Para su posterior alineación se utilizan target en los puntos de estación, formando una red que permite una vez finalizada la fase de toma de datos, en el programa *Cyclone* su registro de

modo automático, colocando todos los escaneados en un único sistema de referencia. Para ello, previamente en la toma de datos se realiza la captura de los target referenciando entre ellas todas las estaciones. Los target utilizados son especiales del propio escáner, por lo que éste los identifica, teniendo ya en su memoria los datos relativos a altura, dimensiones, etc.



Figura 8.12. Imagen del proceso del escaneado 1100 (estación 11), en el cual se están capturando los target de las estaciones 600 y 1000.

En este caso, el procesado de los datos no pasa por el programa *Geomagic*. Una vez realizadas las acciones de registro y limpieza de las nubes de puntos, estas son exportadas directamente al *Inus Technologies Rapidform XOR3*, donde son convertidas en *mesh*, se eliminan los errores topológicos y se procede al relleno de los huecos. Además se realizan las secciones que permitirán el diseño de la planta, y secciones para la planimetría, y se realiza la “*decimation*” (reducción del detalle), obteniendo un modelo más ligero y manejable que permite entre otras cosas su exportación al *Luxology Modo 501*, para realizar *render* y para poder introducirle, si se desea, una textura foto-realista a partir de las fotografías tomadas de alta resolución.

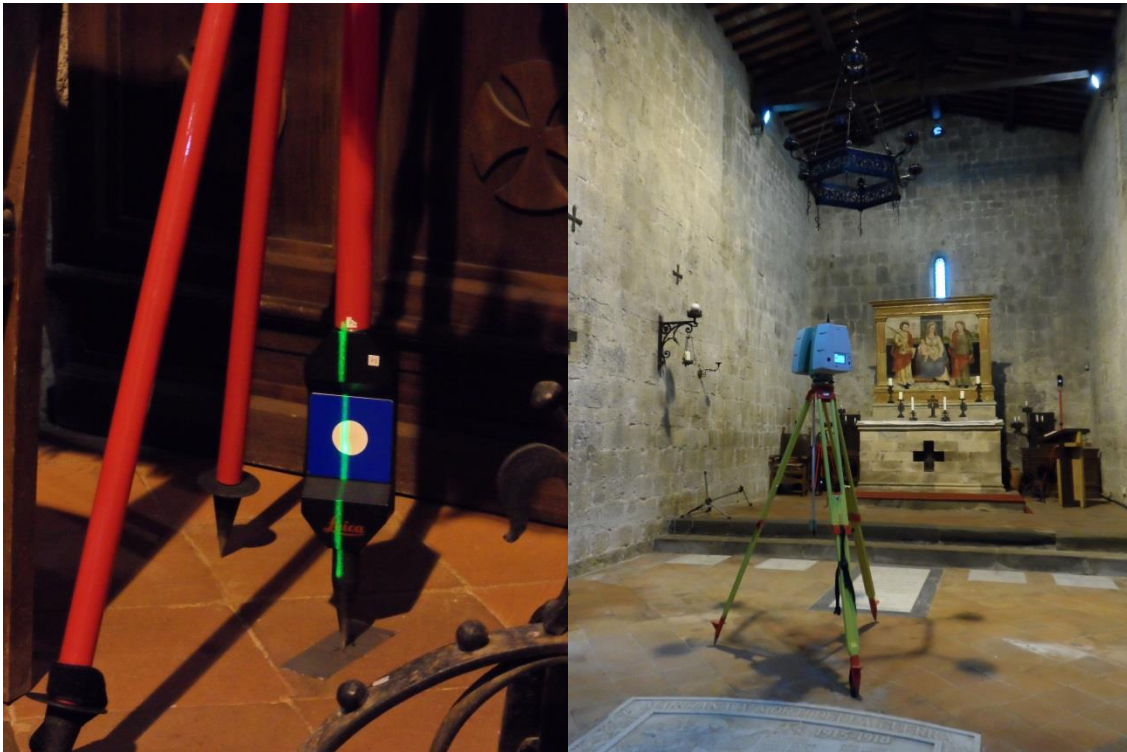


Figura 8.13 y 8.14. A la izquierda, imagen del momento de la captura del target situado en el estacionamiento 400. A la derecha, escáner situado en el punto 200.

ii. Image-based Modelling a partir de fotogrametría aérea (drone)

La cámara digital²

Una cámara digital es, en casi todos los aspectos, exactamente idéntica a una cámara convencional, salvando el hecho de que en vez de la película fotográfica enrollada se usa un sensor electrónico que puede ser de diversos tipos.

En la cámara digital, la imagen viene metida a fuego sobre el plano del sensor. Las señales capturadas vienen amplificadas y convertidas en digital. En ese momento los datos digitales están en forma “bruta” (*raw*) y pueden ser memorizados sobre un file, para una sucesiva elaboración en estudio, con otros aparatos informáticos. Sucesivamente, el procesador de imágenes interno de la cámara transforma los datos, es decir, calcula las componentes primarias faltantes sobre cada pixel (RGB) y hace compatibles los datos de imagen con los sistemas normales de visualización de imágenes, almacenando el archivo elaborado en una memoria de

² Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010: 203-204), definición de “*fotocamera digitale*” en Wikipedia (15-08-2013) y Walter, G., 2013. *Implementazione software di algoritmi per la progettazione di rilievi fotogrammetrici da UAV. Tesi di laurea triennale in Ingegneria Civile*. Università di Pisa.

estado sólido. Las tarjetas contienen generalmente un relevante número de imágenes, la cantidad depende de las dimensiones de la imagen individual, según la modalidad de registro y la capacidad de la memoria.

La resolución total del sensor se mide en millones de píxel totales. Un píxel es la unidad de captura del archivo: representa por lo tanto la porción más pequeña de la imagen que la cámara permite capturar sobre una matriz ideal construida sobre el sensor.

Multiplicando el valor en píxel de la resolución horizontal por la resolución vertical se obtiene el número total de píxel que la cámara distingue en una imagen.

La elevada cantidad de elementos fotosensibles garantiza un elevado detalle de imagen, pero surgen problemas de velocidad en la transferencia de los datos al procesador de imagen. Cuanto mayor es la resolución, mayor es el número de píxel, y por lo tanto, mayor será la cantidad de datos a transferir. Así, a igual velocidad de transmisión, mayor será el tiempo necesario para transferir los datos del procesador de imágenes y el sucesivo registro de la imagen.



Figura 8.15. Imagen del *drone* capturando la fachada de la iglesia

Si la dimensión física del sensor es elevada a igual número de píxel esto conlleva obviamente a una mayor dimensión física de los píxeles. Por ejemplo, si son sensores de 6 MP que tienen una dimensión de 5,371 x 4,035 mm (diagonal = 6,721mm), mientras otros sensores de 6 MP tienen dimensión de 7.176 mm x 5.319mm (diagonal = 8.933mm). La calidad del sensor es normalmente mayor en el sensor más grande.

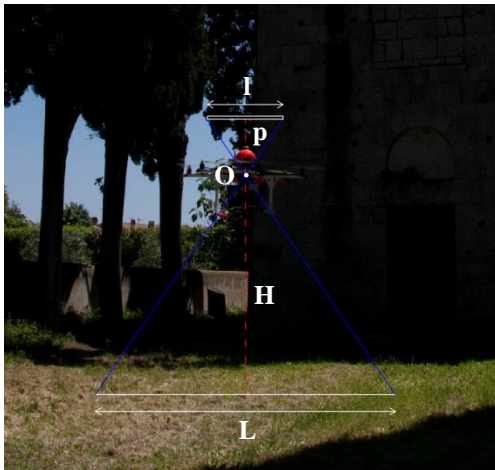
Parámetros del vuelo de la fotogrametría aérea

Al igual que en el caso de la fotogrametría terrestre, en la fotogrametría aérea, se encuentran una serie de parámetros que influyen directamente en la calidad del modelo digital que resulta de las técnicas de *Image-based Modelling*. Por ello, se debe realizar un anteproyecto, analizando dichos parámetros, para que el levantamiento sea adecuado. Los parámetros son los siguientes (Cannarozzo, Cucchiari y Meschieri, 2012):

Escala media:

Los fotogramas representan una vista central en perspectiva del objeto, por lo tanto no es posible en términos rigurosos hablar de la escala del fotograma, debido a que esta varía de un punto a otro en la perspectiva.

Sin embargo, es útil definir una escala media de los fotogramas, entendida como la relación entre la dimensión máxima del fotograma “ l ” y la correspondiente dimensión real “ L ” del objeto contenido en la fotografía:



$$\frac{l}{L} = \frac{p}{H} = \frac{1}{E_f} = \text{Escala del fotograma} \quad (1)$$

Siendo E_f el módulo de la escala.

Figura 8.16. Definición de la escala media de los fotogramas en fotogrametría aérea.

Sabiendo que la distancia L es una incógnita, se puede encontrar la escala del fotograma mediante algunas consideraciones geométricas. Observando la figura 8.16, se puede deducir, por geometría, que la escala media es igual a la relación entre la distancia focal (p) y la altura de vuelo (H). No pudiendo variar las características de la cámara utilizada (“ l ” o “ p ”), para variar la escala de los fotogramas, se debe por tanto variar la altura de vuelo H de la cámara al objeto capturado.

La escala de los fotogramas no es una elección arbitraria, sino que viene obtenida partiendo de la escala de reproducción del objeto (escala del folio) mediante una oportuna relación. Para obtener fotogramas con la escala media así determinada, se debe colocar la cámara, para la captura, a una distancia del objeto prevista a partir de la siguiente expresión:

$$H = p \times E_f \quad (2)$$

En la fotogrametría tradicional la escala del fotograma se obtiene de la siguiente relación:

$$E_f = k \times \sqrt{E_{dib}} \quad (3)$$



Siendo el coeficiente “k”:

- 200-300 para escalas de dibujo $\frac{1}{E_{dib}}$ inferiores a 1:5000 (escalas medio-pequeñas)
- 150-200 para escalas de dibujo $\frac{1}{E_{dib}}$ superiores a 1:2000 (escalas grandes)

Como alternativa, con respecto a la fórmula precedente, es posible deducir los valores de la escala media de los fotogramas de la tabla de la figura 8.17, realizada por la “*Commissione Geodetica Italiana*”. En esta se han relacionado también, indicativamente, las consiguientes alturas de vuelo para cámaras con valores comunes de “p”.

Scala della carta	Scala dei fotogr.		Altezza volo H (per alcuni valori di p) (m)					
	min.	max.	p = 300 mm		p = 152 mm		p = 88 mm	
1:500	1:3000	1:2000	900	600				
1:1000	1:5000	1:3500	1500	1050	760	530		
1:2000	1:8000	1:6500	2400	1950	1220	1000		
1:5000	1:18 000	1:12 000	5400	3600	1730	1830		
1:10 000	1:27 000	1:20 000	8100	600	4100	3100	2210	1770
1:25 000	1:50 000	1:40 000			7600	6080	4520	3530
1:50 000	1:70 000	1:60 000			10 620	9130	6180	5310
1:100 000	1:90 000	1:80 000					7960	7070

Figura 8.17. Tabla de la relación del tamaño del folio con respecto a la escala de los fotogramas (Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012: 38).

En definitiva, para determinar la altura de vuelo “H”, se debe partir de la escala de dibujo $\frac{1}{E_{dib}}$, pasando por la escala de los fotogramas $\frac{1}{E_f}$ según este esquema sintético:

$$\frac{1}{E_{dib}} \Rightarrow \frac{1}{E_f} \Rightarrow H$$

Con la fotografía digital la escala media del fotograma puede ser individualizada focalizando la atención sobre el pixel: la cantidad más pequeña que constituye la imagen digital, y haciendo referencia al concepto de la escala nominal. En general, se fija convencionalmente, como tolerancia gráfica, motivada por la agudeza visual, el valor de 0.0002 m a la escala de restitución como valor mínimo representable (sin imprecisiones o errores de impresión): se aplica el mismo concepto al elemento más pequeño del pixel. Es decir: $E_f \leq E_{dib} \times 0.0002$.

Cota media de vuelo:

La altura de vuelo (H) representa la distancia entre el UAV (centro de captura) y el terreno. Sin embargo, la cota levantada desde los instrumentos no coincide con H sino con la cota ortométrica absoluta Q_v .

Este parámetro es fácilmente obtenible sumando a la altura de vuelo H la cota absoluta media Q_M del terreno capturado, por lo tanto: $Q_v = Q_M + H$

La cota media del terreno Q_M se obtiene como la media aritmética de algunos puntos de cota conocida presentes sobre el terreno.

Recubrimiento:

Para hacer posible que los mismos puntos del objeto sean capturados en dos fotogramas consecutivos, es necesario que estos presenten un área en la cual ambos contengan la misma porción de objeto. La entidad de esta porción de objeto, común a los dos fotogramas consecutivos, respecto a la parte entera de objeto representado en los fotogramas, se le llama recubrimiento longitudinal. Su valor, inferior a uno, en general, se indica con μ .

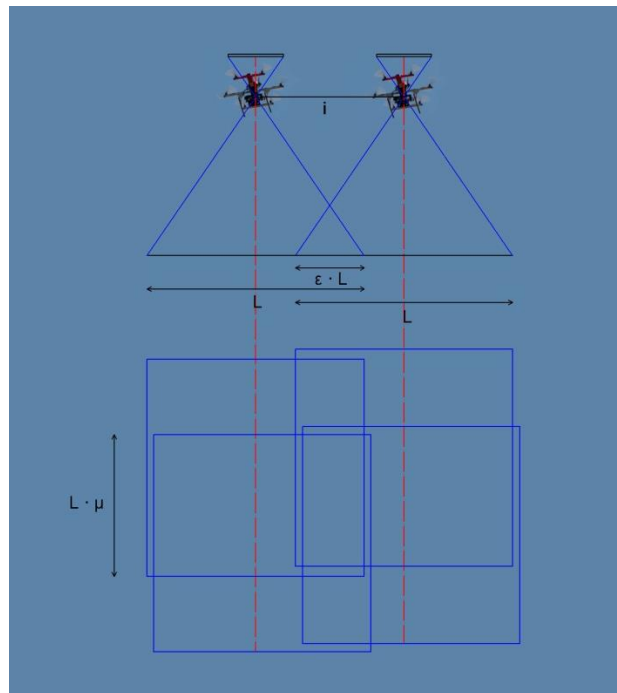


Figura 8.18. Esquema del recubrimiento longitudinal, μ , y transversal, ϵ .

Para evitar que a causa de pequeñas imprecisiones en las operaciones de captura o por la complejidad del objeto, algunos puntos sean visibles solo en un fotograma, se usa un valor de recubrimiento: $\mu = 0,6 - 0,7$ (60% - 70%) en relación a la configuración geométrica del objeto o a la conformación morfológica del terreno. En particular, con la eventual presencia de terreno fuertemente ondulado se aconseja el aumento del porcentaje del recubrimiento longitudinal hasta un 80% (figura 8.19).

Tipo de terreno	Recubrimiento %	
	Longitudinal	Transversal
Llano	60	25
Ondulado	65-70	25-30
Montañoso	70-80	30-35

Figura 8.19. Pliego de Prescripciones Técnicas para la ejecución de trabajos fotogramétricos. Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Fomento (Otero, I. et al., 2010: 19).

Base de captura:

El factor que permite obtener el recubrimiento longitudinal deseado es la base de captura “B”. En efecto, cuanto menor es el valor de “B” mayor es el recubrimiento entre capturas (figura 8.20).

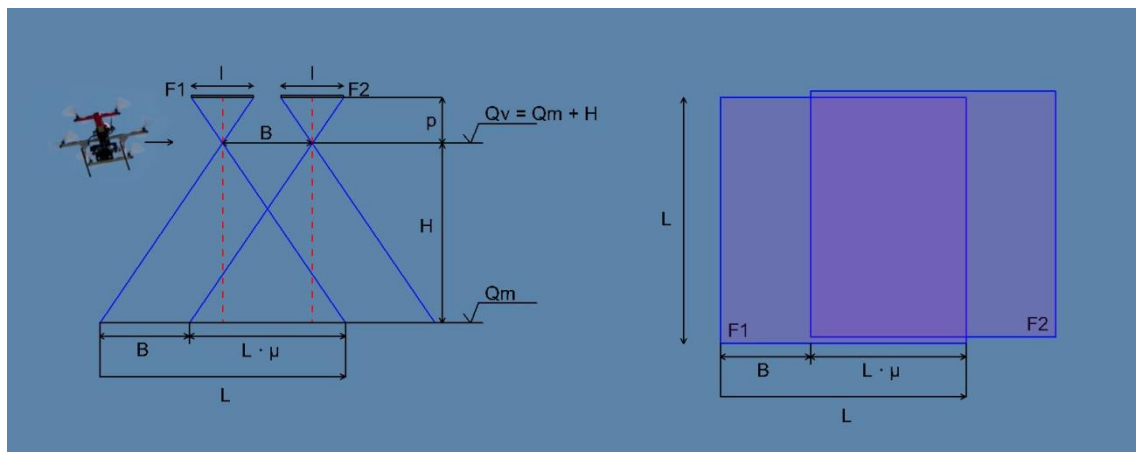


Figura 8.20. La base de la toma B permite obtener el valor deseado del recubrimiento longitudinal, que al mismo tiempo, permite generar apropiados modelos estereoscópicos necesarios para la restitución en el levantamiento.

La base de la captura “B” puede ser calculada mediante la siguiente formula:

$$B = L - \mu \cdot L = L \cdot (1 - \mu) \quad (4)$$

$$\text{Así sabiendo que } L = l \cdot (H / p) \quad (5)$$

Se puede llegar a:

$$B = \frac{H \cdot l}{p} \cdot (1 - \mu) = l \cdot E_f \cdot (1 - \mu) \quad (6)$$



La base de captura es proporcional a las dimensiones del formato de la cámara y a la cota relativa del vuelo.

Intervalo de la apertura del obturador:

La apertura del obturador en la captura aérea es automático por lo tanto es necesario establecer un oportuno intervalo “ t ” de apertura del obturador.

La distancia B , entre los centros de captura en la cual vienen generados dos fotogramas consecutivos, depende de la velocidad de crucero “ v ” del UAV (supuesta, idealmente, constante) según la conocida relación del movimiento uniforme. Por lo tanto si $\Delta t = B / v$, substituyendo en esta ecuación la B , a partir de la fórmula obtenida anteriormente, es posible determinar el intervalo t (en segundos, expresando la v en m/s) al cual se debe capturar las fotografías:

$$\Delta t = \frac{H \cdot l}{vc} \cdot (1 - \mu) = \frac{l \cdot E_f}{v} \cdot (1 - \mu) \quad (7)$$

Intereje de las capturas:

El intereje “ i ” entre los ejes de dos capturas consecutivas se elige en modo de obtener para el recubrimiento transversal, ε , el valor programado, que en general está comprendido entre el intervalo 0,10 – 0,30 (entre el 10% y el 30% de L), en función de las irregularidades presentes en el terreno a levantar. Esto garantiza la total cubrición fotográfica del terreno de interés en el levantamiento.

Observando la figura 8.18 se concluye evidente que el intereje i se puede deducir a partir de la siguiente ecuación:

$$i = \frac{L}{2} + \frac{L}{2} - \varepsilon \cdot L = L \cdot (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

Sustituyendo L por su valor obtenido en la ecuación (5):

$$i = \frac{l \cdot H}{c} \cdot (1 - \varepsilon) = l \cdot E_f \cdot (1 - \varepsilon) \quad (9)$$

El problema del arrastre:

Se define tiempo de exposición como el intervalo de tiempo durante el cual el obturador de la cámara se mantiene abierto. Los tiempos de exposición deben ser muy breves, dada la velocidad del UAV, ya que se deben evitar efectos de “arrastre de la imagen”.



El “arrastre” tiene como origen el hecho que entre el instante de la apertura del obturador y del cierre transcurre un cierto tiempo t durante el cual el UAV se mueve. Al genérico punto P , por lo tanto, no corresponderá el punto imagen P' sino el segmento $P_0 \cdot P'$.

El efecto del arrastre puede por lo tanto resultar particularmente dañino, sobre todo para los vuelos a gran escala y por lo tanto a baja cota.

Los símbolos utilizados en las figuras serían los siguientes:

- H : altura de vuelo con respecto al terreno
- μ : recubrimiento longitudinal (en general 0,6)
- ε : recubrimiento lateral (en general 0,2)
- l : formato efectivo útil del fotograma (aproximadamente 230 mm)
- p : distancia principal de la cámara
- v : velocidad de crucero del aéreo en m / s.

Drone

En este caso la toma de fotografías se realiza con un drone, por lo que el levantamiento será mediante fotogrametría aérea. Dicha toma se realiza a través de un prototipo de vehículo aéreo sin piloto, no presente aún en el mercado, realizado por la empresa CAM (*Costruzioni Aero Meccaniche* - Construcciones Aéreo Mecánicas) de Pisa, que realiza colaboraciones con el Laboratorio ASTRO.

La ficha técnica de dicho prototipo, proporcionada por la empresa, es la siguiente:

Configuración	Hexarotores
Propulsión	6 motores eléctricos brushless de 500W
Sistema de guía	Control remoto con auto-pilotaje digital
Alimentación	Baterías de polímeros de litio
Longitud	90 cm
Anchura	97 cm
Altura	48 cm
Peso máx. al despegue	9,2 kg
Carga útil	2,5 kg
Autonomía	10 min
Rango máximo	10 Km

Figura 8.21. Tabla de las características del drone.

Las particularidades que además presenta este UAV son las siguientes: Este vehículo aéreo se caracteriza por una arquitectura destinada a garantizar su empleo en zonas sin infraestructuras. La estructura está realizada en aluminio aeronáutico, pero puede ser fácilmente modificada para adaptarse a las diferentes tipologías de misión sin que sea necesario un rediseño completo. El número de motores puede variar de 4 a 8 con una carga útil máxima de 3,5 kg. Previa petición es posible tener diversos grados de protección de los agentes ambientales como polvo o lluvia. La carga útil típica está constituida por una cámara fotográfica Nikon D600 alojada en un sistema de estabilización activo y sobre el roll que permite a la máquina misma estar siempre nivelada y que permite variar el ángulo de toma desde 0 a -90°.



Figura 8.22. Imagen del drone con todos los complementos necesarios para su uso.

En el caso de necesidad es, además, posible introducir cámaras térmicas, videocámaras de alta resolución y sensores de varios tipos. Es también posible integrar las cargas de fuselaje desmontables en vuelo. El sistema de guía está basado sobre un autopiloto digital de última generación que permite pilotar el drone tanto en modo manual como automático. Gracias a la interfaz hombre máquina de tipo avanzado, es posible adiestrar al operador en tiempo breve y el elevado nivel de sofisticación permite seguir maniobras complejas como el despegue y el aterrizaje en manera totalmente automática. Para controlar el UAV es suficiente con un ordenador portátil y una interfaz para la guía manual. Normalmente el vehículo está, además, dotado de un sistema de telemetría video que sirve para facilitar el pilotaje en modo manual y de enfocar con precisión los sensores ópticos. El drone está completamente proyectado y realizado en Italia, y presenta una disponibilidad total de asistencia tanto para la manutención normal como para la construcción de versiones personalizadas para usos científicos.

La cámara realiza una captura al segundo y en base a esto y a la altura de vuelo se proyecta la velocidad con el fin de obtener un recubrimiento mínimo del 70%. Las capturas son automáticas.

En el caso del UAV utilizado en el levantamiento, la duración máxima de cada vuelo es de aproximadamente 10 minutos, debido a las baterías que lleva, sin embargo, se hacen vuelos de unos 4 minutos. Las baterías usadas son dos de 6000 Miliamperios de iones de litio. Este vehículo aéreo es teledirigido por un técnico especialista, que realiza 3 vuelos, uno solo para la fachada, y dos que incluyen la zona de la fachada principal y la cubierta. La altura para la toma de la cubierta es de aproximadamente 30 metros. La captura de imágenes se realiza tomando en el primer vuelo 36 fotografías (solo de la fachada), en el segundo 197 fotografías (incluyendo fachada y cubierta) y en el tercero 236 fotografías (también de la fachada y la cubierta).

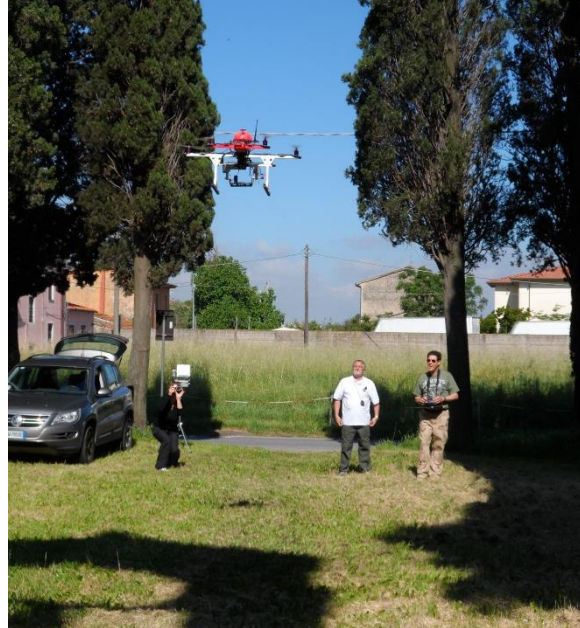


Figura 8.23. Imagen del drone en el proceso de levantamiento de la fachada.

Terminada la toma de datos, éstos serán tratados mediante el proceso de *Image-based Modelling*, al igual que se efectúa para la fotogrametría terrestre.

Los pasos para llegar al modelo tridimensional serán los mismos y, al igual que en la fotogrametría terrestre, la precisión dependerá de las condiciones de la toma de datos y de la fase posterior de elaboración.



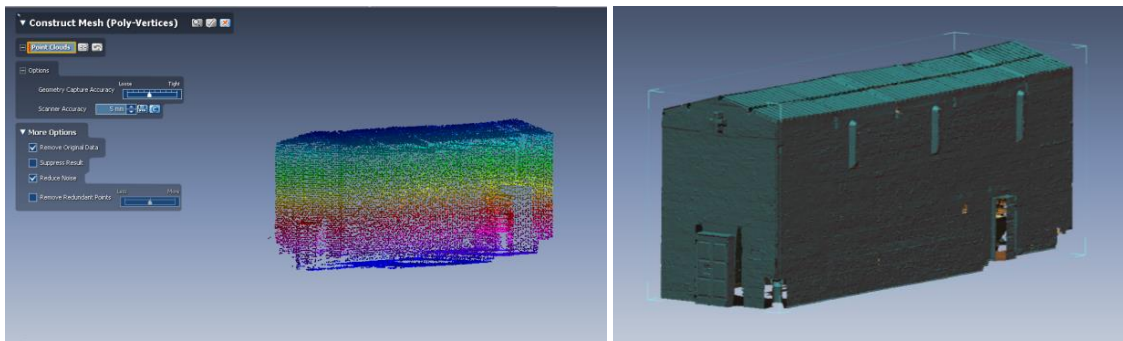
Figura 8.24. Imagen del drone en el momento del despegue.

D. TRATAMIENTO DE LOS DATOS.

IGLESIA

Para la elaboración de los datos del escáner láser, se procede como en los casos anteriores. Se alinean todo, en *Cyclone*, en un único sistema de referencia y a continuación se eliminan de las nubes de puntos las partes que no tienen información útil para el caso de estudio. Después son exportados por partes al *Rapidform XOR3*, ya que al ser una nube de puntos bastante densa, no es posible trabajar con todas las nubes de puntos al mismo tiempo en *Rapidform XOR3*.

En *Rapidform*, en una primera fase de elaboración, se mantienen separadas la parte externa e interna de la iglesia para evitar trabajar con demasiados datos simultáneamente. Una vez se han realizado los procesos de edición (conversión en *mesh*, eliminación de errores topológicos, “curado” de bordes, relleno de huecos, optimización, etc.), se juntan en un solo modelo la parte interior y exterior de la iglesia.



Figuras 8.25 y 8.26. Imágenes de un modelo de nube de puntos y la mesh después del proceso de mallado.

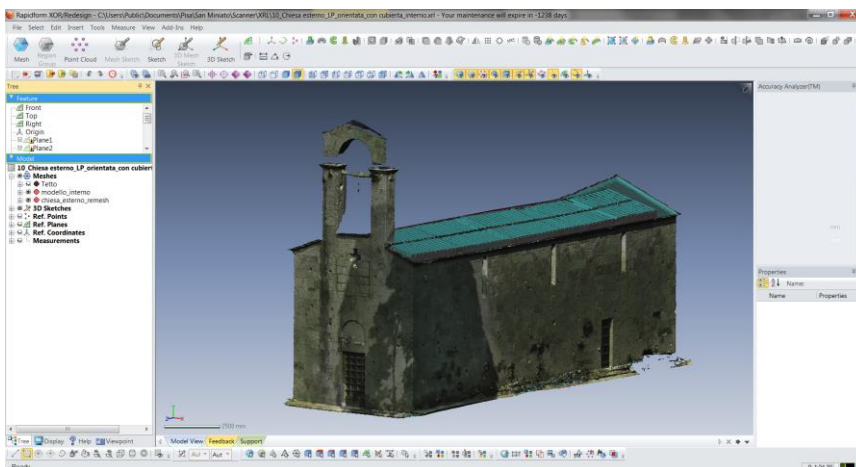


Figura 8.27. Imagen de la iglesia dentro del programa Rapidform, en la cual se puede observar tanto la mesh que conforma el interior de la iglesia como la que conforma el exterior.

CUBIERTA

Paralelamente se realizan los trabajos de *Image-based Modelling*, para obtener la cubierta de la iglesia. Para ello se hacen dos pruebas simultáneas: por un lado se realiza en modelo mediante el software *PhotoModeler Scanner* y por otro mediante el software *Agisoft PhotoScan*. El primero resulta ser más laborioso, pero permite un mayor control de los factores que influyen en el resultado. El segundo es prácticamente automático, ya que solo se deben elegir algunas características para que el programa trabaje solo.

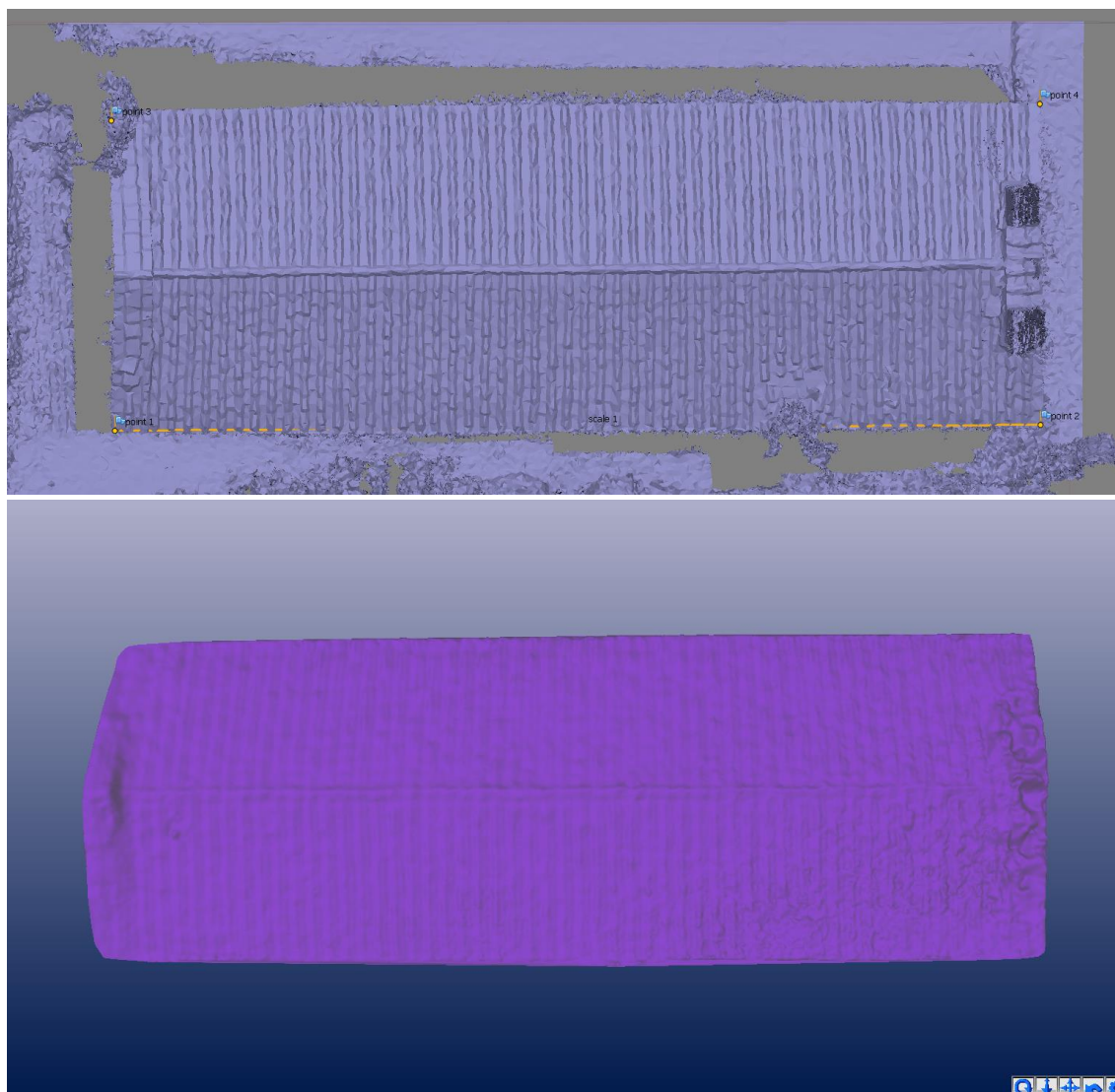
Obtenidos los modelos resultantes por ambos métodos, son comparados y haciendo un análisis se decide cual es el más adecuado para tomarlo como modelo final e integrarlo en el resto del modelo de la iglesia. La diferencia se basa en que en el *Agisoft PhotoScan* se puede decidir entre número de polígonos y calidad del modelo, pero este número de polígonos será distribuido a su elección, y eligiendo una calidad del modelo muy alta, el software sólo podrá realizar los cálculos rodando en un hardware de altas prestaciones. En el caso del *PhotoModeler Scanner*, la elección no se basa únicamente en el número de polígonos sino en una serie de parámetros bien definidos (*“sampling interval”*, *“Depth range”*, *“Matching región radius”*, *“Texture type”*...), que dan un modelo bastante controlado, en base a la elección de éstos.



Figuras 8.28 y 8.29. Screenshot de los modelos de la cubierta con textura foto-realista.

Arriba, modelo realizado con *Agisoft PhotoScan*; abajo, modelo realizado con *Photomodeler*.

Los modelos que se observan en las figuras de la 8.28 a la 8.31, son ambos obtenidos con métodos de generación de modelos tridimensionales a partir de fotos, sin embargo, presentan resultados diferentes. Al igual que en el caso del escaner de triángulación, el *Agisoft PhotoScan* da como resultado directamente una *mesh* poligonal, mientras que en el caso del *PhotoModeler Scanner*, se puede obtener una nube de puntos de alta densidad, como en el caso de los escaner ToF (queriendo, también, una *mesh*, sin embargo, se puede afirmar, a partir de las experiencias realizadas, que la calidad de la *mesh* es bastante baja). En este caso concreto, se utiliza un programa diferente para generar la *mesh* a partir de la nube de puntos, *MeshLab*, debido a que cuando se prueba a generar la *mesh* con *PhotoModeler Scanner*, el modelo presenta una calidad no tolerable.



Figuras 8.30 y 8.31. Modelos de las cubiertas sin textura foto-realista. Arriba, modelo realizado con *Agisoft PhotoScan*, abajo, modelo resultante del *PhotoModeler+MeshLab*.



Como se puede observar en las imágenes, aunque los modelos con la textura fotorealista (figura 8.28 y 8.29) parecen más o menos de una calidad similar, al quitarles dicha textura se puede contemplar claramente que el modelo obtenido con *Agisoft PhotoScan* tiene una mayor definición. Esto se debe a que *PhotoModeler Scanner* precisa de un levantamiento fotográfico con parámetros más precisos, que en este caso no han sido posible alcanzarlos, debido a que el dron no presenta la flexibilidad a la que se puede optar en un levantamiento de fotogrametría terrestre. El modelo de nube de puntos obtenido con *PhotoModeler Scanner* presenta mucho ruido. Para realizar la limpieza necesaria y generar la mesh, es complicado realizar la elección adecuada sin perder la información útil. Ello deja al *PhotoModeler Scanner* como una opción menos adecuada que *Agisoft PhotoScan*.

Con los modelos obtenidos, se opta por utilizar para el trabajo final, el modelo obtenido con *PhotoScan*.

FACHADA

Para un análisis de la precisión del dron, aún en fase de estudio, se realiza la captura de una zona coincidente con otra, barrida con el escáner láser: la fachada principal. Así, se define también independientemente de la cubierta un modelo en *PhotoModeler Scanner* de dicha fachada.

Para la obtención de la fachada, se siguen los pasos de calibración de la cámara, orientación de las imágenes, definición de la geometría básica, la obtención de la nube de puntos y la eliminación de los puntos sobrantes en *PhotoModeler Scanner*. Se efectúa una segunda limpieza del ruido en *CloudCompare*, y después se exporta el modelo a *MeshLab* para obtener la *mesh* de la fachada. Este modelo se utiliza para compararlo con el modelo obtenido con el escáner, permitiendo definir la precisión obtenida con los modelos 3D a partir de las fotografías capturadas con el UAV, utilizando como base el *PhotoModeler Scanner*. El resultado es observable en las figuras 3.34 y 3.35. Al someter los dos modelos para ser comparados en *Rapidform XOR3* solo una zona la calcula, por ser aquella en la cual hay una superposición adecuada para su cálculo. En esa zona la desviación es de aproximadamente 5 mm.

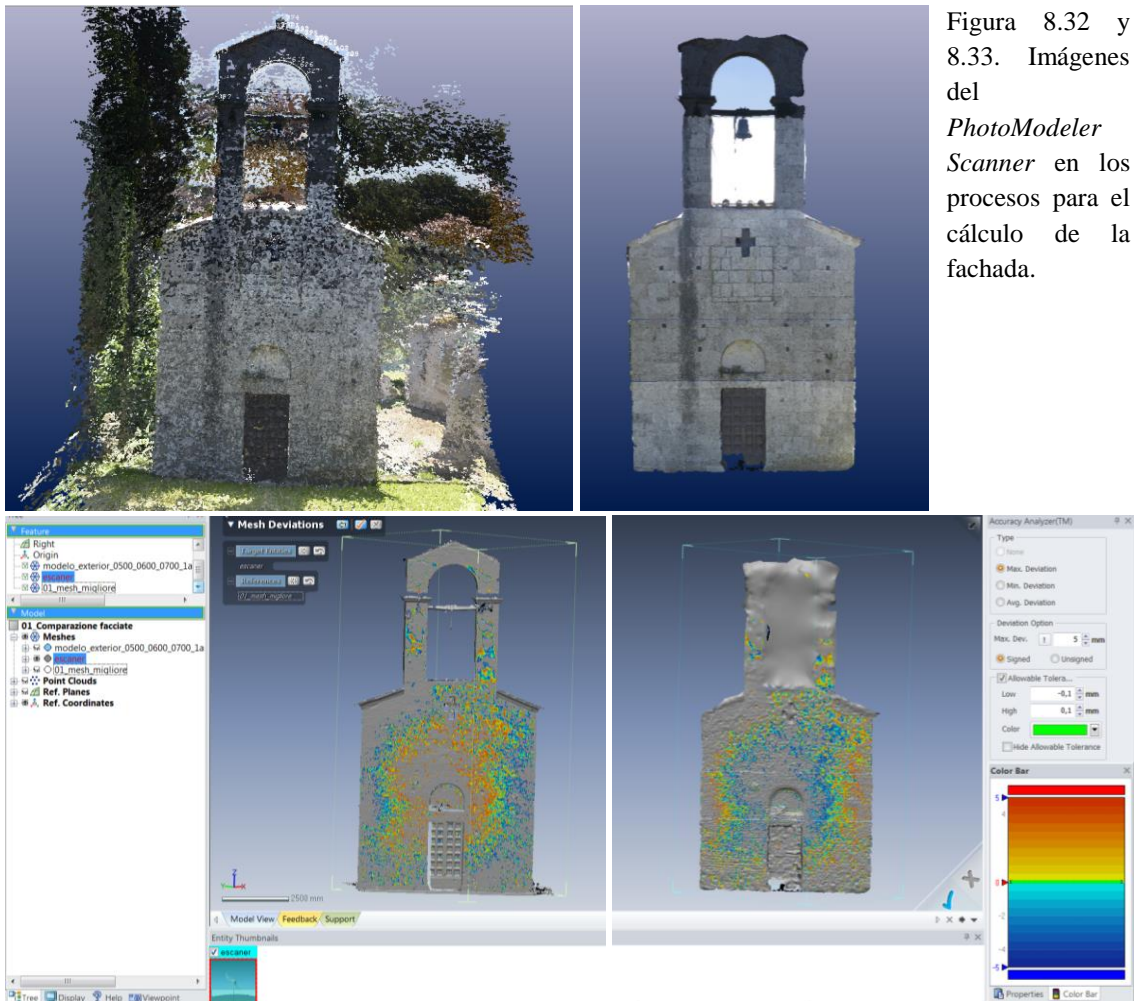
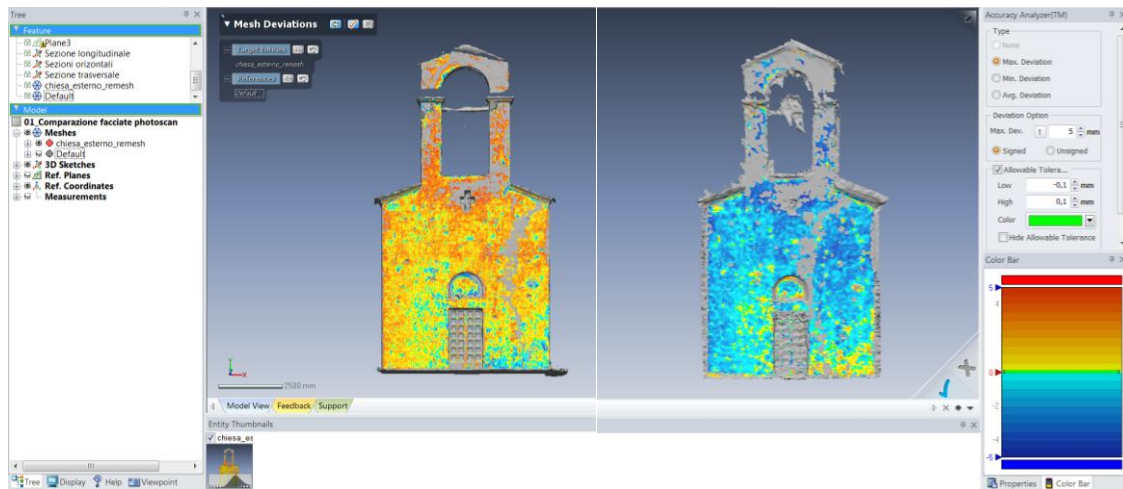


Figura 8.32 y 8.33. Imágenes del *PhotoModeler Scanner* en los procesos para el cálculo de la fachada.

Figuras 8.34 y 8.35. Imagen del programa en el momento de la comparación entre el modelo obtenido con escáner láser y el realizado con *PhotoModeler*.

Después del resultado obtenido con *PhotoModeler Scanner*, se decide hacer otra prueba, realizando un modelo con *Agisoft PhotoScan*. Éste, al igual que en el caso anterior, se exporta a *Rapidform XOR3* para su comparación con el del escáner. El modelo de *Agisoft PhotoScan* presenta una calidad mayor a la del obtenido en *PhotoModeler Scanner*: la desviación media total del modelo obtenido con *Agisoft PhotoScan* es inferior a 5 mm ya que la superposición de los modelos adecuada para el cálculo es mayor al 75 %, mientras que la desviación media del modelo de *PhotoModeler Scanner* es cercana a 5 mm pero la superposición de los modelos adecuada para su cálculo es menor a un 50%, siendo el otro 50% por lo tanto con una desviación bastante mayor, no calculable por el programa. Aunque no es comparable éste con el obtenido con el escáner, en cuanto a precisión detallada, se puede considerar un modelo bastante recomendable cuando la precisión requerida es un poco menor, teniendo en cuenta que la velocidad de obtención y el ahorro de trabajo es muy alto.



Figuras 8.36 y 8.37. Composición de la comparación de los dos modelos entre sí para comprobar la desviación entre ambos. Observando la textura del modelo de *Agisoft PhotoScan* ya se puede intuir que es un modelo de mayor calidad, además, la coincidencia con el modelo del escáner es mayor.

E. ANÁLISIS

Para la generación del modelo interior y exterior de la iglesia (a excepción de la cubierta por el exterior), se utilizan las técnicas ya descritas para modelos obtenidos con escáner láser. En general, no se presentan mayores problemas que el de gestión por el “peso” de los modelos capturados a una alta resolución. Esto condiciona mucho el tiempo de elaboración, pero los modelos son bastante completos.

La unión entre el modelo exterior e interior es realizado, simplemente por exportación ya que al haber orientado los barridos entre ellos en la fase de toma de datos, automáticamente en el cyclone aparecen en el mismo sistema de referencia. Teniendo ambos modelos unidos, es posible la obtención de plantas y secciones, en las que se podrá medir al milímetro el grosor del muro, pudiendo contemplar las pequeñas desviaciones que hayan podido sufrir en cualquier punto de este. Esta planimetría tan detallada, permitirá en fases futuras el estudio patológico de la iglesia, pudiendo presentar un proyecto de restauración y mantenimiento.

Por otra parte, a partir del modelo de la fachada, es posible comprobar que la precisión de las técnicas de modelación a partir de fotografías aún no es comparable con las técnicas de obtención de datos por *Range-based Modelling*. Los modelos obtenidos por *Image-based Modelling* tanto de la fachada como de la cubierta, presentan en su elaboración nubes de puntos muy densas que permitirían realizar modelos de alto nivel de detalle. El problema, es que en el caso de los modelos obtenidos con *PhotoModeler Scanner*, las nubes de puntos presentan un nivel de ruido muy alto, y la limpieza de éstos sin pérdida de información es poco operativa, convirtiéndose en este caso en un método no conveniente para modelos en los que la búsqueda sea la exactitud geométrica y detallada.



Como se explicaba en el apartado de estado del arte, estos modelos no serán convenientes si lo que se busca es la exactitud geométrica, si el modelo sirve para clarificar e investigar aspectos constructivos, métricos, morfológicos de una arquitectura, ya que en ese caso sería necesaria una gran fiabilidad y control de la desviación con respecto al original, no obtenibles con este tipo de levantamiento (como se ha visto en los gráficos precedentes, la superposición aceptable entre los modelos de escáner láser y los obtenidos con *Photodeler Scanner* es inferior al 50%). Sin embargo, son muy adecuados por su economía y rapidez de elaborado, si lo que se busca es un modelo más para el *design*, que no busca un control métrico, sino una imagen sintética o para una animación, para ofrecer una visión comprensiva de un elaborado, si se presenta una función expositiva e ilustrativa.

Sin embargo, como se comentaba en el apartado anterior, los modelos obtenidos a partir de *Agisoft PhotoScan*, presenta características bastantes aceptables (una desviación media aproximada de 5 mm), tanto a nivel de *mesh* como de textura. Controlando el nivel de precisión buscado, estos modelos pueden ser muy convenientes, ya que no necesitan usuarios altamente cualificados, se obtienen en un tiempo reducido, y presentan una textura de alta calidad.



Figuras 8.38 y 8.39. A la izquierda, fachada principal obtenida mediante levantamiento con escáner láser. A la derecha, fachada principal desarrollada con el software *Agisoft PhotoScan*.

F. MODELOS OBTENIDOS.

IGLESIA

Tras el levantamiento de la iglesia se obtiene un modelo numérico de alto nivel de detalle geométrico, formado por una malla poligonal de triángulos desarrollada dándole una precisión del escáner de 5 mm. Este modelo es el resultado de la unión de 7 nubes de puntos exteriores y 4 interiores.

A partir de este modelo preciso se realizaron paralelamente dos elaboraciones. Por un lado, se efectúan secciones en las 3 direcciones ortogonales de la iglesia, obteniéndolas en el software

Rapidform XOR3, y exportándolas a *Rhinoceros* para su adaptación a formato CAD, y su última elaboración en *AutoCad*. Por el otro, se realiza una “*decimation*” del modelo que permite exportarlo a un modelador de sector del “*entertainment*”, Modo, para poder realizar diferentes render, para su exposición como imagen sintética, y la posible realización de una maqueta de la iglesia.



Figura 8.40. Sección transversal de la iglesia.

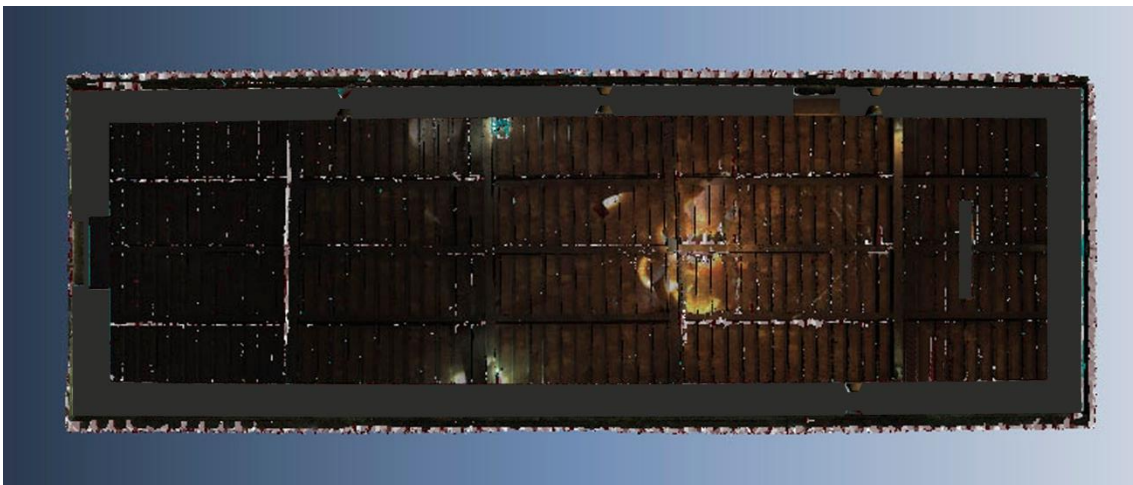


Figura 8.41. Sección horizontal visualizando la cubierta desde el interior.



Figura 8.42. Sección longitudinal de la iglesia del lado Norte.

CUBIERTA

El modelo de la cubierta es también un modelo numérico, resultado de las técnicas de *Image-based Modelling* a un conjunto de 36 fotos, seleccionadas entre todas las capturadas por el dron para realizar dicho modelo. Se efectúa en *Agisoft PhotoScan*, eligiendo un modelo de 200.000 polígonos, y escalándose a partir de puntos medidos en el modelo del escáner. Como se puede deducir, el modelo de la cubierta con el escáner y el desarrollado por métodos fotogramétricos, no es comparable a nivel de detalle geométrico. Sin embargo, gracias a este modelo, no adquirible con escáner láser, se consigue obtener un modelo completo, que no habría sido posible de otro modo.

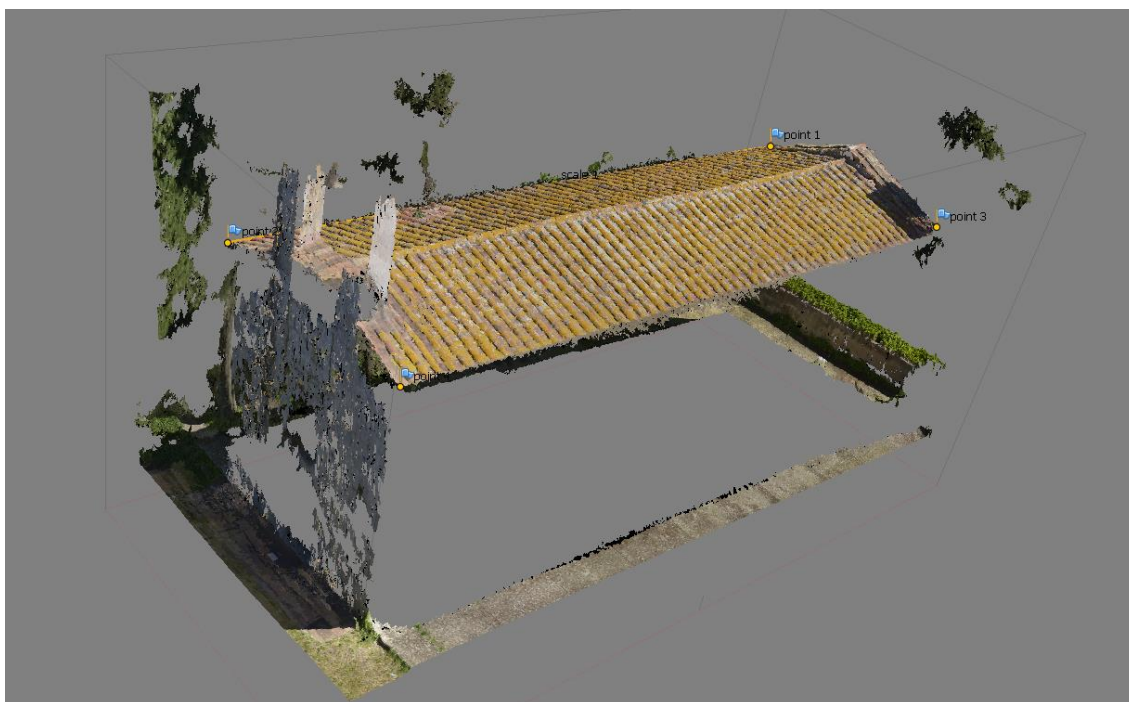


Figura 8.43. Modelo 3D de la cubierta de la iglesia a partir del levantamiento con UAV.

G. RESULTADOS

Tras este caso de estudio, se puede concluir que los modelos obtenidos con técnicas fotogramétricas mediante métodos automáticos o semi-automáticos, presentan una alta variabilidad de la precisión dependiendo del método de adquisición utilizado (tipo de cámara y medio, fotogrametría aérea o terrestre) y del software empleado en los procesos de generación del modelo digital tridimensional, no siendo comparables con los obtenidos mediante sensores activos, que presentan una precisión definida ya de base, que variará dependiendo del modelo del escáner. Sin embargo, se consideran una buena alternativa cuando no existe otro modo de adquisición, teniendo claro dichos factores, o cuando la finalidad del levantamiento no es para un estudio métrico o de cualquier tipo en el que se base su interés en la definición geométrica precisa.

Debe aclararse, que los modelos a partir de *Image-based Modelling*, sí que son una alternativa más que razonable para la obtención de modelos de alta calidad visiva, para la generación de modelos interactivos de bajo peso, etc., convirtiéndose en muchos casos en una opción más conveniente debido a su menor precio y su menor tiempo de elaboración.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje
Isabel Martínez-Espejo Zaragoza



Tesis Doctoral





Figuras 8.44 y 8.45. *Renders* de la iglesia resultados de la integración obtenida mediante las dos tipologías de levantamiento objeto de estudio.



H. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Bendea H, Boccardo, P., Dequal, S., Giulio Tonolo, F., Marenchino, D., Piras, M., 2008. Low cost UAV for post-disaster assessment. En *The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Pekín, China, 3-11 Julio 2008. p. 1373-1380.
- ❖ Bendea, H., Chiabrando, F., Giulio Tonolo, F., Marenchino, D., 2007. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The Augusta Bagiennorum test site. *XXICIPA International symposium*. Atenas, Grecia, 1-6 Octubre 2007.
- ❖ Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012. *Fotogrammetría. Misure, rilievo, progetto. Volumen 3*. Zanichelli editore S.p.A., Bologna
- ❖ Ciampi, F. 2011. *Mille anni della Chiesa di S. Miniato in Marciana Minore. 1011-2011*. Amministrazione Comunale Cascina. Pisa.
- ❖ Ciampi, F., 1984. *Storia e cronaca di Marciana Maggiore e Marciana Minore*. Pacini Editore Pisa.
- ❖ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. McGraw-Hill. Italia.
- ❖ Lingua, A., Marenchino, D., Nex, F., 2009. *Automatic Digital Surface model (DSM) generation procedure from images acquired by Unmanned Aerial Systems (UASs)*. En GeoCad 2009, Alba Iulia (Romania), May 7th - 9th. pp. 198-208.
- ❖ Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez-Solano, R., Martín, L., Bachiller, I., 2010. *Topografía, cartografía y geodesia*. Apuntes de Ingeniería cartográfica, geodésica y fotogrametría de la Universidad Politécnica de Madrid. Tema 11. Fotogrametría y Teledetección.
- ❖ Sciacchitano S., 2009 Conferenza. *Free Sky - From Uav to Uas: il volo di terza generazione per le emergenze territoriali*. World Aeronautical Press Agency.
- ❖ Walter, G., 2013. *Implementazione software di algoritmi per la progettazione di rilievi fotogrammetrici da UAV. Tesi di laurea triennale in Ingegneria Civile*. Università di Pisa.
- ❖ Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., Haala, N., 2013. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 2013 3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 25 – 26 Febrero, Trento, Italia.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



CONFERENCIAS

- ❖ *Open Day della Ricerca. Incontri con la scienza, conferenze e progetti di ricerca in mostra.*
Università di Pisa. Pisa. 8 y 9 Mayo 2013



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



CAPÍTULO 8. LA TERMINOLOGÍA COMO CUESTIÓN ABIERTA



A. EL LEVANTAMIENTO COMO CAMPO MULTIDISCIPLINAR

El levantamiento arquitectónico, como define la “*Carta del rilievo architettonico*” es “*la primitiva forma de conocimiento, y por lo tanto, el conjunto de operaciones, medidas y análisis efectuadas para comprender y documentar el bien arquitectónico en su configuración general (también referida al contexto urbano y territorial), en sus características métricas dimensionales, en su complejidad histórica, y en sus características estructurales y constructivas, además de en las formales y funcionales*”¹. Entendiendo la complejidad de dicha actividad, se puede deducir, como además confirma dicha carta, que para su realización, es necesario la intervención de un equipo multidisciplinar, ya que para tener un levantamiento preciso y completo se debe realizar un conjunto de actividades y estudios pertenecientes a diferentes competencias profesionales.

La utilización de un equipo multidisciplinar, como se puede deducir, traen consigo un conjunto de ventajas: cada uno de los aspectos que se deben considerar en un levantamiento, son tratados por el experto del campo. Sin embargo, también se encuentran algunos inconvenientes, como los conflictos que se pueden encontrar teniendo un punto de vista diferente, debiéndose ocupar de las mismas cosas. Además, aparece el problema del uso de la terminología. Cada uno de los profesionales que intervienen, han recibido su instrucción de diferentes figuras que utilizaban un lenguaje concreto en muchos casos no coincidente con el de aquellos con los cuales tendrán que trabajar.

Debe entenderse, que a parte de las diversas figuras que, teniendo un punto de vista diferente, se ocupan de las mismas cosas, se encuentran a su vez, dentro de la misma categoría, diferentes “escuelas” que, debido al lugar de aprendizaje, tienen su herencia a nivel terminológico y metodológico. Un ejemplo claro de esto, se encuentra en Italia. Dentro del campo de la arquitectura, podemos encontrar diferentes autores que utilizan la palabra “*rilievo*” en un caso tanto para el acto de tomar medidas, como para el dibujo de restitución, mientras que otros prefieren hacer una diferencia utilizando la palabra “*rilevamento*” para la toma de datos, dejando la palabra “*rilievo*” solo para expresar el acto del dibujo para la restitución.

Así, basándose en este razonamiento, surge la idea del estudio de la terminología utilizada por los profesionales que intervienen en el campo del levantamiento. El problema que es expuesto por más de un autor, se considera seriamente, realizando un análisis sobre la terminología utilizada por arquitectos, ingenieros y el resto de figuras que intervienen en el campo del levantamiento 3D integrado para la conservación del patrimonio arquitectónico.

¹ “*la primigenia forma di conoscenza e quindi il complesso di operazioni, di misurazioni e di analisi atto a comprendere e documentare il bene architettonico nella sua configurazione complessiva (anche riferita al contesto urbano e territoriale), nelle sue caratteristiche metriche dimensionali, nella sua complessità storica, nelle sue caratteristiche strutturali e costruttive, oltre che in quelle formali e funzionali.*”



Al problema de la terminología utilizada por diversas figuras, se encuentra añadido, en muchos casos, el problema del idioma. Los llamados en inglés “*false friends*”, en algunas ocasiones hacen que la confusión, ya existente entre términos, se agrande. En esta tesis se han considerado estudiar los términos en 3 idiomas, el español, porque es el idioma de la tesis, el inglés porque es el idioma internacional y el italiano por ser el idioma de la arquitectura clásica.

Otro tema a tratar dentro de este estudio es el problema que surge debido a la difusión de diferentes *software* y *hardware* que usan un vocabulario específico, y que, varía de uno a otro. En estos casos la terminología viene definida por la aplicación utilizada. El uso de varios de ellos, como sucede a menudo, provoca una gran confusión al intentar definir de manera objetiva el trabajo realizado. Un ejemplo de esto lo advierte Guidi (Guidi, Russo y Beraldin, 2010: 214) cuando comenta que uno de los errores que podemos encontrar cuando se crea la malla, es llamado de un modo diverso en el programa “*Innovmetric Polyworks*” y en el “*Inus technology Rapidform XOR*²”.

B. OBJETIVOS (DEL CAPÍTULO)

La terminología es un problema que siempre ha existido entre arquitectos e ingenieros que se han visto siempre afectados por moverse dentro del mismo campo de trabajo aun teniendo diferentes objetivos o finalidades. Sin embargo, este se hace más evidente con la evolución de una tecnología aplicada en los levantamientos tridimensionales en el mundo del patrimonio arquitectónico. Diferentes figuras se ven implicada en el uso de esta nueva tecnología que permite su uso en campos diferentes y, a su vez, relacionados por un interés común, la conservación del patrimonio. De este modo, un campo que es el de la topográfica, primero reducido a un campo específico de la ingeniería, se abre puertas entrando en campos como puede ser el de la arquitectura, la arqueología, la geología, el *computer graphics* para el entretenimiento, etc. Personas de estos campos se ven obligadas a aprender rápidamente el uso de instrumentos que permitan un mayor avance en sus investigaciones en un tiempo menor, pero eso supone que cada uno utilice una terminología más acorde a su campo, adaptando los conceptos a su léxico habitual. Así, cuando se intenta hacer un estudio de esta nueva tecnología más allá de un campo concreto, surge el problema de unir conceptos con un nombre o término concreto.

El objetivo de este capítulo es por lo tanto ese, unir conceptos con un nombre o termino concreto. Estudiar los términos que se utilizan en los diferentes campos para un concepto exacto, y elegir cual se considera el más adecuado, aprovechando, además, este análisis comparativo, para individualizar términos y conceptos sobrepuestos, análogos y redundantes, comprendiéndose que a veces no es un problema de confusión, sino la intención de evitar demasiadas repeticiones en un mismo texto de una palabra en concreto.

² El *software* “*Inus technology Rapidform XOR*” ha sido adquirido recientemente por la empresa *3D System*, por ello, en la actualidad, este programa ha pasado a llamarse “*Geomagic Design X*”.



Además, se realizará este estudio en los tres idiomas comentados, permitiendo de este modo, no marcar una limitación geográfica, sino poder llegar a la gran mayoría de expertos que se ocupan de este campo.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que para la elección de los conceptos, y sus relativos términos, se ha marcado un campo concreto que ha permitido la selección de un conjunto de términos específicos. Este campo es el levantamiento 3D integrado y la restitución a partir de éste. Por lo tanto, para la elección de los conceptos se escogen aquellos que tienen una relación directa con el tema y que a su vez se han utilizado a lo largo de la tesis para explicar la importancia de la integración entre las técnicas de levantamiento avanzadas para una restitución en 3D.

C. METODOLOGÍA (DEL CAPÍTULO)

La estructura de este capítulo se ha decidido así, buscando en primer lugar una presentación de los términos y conceptos usados en el lenguaje utilizado para hablar de los temas referentes a la tesis, y en segundo lugar, permitiendo un fácil uso del capítulo, que permite encontrar cada uno de los términos, siendo este elegido como el principal o como un sinónimo.

Para el desarrollo de este capítulo se han leído una gran cantidad de artículos y diversos libros relacionados con el tema del levantamiento 3D integrado con herramientas avanzadas para la conservación del patrimonio arquitectónico. A partir de esta lectura, se realiza una selección de artículos, libros y autores que permiten poder identificar los diferentes conceptos que se consideran interesantes e importantes para poder analizar la terminología y realizar la clasificación efectuada.

Por otra parte, se considera interesante la agrupación de los términos en diversas familias que permitan concentrar todos los conceptos referentes a un subtema específico en un mismo apartado. De este modo la búsqueda se hace más práctica si se desea comprobar un tema específico y todos los conceptos relacionados con éste. Así, como se explica en el siguiente apartado, la terminología se divide en diversos campos elegidos por ser las temáticas principales que se engloban en la tesis.

D. CAMPOS

Para realizar la clasificación de la terminología y permitir una mayor claridad y facilidad de uso se decide dividir los términos en 6 grandes familias o grupos. Cada uno de ellos concentra aquellos conceptos considerados interesantes y la combinación de términos usados para referirlos, ya sea por un uso que el autor da específico a un término para hablar de ese concepto marcado, o por la elección de diversos vocablos para no repetir la misma palabra, buscando el uso de sinónimos. Los campos elegidos son los siguientes:



- Levantamiento- Metodología. Este campo es un poco más genérico por lo que a parte de tener como el resto la parte de conceptos, tiene una selección de términos que incluye cualidades, que ciertamente pueden encontrarse referidas a cualquiera de los términos de los otros campos. En esta familia, debe entenderse que se podrían encontrar una cantidad infinita de términos, sin embargo, se han seleccionado aquellos que formando parte de este tema más genérico, tienen siempre esta relación directa con la nueva tecnología integrada.
- Fotogrametría. En este grupo se engloban aquellos conceptos que en general se utilizan para hablar de la fotogrametría y más en lo específico para tratar las nuevas técnicas de Image-based Modelling.
- Escáner Láser. En esta familia los conceptos seleccionados hacen referencia a las técnicas de Range-based Modelling, definiendo su terminología tan variante de un autor a otro.
- Topografía. El campo de la topografía es muy amplio como se habla en el capítulo del estado del arte, por lo que aquí se hace una selección de los conceptos que formando parte de éste tienen una relación con las herramientas avanzadas referidas a lo largo de la tesis.
- Imagen. Teniendo en cuenta la importancia que cobra el cromatismo en la restitución integrada y las imágenes utilizadas para ello, es importante definir aquellos conceptos que forman parte de éste campo.
- Edición 3D. Como se comenta a lo largo de toda la tesis, la finalidad del arquitecto no es el levantamiento en sí, sino el estudio arquitectónico que puede realizar a partir de éste, de aquí que este campo sea tan importante como los anteriores.



E. TÉRMINOS Y CONCEPTOS

i. Campo 1.- LEVANTAMIENTO - METODOLOGÍA CONCEPTOS

Levantamiento / Rilievo / Survey.

- Sinónimos: Rilevamento, Toma de datos, 3D data acquisition, 3D capturing techniques, Fase di acquisizione, Adquisición de datos, 3D Acquisition pipeline, Acquisizione dei dati.
- Definición: “*El término levantamiento es utilizado en el ámbito topográfico y se refiere a la toma de datos de un objeto y su representación gráfica, en tres dimensiones o utilizando algún sistema de proyección siendo el sistema acotado el más utilizado como representación final*”
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Riprese³ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010) Range map⁴ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010) (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010) (Arbacea, L., et al, 2013)
- Referencias:
 - Apollonio, F.I., et al, 2010
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Bertocci, S., Bini, M., 2012
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D., 2013
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Merlo, A., 2007
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003

³ Scanzioni

⁴ Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010, p. 100): “*prodotto di ogni singola ripresa, in particolare per sistema a triangolazione, e consiste in una matrice di punti*” (Producto de cada individual captura, en particular por sistema a triangulación, y consiste en una matriz de puntos)



Wenzel, K. et al, 2013

- Notas: La definición se ha realizado a partir de la descripción de Buill, Nuñez y Rodríguez (2007, p. 15). Otra definición se encuentra en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 196): “*La sequenza di operazioni necessaria per giungere al modello digitale (Bernardini e Rushmeier, 2002)*”. En páginas sucesivas añade (p. 203) “*acquisizione: fase rappresentata dal tempo necessario a catturare l’immagine.*” (adquisición: fase representada por el tiempo necesario para capturar la imagen) “*L’acquisizione tridimensionale va quindi effettuata fissando l’attrezzatura su un cavalletto ed orientandola verso la zona di interesse.*” (La adquisición tridimensional va entonces efectuada fijando el equipo sobre un tripode y orientandola hacia la zona de interés). Apollonio, F.I., et al, (2010, p. 273) la define, sin embargo, como “*consiste nel rilievo della posizione dei punti nello spazio, ponendo attenzione alle caratteristiche dello strumento.*” (Consiste en el levantamiento de la posición de los puntos en el espacio, teniendo en cuenta las características del instrumento)

Exactitud / *Accuratezza* / *Accuracy*.

- Sinónimos:
- Definición: Es el grado de concordancia entre el valor de la magnitud medida y un valor de la cantidad real de un mesurando.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007.
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Merlo, A., 2007
 - Migliari, R., 2012
 - Verdiani, G., 2003
 - Wenzel, K. Et al, 2013
- Notas: Definición según el VIM (International Vocabulary Metrology) (Guidi, G. y Remondino, F. 2012, p. 86): “*closeness of agreement between a measured quantity value and a true quantity value of a measurand*” Otra definición la encontramos según Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., (2010, p. 126) “*rappresenta l’errore tra la misura di una quantità e il suo vero valore (o il valore accettato per vero). Nel caso di misure ripetute di uno stesso valore si può determinare come la distanza tra la media dei dati misurati e il dato reale*” (representa el error entra la medida de una cantidad y su valor real (o el valor aceptado como real). En el caso de medidas repetidas de un mismo valor se puede determinar como la distancia entra la medida de los datos medidos y su dato real). Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007), sin embargo, la definen como “*es la fidelidad en la ejecución de una medida, es decir, la diferencia entre el valor medido y el valor real o valor verdadero de la magnitud medida*”



Error topológico / *errore topologico* / *topological error*.

- Sinónimos:
- Definición: Imperfecciones en los polígonos generados en la conversión de la nube de puntos a malla poligonal.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Definición inspirada en Marambio, A. et al (2009, p. 2). Otra descripción se encuentra en Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L. (2007, p. 3): “*como por ejemplo son los triángulos que se cruzan o más de dos triángulos que comparten un mismo lado*” También se encuentra otra definición en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 213): “*Possono crearsi sporadiche connessioni anormale tra poligoni che non hanno motivo logico di esistere e possono essere immediatamente individuate come errori topologici*” (Pueden crearse esporádicamente conexiones anormales entre polígonos que no tienen un motivo lógico de existir y pueden ser inmediatamente individualizadas como errores topológicos).

Precisión / *precisione* / *precision*.

- Sinónimos: Uncertainty.
- Definición: La precisión es el grado de concordancia entre las indicaciones o medidas o valores de cantidad medida obtenida mediante la réplica de medidas en el mismo o similar objeto, bajo condiciones específicas.
- Comentarios: La “Uncertainty” es definida por Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p .86) como *precision*. Un concepto relacionado con este término es: “Desviación estándar”⁵ (Lerma, J.L. et al, 2011).
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
- Notas: Interpretación de la definición de Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p .86) de Uncertainty “(*precision*): *Precision is the closeness of agreement between indications or measured or measured quantity values obtained by replicate measurement on the same or similar object under specified conditions*”. La “*precisione*” según la definición de Guidi, G.,

⁵ Lerma, J.L. et al (2011, p. 114): “*las discrepancias están del orden de la precisión (desviación estándar) del escáner*”



Russo, M. y Beraldin, J.A., (2010, p. 126) “è rappresentata dalla dispersione delle misure intorno alla loro media” (es representada de la dispersión de las medidas entorno a su media). Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 16) la describen, sin embargo, como “se puede entender como el número de cifras decimales con las que se representa una determinada magnitud”

Distorsión / distorsione / Distortion.

- Sinónimos:
- Definición: Es la deformación de una señal tras su paso por un sistema.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Definición inspirada en la definición de distorsión encontrada en Wikipedia (última visita 24/11/2013).

Datos brutos / Dati grezzi / Raw data.

- Sinónimos:
- Definición: Datos que se obtienen con el escáner antes de hacer cualquier intervención o de ser modificados, por parte del operador.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Nuvola grezza (Bianchini, C., 2007), Barridos (Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011).
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
- Notas: El término en este caso ha sido definido por la autora

Medición / Misurazioni / Measurement.

- Sinónimos:
- Definición: *Acción y efecto de comparar una cantidad con su respectiva unidad, con el fin de averiguar cuántas veces la segunda está contenida en la primera.*
Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Documentación métrica (Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007), Sistema de medición (Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011) (Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010), Photogrammetric measurement (Wenzel, K. et al, 2013).
- Referencias:
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Lerma, J.L., et al., 2011
 - Verdiani, G., 2003.
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Definición de la RAE (última visita: 22/11/2013).



Recubrimiento / Ricoprimento / Correspondences across.

- Sinónimos: Ricopertura, Sovraposizione delle prese, Image overlapping, área de solape.
- Definición: Superposición de las imágenes captadas, para permitir en el “Image-based modeling”, mediante la obtención de puntos homólogos.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2011
 - Remondino et al, 2012
- Notas:

Diana / target / target.

- Sinónimos: Control point, Puntos de control, Diana de control.
- Definición: “Elemento cuya posición fija es registrada en cada escaneo y que sirve como referencia para combinarlos”
- Comentarios: Algunos autores españoles también usan el término target. Algunos conceptos relacionados con este término son: Dianas esféricas y circulares (Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007), Target coordinate system (Wenzel, K. et al, 2013), Dianas naturales (Cueli López, J., 2010), Dianas codificadas = Coded Target (Cueli López, J., 2010) Guidi, G. y Remondino, F. 2012.
- Referencias:
 - Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Cueli López, J., 2010
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Wenzel, K. Et al, 2013
- Notas: Definición que se encuentra en el artículo (Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008, p. 19). La definición de Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 90) sería “Measuring some reference points on the scene with a surveying system like for example a total station, allows to define a global reference system in which such targets are represented”.



Terrestre / *terrestre* / *terrestrial*.

- Sinónimos:
- Definición: Adjetivo que se utiliza para referirse a cualquier sustantivo que se realiza, se utiliza, funciona o sucede en el suelo o corteza terrestre.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2011
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A., Pucci, B., Nuñez, M.A. y Buill, F., 2009
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Wenzel, K. Et al, 2013
- Notas: Definición de la autora a partir de las definiciones leídas en Wikipedia y www.thefreedictionary.com.

Aéreo / *aereo* / *aerial*.

- Sinónimos:
- Definición: Adjetivo que se utiliza para referirse a cualquier sustantivo que se realiza, se utiliza, funciona o sucede en el aire.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, JL., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Definición deducida a partir de la definición de terrestre.

Calibración / *calibrazione* / *calibration*.

- Sinónimos:
- Definición: La calibración de cualquier sistema activo o pasivo consiste en la extracción de los parámetros característicos internos de funcionamiento, tales que permitan controlar en manera global el comportamiento del instrumento y los errores introducidos en la adquisición del dato



- **Comentarios:** Algunos conceptos relacionados con este término son: Calibration and orientation data (Lerma, J.L. et al, 2010), Calibration pattern (patrón de calibración) (Wenzel, K. et al, 2013), Geometric camera calibration⁶ (Guidi, G. y Remondino, F. 2012), Radiometric calibration (Guidi, G. y Remondino, F. 2012), Calibrar inversamente (Cueli López, J., 2010), Corrección del eje óptico (Cueli López, J., 2010), Metodo proiettivo inverso⁷ (Apollonio, F.I., et al, 2010), Proceso de autocalibración (Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007)
- **Referencias:**
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Cueli López, J., 2010
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003
- **Notas:** Interpretación de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 125): “*La calibrazione di un qualsiasi sistema attivo o passivo consiste nell’ estrazione dei parametri caratteristici interni di funzionamento, tali da poter controllare in maniera globale il comportamento dello strumento e gli errori introdotti nell’ acquisizione del dato.*” En otras páginas añaden (pp. 51): “*In fotogrammetria si cerca di identificare come e perché la geometria di un’ immagine in una camera reale differisce dalla geometria di una camera stenopeica. Questa procedura è conosciuta come calibrazione della camera.*” (En fotogrametría se busca determinar cómo y porqué la geometría de una imagen en una cámara real difiere de la geometría en una cámara métrica. Este proceso es conocido como calibración de la cámara.) (pp. 62) “*Consiste nel determinare tutti i parametri interni alla camera*” (Consiste en determinar todos los parámetros internos de la cámara.) Otra definición se encuentra en Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 170): “*procedura per la quale lo strumento viene calibrato. In molte applicazioni la fase di calibrazione delle camere consiste nella sola determinazione della lunghezza focale (...) con la calibrazione si determina la deviazione geometrica gra la realtà (collinearità) e il sistema di acquisizione delle immagini.*” (Proceso por el cual viene el instrumento calibrado. En muchas aplicaciones la fase de calibración de las cámaras consiste en la sola determinación de la

⁶ Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 82) “*is defined as the determination of deviations of the physical reality from a geometrically ideal imaging system based on the collinearity principle: the pinhole camera.*”(se define como la determinación de las desviaciones de la realidad física de un sistema de formación de imágenes geoméricamente ideales basado en el principio de colinealidad: la cámara de agujero de alfiler).

⁷ Apollonio, F.I., et al, (2010, p. 283): “*si basa sostanzialmente sul ritrovamento dei parametri interni ed esterni della camera.*” (Se basa sustancialmente en el encuentro de los parámetros internos y externos de la cámara”



longitud focal... con la calibración se determina la desviación geométrica entre la realidad (colinealidad) y el sistema de adquisición de las imágenes).

Auto-calibración / *auto-calibrazione* / *Self-calibration*.

- Sinónimos: Automatic camera calibration, Autocalibration.
- Definición: Procedimiento que presentan algunos programas para calcular los parámetros de calibración de la cámara automáticamente a partir de fotografías que presenten un mínimo del 30% de superposición.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Cueli López. J., 2010
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Cueli López, J., 2010: Tutorial 4. Calibración de la cámara. Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 83) “*The solution of a self-calibrating bundle adjustment leads to the estimation of all the interior parameters and APs, starting from a set of manually or automatically measured image correspondences (tie points)*” (La solución de un paquete de ajuste de auto-calibración conduce a la estimación de todos los parámetros interiores y parámetros adicionales, de forma manual o de forma automática, a partir de un conjunto de correspondencias imágenes medidas (puntos de unión)).

Method Bundle Adjustment / *Method Bundle Adjustment* / *Method Bundle Adjustment*.

- Sinónimos:
- Definición: Proporciona una determinación simultánea de todos los parámetros del sistema junto con las estimaciones de la precisión y la fiabilidad de las incógnitas.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Self-calibration bundle adjustment⁸ (Guidi, G. y Remondino, F. 2012) Method Self-calibrating bundle adjustment⁹ (Guidi, G. y Remondino, F. 2012) (Apollonio, F.I. et al, 2010).

⁸ Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 83) “*The solution of a self-calibrating bundle adjustment leads to the estimation of all the interior parameters and APs, starting from a set of manually or automatically measured image correspondences (tie points)*” (La solución de un paquete de ajuste de auto-calibración conduce a la estimación de todos los parámetros interiores y parámetros adicionales, de forma manual o de forma automática, a partir de un conjunto de correspondencias imágenes medidas (puntos de unión))

⁹ Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 72) “*Method bundle adjustment but the interior orientation parameters are also unknowns.*” (Es igual al método “bundle adjustment” pero los parámetros de orientación interior también son incógnitas). Otra definición se encuentra en Apollonio, F.I. et al, (2010, p. 294): “*consiste nella ripresa da numerosi punti di vista di una serie di target che permettono la loro misura in maniera automatica ed accurata nelle immagini.*” (Consiste en la captura desde numerosos puntos de vista de una serie de target que permiten su medida en una modo automático y preciso en las imágenes)



• Referencias:

- Apollonio, F.I. et al, 2010
- Guidi, G. y Remondino, F. 2012
- Wenzel, K. et al, 2013

- Notas: Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 72) “*provides a simultaneous determination of all system parameters along with estimates of the precision and reliability of the unknowns*”.

UAV / UAV / UAV.

- Sinónimos: drone
- Definición: Acrónimo de Unmanned Aerial Vehicles. Dicho acrónimo se utiliza para definir la tecnología inalámbrica en los dispositivos de aire con vehículos aéreos no tripulados, como helicópteros a control remoto, cometas o globos
- Comentarios:
- Referencias:
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
- Notas: Interpretación de la definición realizada por Lerma, J.L., et al (2010, p. 500) “(UAV): *wireless technology on air devices with unmanned aerial vehicles such as remote-controlled helicopters, kites or balloons.*” Otra definición se encuentra en Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 166): “*Piccole piattaforme (aeroplani o elicotteri senza piloti a bordo) che possono essere controllati da una postazione remota o che possono volare autonomamente utilizzando piano di volo pre-programmati.*” (Pequeñas plataformas (aeroplanos o helicópteros sin piloto a bordo) que pueden ser controlados desde una posición remota o que pueden volar autónomamente utilizando plan de vuelo pre-programados).

Digitalización / Digitalizzazione / digitizing.

- Sinónimos:
- Definición: “*Es la generación de un modelo informático tridimensional de un objeto*”
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Representación virtual (Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007), Reproducción virtual (Marambio, A., et al, 2009).
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
- Notas: Definición sacada de Torres, J.C., Cano, P., Melero, J., Espana, M., Moreno, J., 2010. Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio. *Virtual Archaeology Review*. Volumen 1 Número 1. ISSN: 1989-9947. P. 51. (http://varjournal.es/doc/varj01_001_14.pdf)

Flujo de trabajo / Pipeline / Pipeline.

- Sinónimos: Workflow



- Definición: Metodología seguida para llegar a un objetivo concreto.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas:

Modelado inverso / Reverse modelling / Reverse modelling.

- Sinónimos: Reverse engineering process.
- Definición: Se trata de un proceso inverso al proyectual en sentido canónico: el objeto físico representa el dato de inicio, mientras el modelo digital constituye el producto final del proceso de modelización.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I., et al, 2010
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Traducción de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., (2010, p. 195):
“*si tratta di un processo inverso a quello progettuale in senso canonico: l’oggetto fisico rappresenta il dato di partenza, mentre il modello digitale costituisce il prodotto finale del processo di modellazione*”.

Optimización / Ottimizzazione / Optimization.

- Sinónimos:
- Definición: Es un paso útil final, en cualquier caso aplicativo, donde se puede obtener una reducción significativa del tamaño de malla, realizando una decimación inteligente basada en la curvatura del modelo. La optimización de un modelo High-poly, convierte a éste en un modelo Low-poly aplicándole un mapa de normales y de desplazamiento adecuado para mantener un nivel alto de detalle
- Comentarios:
- Referencias:
 - Battini, C., Fantini, F., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Fantini, F., 2010
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010



Koska, B. y Křemen, T., 2013

Marambio, A., et al, 2009

- Notas: Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 93) “*is instead a final useful step in any applicative case, where a significant reduction of the mesh size can be obtained*”. Fantini, F. (2010: 1)

Nivel de detalle / Livello di dettaglio / Levels of Detail (LOD).

- Sinónimos: Degree of detail
- Definición: La idea de los niveles de detalle desciende del concepto de optimización del modelo en base al objetivo para el cual es destinado. La aplicación consiste en generar modelos a diferentes niveles de resolución geométrica y elegir el nivel según el objetivo para el cual sea creado.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I., Gaiani, M. y Manferdini, A.M., 2010
 - Fantini, F., 2010
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Marambio, A. et al, 2009
- Notas: Interpretación del término definido por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p.317): “*discende dal concetto di ottimizzazione del modello in base allo scopo cui è destinato*”. Este término, sin embargo, es definido en Marambio, A. et al (2009, p. 4) como “*Distancia entre las posiciones del escáner y distancia entre las medidas adquiridas*”.

Iterative Closest Point (ICP) / Iterative Closest Point (ICP) / Iterative Closest Point (ICP).

- Sinónimos:
- Definición: Se compone de dos pasos: en el primero vienen identificadas parejas hipotéticas de puntos correspondientes en el área de superposición de dos “range map”. Sucesivamente se hace un procedimiento de optimización que consiste en una transformación rígida que reduce la distancia (mediante el cálculo de mínimos cuadrados) entre los dos conjuntos de puntos. El proceso viene, entonces, repetido hasta que no son satisfactorios los criterios de convergencia
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Interpretación de la definición encontrada en Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 102): “*(ICP) Si compone di due passi: nel primo vengono identificate coppie di ipotetici punti corrispondenti nell’area di sovrapposizione di due range map. Successivamente è avviata una procedura di ottimizzazione che computa una trasformazione rigida che riduce*”.



la distanza (nel senso dei minimi quadrati) tra i due insiemi di punti. Il processo viene, quindi, iterato fino a che non siano soddisfatti i criteri di convergenza.” Otra descripción se encuentra en Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p.90): “*Using as references natural 3D features in the scene is a possible alternative somehow similar to the previous one. The only difference is that no special target has to be fixed on the scene and individually measured by the operator.*” (Utilizar para orientar como referencias características naturales en 3D de la escena. Una diana natural tiene que ser fija en la escena y se mide de forma individualizada por el operador).

CUALIDADES

Tridimensional / tridimensionale / 3D Three-dimensional.

- Sinónimos:
- Definición: adjetivo que se utiliza para referenciar un objeto definido en 3 dimensiones.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Migliari, R., 2012
 - Merlo, A., 2007
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003
- Notas:

Resolución / Risoluzione / Resolution.

- Sinónimos:
- Definición: El cambio más pequeño en una cantidad medida que causa un cambio perceptible de la indicación correspondiente. El detalle mínimo geométrico que el dispositivo de gama es capaz de capturar.
- Comentarios:



• Referencias:

- Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
- Arbacea, L., et al, 2013
- Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
- Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
- Dore, C. y Murphy, M., 2012
- Guidi, G. y Remondino, F., 2012
- Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
- Koska, B. y Křemen, T., 2013
- Lerma, J.L. et al, 2010
- Lerma, J.L. et al, 2011.
- Marambio, A. et al, 2009.
- Remondino, F. et al, 2012
- Wenzel, K. Et al, 2013

- Notas: Definición según el VIM (International Vocabulary Metrology) (Guidi, G. y Remondino, F. 2012, p. 85): “*Smallest change in a quantity being measured that causes a perceptible change in the corresponding indication*” “*the minimum geometrical detail that the range device is capable to capture*”. Se encuentra definida también por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 126) “*(massima): consiste in generale nella più piccola variazione del misurando che può essere misurata. Nel caso di uno strumento per rilievo tale variazione è definita dal minimo passo di campionamento spaziale utilizzabile*” (consiste en general en la más pequeña variación del mesurando que puede ser medida. En el caso de un instrumento para levantamiento tal variación es definida como el mínimo paso de muestreo espacial utilizable)

Alta definición / *alta definizione* / *High-Definition*.

- Sinónimos: alto nivel de detalle, alto livello di dettaglio, alta resolución, High-resolution, Highly detailed, Accurate.
- Definición: término que se utiliza para definir acciones realizadas a alto nivel de detalle y precisión.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Modelo HP (high-poly) (Fantini, F., 2010) (Battini, C., Fantini, F., 2007), Modelo master (Apollonio, F.I., Gaiani, M. y Manfredini, A.M., 2010)
- Referencias:
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Fantini, F., 2012
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Remondino, F. et al, 2012
- Notas: Término definido por la autora.

Baja definición / *bassa definizione* / *Low-resolution*.

- Sinónimos: bajo detalle, Low detailed



- Definición: termino que se utiliza para definir acciones realizadas a bajo nivel de detalle y precisión.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Modelos optimizados (Marambio, A. et al, 2009), Modelos de malla simplificados (Fantini, F., 2012).
- Referencias:
 - Fantini, F., 2012
 - Remondino, F. et al, 2012
- Notas:

Digital / digitale / digital.

- Sinónimos:
- Definición: Cuando se habla de que un objeto o un servicio es digital, se está haciendo referencia a que el mismo se establece a partir del envío discontinuo o discreto de datos. Por lo general, el término digital (utilizado como adjetivo) se encuentra en los ambientes tecnológicos y de electrónica ya que es uno de los últimos avances en lo que respecta a calidad de imagen, de sonido, de efectos, etc.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Anghelddu, D., 2013
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2010Lerma, J.L. et al, 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Marambio, A., Pucci, B., Nuñez, M.A. y Buill, F., 2009
 - Merlo, A., 2007
 - Migliari, R., 2012
 - Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: <http://www.definicionabc.com/tecnologia/digital.php#ixzz2leq3RvOO> (última visita: 25/11/2013)



Fotorrealista / fotorealístico / photo-realistic.

- Sinónimos:
- Definición: Adjetivo usado para hablar de modelos digitales, que a la información geométrica conseguida a través de un instrumento para la adquisición tridimensional, integran la textura obtenida mediante fotografías.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Apparenza visiva¹⁰ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010)
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Definición inspirada en la descripción dada a “Modelo fotorrealístico 3D” de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 180) “*modelli digitali che integrano le informazioni geometriche ottenute da uno strumento per acquisizione tridimensionale, con texture ottenute da una fotocamera*” Otra definición encontrada sería (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010, p. 114) “*Le immagini vengono acquisite con fotocamere (...), devono essere registrate ed allineate al modello geometrico attraverso processi interattivi, identificando punti omologhi tra loro*” (Las imágenes vienen adquiridas con foto-cámaras, que deben ser registradas y alineadas con respecto al modelo geométrico a través de procesos interactivos, identificando puntos homólogos entre ellos).

Clásico / clasico / classical.

- Sinónimos: tradicional
- Definición: Adjetivo que se utiliza para designa sustantivos que se adaptan a lo marcado por la tradición o las reglas establecidas por la costumbre y el uso. También se utiliza para referirse a un sustantivo perteneciente o relativo al momento histórico de una ciencia, en el que se establecen teorías o modelos que son la base de su desarrollo posterior.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Croquis (Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007), Medida directa (Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007).
- Referencias:
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010

¹⁰ Definida por Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 114) como “*aspetto qualitativo. Possibilità del modello 3D di rappresentare l’oggetto reale riproducendo, nella maniera più fedele possibile, anche il comportamento della superficie rispetto alla riflessione della luce, includendo le caratteristiche di colore e di finitura della superficie stessa*”. (Aspecto cualitativo. Posibilidad del modelo 3D de representar el objeto real reproduciendo, en la manera más fiel posible, también el comportamiento de la superficie con respecto a la reflexión de la luz, incluyendo las características de color y de acabado de la superficie misma) “*Proprietà definita come texture della superficie.*” (propiedad definida como la textura de la superficie)



Lerma, J.L. et al, 2010

Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011

- Notas: Definición de la autora deducida a partir de las definiciones encontradas en la RAE y WordReference (última visita: 25/11/2013)

Virtual / *Viruale* / *Virtual*.

- Sinónimos:
- Definición: Es un adjetivo usado para referirse en este campo a cualquier concepto simulado, generado o asistido comúnmente por ordenador.¹¹
- Comentarios:
- Referencias:
 - Bianchini, C., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003
- Notas: Definición de la autora inspirada a partir de algunas definiciones encontradas en "<http://telematica.cicese.mx/computo/super/cicese2000/realvirtual/Part2.html>"

ii. **Campo 2.- FOTOGRAMETRÍA**

CONCEPTOS

Fotogrametría / *Fotogrammetria* / *Photogrammetry*

- Sinónimos:
- Definición: Es la ciencia que permite obtener medidas precisas a partir de fotografías (imágenes) mediante la transformación de información bidimensional en medidas tridimensionales.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Fantini, F., 2012



Guidi, G. y Remondino, F., 2012

Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, JL., 2010

Koska, B. y Křemen, T., 2013

Lerma, J.L. et al, 2010

Lerma, J.L. et al, 2011

Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010

Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007

Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011

Wenzel, K. Et al, 2013

- Notas: Interpretación de la definición hecha por (Mikhail et al., 2001) encontrada en Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p.166-167): “è la scienza che consente di ottenere misure accurate da fotografie (immagini) mediante la trasformazione di informazioni bidimensionali in misure tridimensionali”. Otra definición similar se encuentra en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 17): “è definita come la scienza che permette di ottenere una misura accurata delle caratteristiche geometriche di un oggetto, come forma e posizione, attraverso l’impiego congiunto di fotografie che lo ritraggono da posizioni differenti” (es definida como la ciencia que permite de obtener una medida precisa de las características geométricas de un objeto, como forma y posición, a través de la utilización conjunta de las fotografías que lo capturan desde diferentes posiciones). Lerma, J.L. et al (2010, p. 500) la define como “can be described as the science and art of measuring and interpreting imagery in order to reconstruct metrically objects either in 3D or in 2D” (puede ser descrita como la ciencia y arte de medir e interpretar imágenes en orden de reconstrucción métrica de objetos en 3D o en 2D). Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 23) dan dos definiciones: “la métrica de lo escrito con luz” “la disciplina que lleva a cabo medidas indirectas de objetos utilizando perspectivas fotográficas. El objetivo de la fotogrametría es conseguir información tridimensional de objetos a partir de medidas efectuadas en fotografías”

IBM (Image-Based Modelling) / IBM (Image-Based Modelling) / IBM (Image-Based Modelling)

- Sinónimos: Fotogrametría Digital Automatizada, Método general de la fotogrametría, Image-based 3D model, Structure-from-motion software (SFM), Fotomodellazione, Reality-based 3D modelling, Close range photogrammetry (CRP), Range images, Modelli Fotogrammetrici 3D, 3D imaging¹².
- Definición: Este método por lo general se aplica a los objetos que tienen un tamaño comprendido entre algunos decímetros hasta 200 m. Tomando la orientación en el espacio de una imagen, cada imagen genera un haz de rayos que pueden ser utilizados para generar nubes de puntos, modelos de textura (modo autónomo) o medidas de objetos en el espacio (si hay más de una imagen, y se cruzan los haces de rayos que vienen de cada una de ellas).
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Image-based technique (Guidi, G. y Remondino, F. 2012), Image survey (Dore, C. y Murphy, M., 2012), Pair of images (Wenzel, K. et al, 2013), Image-based 3D reconstruction (Remondino, F., et al, 2012)

¹² Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 123): “l’insime delle tecnologie e dei metodi che permettono di trasformare un oggetto fisico in un artefatto digitale catturandone la forma.” (El conjunto de las tecnologías y de los métodos que permiten transformar un objeto físico en un artefacto digital capturando la forma)



(Corsini, M., et al, 2013), Close range stereo pairs (Lerma, J.L. et al, 2010), Photogrammetric survey (Dore, C. y Murphy, M., 2012) (Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012).

• Referencias:

- Alsadik, B. et al, 2013
- Bertocci, S., Bini, M., 2012
- Bianchini, C., 2007
- Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
- Corsini, M., et al, 2013
- Guidi, G. y Remondino, F., 2012
- Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D., 2013
- Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
- Koska, B. y Křemen, T., 2013
- Lerma, J.L. et al, 2010
- Remondino, F. et al, 2012
- Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007
- Rodríguez Navarro, P., 2012
- Wenzel, K. et al, 2013

- Notas: Interpretación de la descripción de Lerma, J.L. et al, (2010, p. 500): “Close range photogrammetry usually applies to objects ranging from a few decimetres up to 200 m in size. If the orientation in space of one image is known, every image generates a bundle of rays that can be used to either texture models (standalone mode) or measure objects in space (if more than one image is available and intersect the bundle of rays coming from different pictures).” Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J. (2007, p. 23) lo llaman “método general de la fotogrametría” y lo definen como: “Para pasar de información bidimensional proporcionada por las fotografías a la información tridimensional, a partir de la reconstrucción de la forma de cada uno de los haces fotográficos y de su situación en el espacio con respecto a un cierto sistema de referencia externo, y usando la visión estereoscópica para la identificación de los rayos homólogos de cada haz, es capaz de proporcionar las coordenadas tridimensionales de cada punto objeto medido”.

Image matching / *Image matching* / *Image matching*.

- Sinónimos: Automated procedures (“image matching”), Automatic image processing methods, Photogrammetric image processing methods, Image processing.
- Definición: Proceso por el cual se realiza una correlación automática de las imágenes generando una nube de puntos.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Restituzione 3D¹³ (Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010) (Merlo, A., 2007)(Bianchini, C., 2007).
- Referencias:
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Wenzel, K. et al, 2013

¹³ Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010): “mediante misure (manuali, semi automatiche o automatiche) di punti omologhi tra le immagini” (mediante medidas (manuales, semi automáticas o automáticas) de puntos homólogos entre las imágenes).



- Notas: Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010: “correlazione automatica di immagini (Remondino et al., 2008)” En Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 213) se encuentra la misma definición.

Fotograma / Fotogrammi / Photographs

- Sinónimos:
- Definición: “*Fotografías analógicas que en su formato métrico se denominan fotogramas*”
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Imágenes con carácter métrico (Lerma, J.L. et al, 2011), Fotografía¹⁴ (Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007).
- Referencias:
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Lerma, J.L. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003
- Notas: Lerma, J.L. et al, 2011

Sensor pasivo / Sensore passivo / Passive sensor.

- Sinónimos: Passive technique, Tecniche di misura passiva.
- Definición: Un tipo de sensor “*que se limita a observar la escena a través de un sistema óptico u óptico-electrónico, con el objetivo de obtener de esta visión, la información de carácter geométrico (Guidi, 2010, p.10)*”.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Sensores de imagen (Lerma, J.L. et al, 2011)
- Referencias:
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Rodríguez Navarro, P. (2012, p. 101)

Ortofoto / Ortofoto / Orthophoto

- Sinónimos: Ortofotografía
- Definición: “*Imágenes en la que todo el plano está representado sin deformaciones y con validez métrica*”

¹⁴ Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 31) “*de un objeto es una proyección o perspectiva cónica del mismo, desde el centro óptico o centro de perspectiva de la cámara, sobre el plano de la fotografía*” (p. 32) “*registro permanente en forma de imagen causado por la acción de la luz sobre una superficie sensible, que en el caso analógico suele estar formado por sales de plata*”



- **Comentarios:** Algunos conceptos relacionados con este término son: Ortoimágenes (Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008), Orthoimage¹⁵ (Koska, B. y Křemen, T., 2013), Orthographic images (Dore, C. y Murphy, M., 2012), Ortho photo creation (Dore, C. y Murphy, M., 2012), Fotoplano (Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007), Ortoproyección¹⁶ (Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007) (Marambio, A. et al, 2009).
- **Referencias:**
 - Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Cueli López, J., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Wenzel, K. Et al, 2013
- **Notas:** Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R. (2008, p. 24). Otra definición se encuentra en Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F. (2010, 228): “*immagini in cui viene rimosso l’effetto prospettico dovuto alla procedura di acquisizione dell’immagine. L’ortofoto viene generata utilizzando il modello digitale con un approccio diretto o indiretto e poi mappata direttamente sul modello attraverso un metodo proiettivo ortogonale.*” (imágenes en las cuales viene eliminado el efecto perspectivo debido al procedimiento de adquisición de la imagen. La ortofoto viene generada utilizando el modelo digital con un enfoque directo o indirecto y después mapeada directamente sobre el modelo a través de un método de proyección ortogonal). Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 121) la definen como: “*fotografía ortoprojectada*” (leer definición de ortoproyección)

Orientación / Orientamento / Orientation.

- **Sinónimos:** Camera resectioning, Resezione.
- **Definición** Consiste en encontrar los parámetros de orientación externa (3 posiciones y 3 rotaciones) de cada imagen que se está utilizando
- **Comentarios:**
- **Referencias:**
 - Bianchini, C., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al., 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010

¹⁵ Se define según Koska, B. y Křemen, T. (2013, p. 133): “*An orthoimage is an orthogonal view on a point cloud, which has a colour based on the intensity of the returned signal or from an image. An ortho image has a resolution limited by resolution of the point cloud.*” (Una ortoimagen es una visualización ortogonal de una nube de puntos, la cual tiene un color basado en la intensidad del retorno de la señal presa de una imagen. Una orto imagen tiene una resolución limitada por la resolución de la nube de puntos).

¹⁶ Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 121) “*proceso de transformación de una perspectiva, generalmente fotográfica, en una proyección ortogonal*”



Rodríguez Navarro, P., 2012

Verdiani, G., 2003

Wenzel, K. et al, 2013

- Notas: Interpretación de la descripción realizada por Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 173): “*consiste nel trovare i parametri di orientamento esterno (3 posizioni e 3 rotazioni) di ciascuna immagine che si sta utilizzando.*” Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 105) la definen como: “*proceso que permite establecer la posición de las cámaras fotogramétricas tal como estaban en el momento de efectuar cada fotografía, respecto a un sistema de referencia terrestre*”.

Parámetros de orientación / Parametri Addizionali (AP) / Additional Parameters (Aps)

- Sinónimos:
- Definición: “*Los parámetros de orientación de la cámara son el conjunto de parámetros internos y externos de la cámara. Los parámetros de orientación internos consisten en la constante de la cámara (o longitud focal, f), posición del punto principal (x_0, y_0) y algunos parámetros adicionales usados para modelar eventuales errores sistemáticos debidos, por ejemplo, a la distorsión de la lente. Los parámetros de orientación externos consisten en las 3 coordenadas espaciales (posición en el espacio de la cámara, generalmente indicados con X_0, Y_0, Z_0) y en las 3 rotaciones del centro prospectivo de la cámara en el espacio*”
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Exterior orientation parameters (Lerma, J.L. et al, 2010), Interior orientation parameters¹⁷ (Lerma, J.L. et al, 2010), Intrinsic camera parameters (Wenzel, K. et al, 2013), Principal point offset (Guidi, G. y Remondino, F., 2012).
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
- Notas: Concepto inspirado en Manferdini A.M. y Remondino, F., (2010, p. 169): “*parametri di orientamento interno ed esterno delle camere. I parametri di orientamento interno consistono nella costante della camera (lunghezza focale f), posizione del punto principale (x_0, y_0) e alcuni parametri addizionali (AP) usati per modellare eventuali errori sistematici dovuti, per esempio, alla distorsione della lente. I parametri di orientamento esterno consistono nelle 3 coordinate spaziali (posizione nello spazio della camera, generalmente indicate con X_0, Y_0, Z_0) e nelle 3 rotazioni del centro prospettico della camera nello spazio*”.

Puntos homólogos / Punti omologi / Homologous point.

- Sinónimos:
- Definición: Son puntos semejantes medidos en las imágenes, de los cuales sale de cada uno de ellos una ecuación de colinealidad, que permite resueltas las ecuaciones la calibración de la cámara y la orientación de las imágenes.
- Comentarios:
- Referencias:

¹⁷ Los parámetros de orientación interior son según Lerma, J.L. et al (2010, p. 500) “*focal length, principal point coordinates and distortion parameters*” (distancia focal, coordenadas del punto principal y los parámetros de distorsión).



- Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
Lerma, J.L. et al, 2010
Manferdini A.M. y Remondino, F., 2010
Rodríguez Navarro, P., 2012 Cueli López, J., 2010
- Notas: Concepto inspirado en Manferdini A.M. y Remondino, F., (2010, p. 170) a partir de la descripción del algoritmo de “*bundle adjustment*”. Otra descripción la encontramos en Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J. (2007, p. 161) “*Puntos imagen de un par fotogramétrico que se corresponden con un mismo punto terreno*”

Rectificación / Raddrizzamento / rectification.

- Sinónimos:
- Definición: Normalmente las fotografías se toman con el eje de la cámara inclinado levemente respecto a la vertical u horizontal, puesto que es casi imposible lograr su verticalidad u horizontalidad perfecta. No existe ningún mecanismo que posibilite la obtención de fotografías perfectamente verticales u horizontales. La rectificación consiste, por lo tanto, en la corrección de las fotografías con respecto a un plano horizontal o vertical de referencia. En el fotograma rectificado sólo podemos reproducir en verdadera forma y dimensión los elementos contenidos en un plano del modelo.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I., et al, 2010
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Docci, M., Maestri, D. 1984
 - Lerma, J.L., et al., 2011
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
- Notas: Inspirada en la descripción de fotografías rectificadas de los apuntes de “Topografía, cartografía y geodesia” de Ingeniería cartográfica, geodésica y fotogrametría de la Universidad Politécnica de Madrid. Tema 11. Fotogrametría y Teledetección. P. 7. Otra definición la podemos encontrar en - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J. (2007, p. 91): “*Proceso que consigue transformar o enderezar una perspectiva fotográfica obteniendo una representación semejante a la que se conseguiría en la fotografía estrictamente perpendicular al plano*”.

Cámara / camera / camera.

- Sinónimos:
- Definición: Aparato que sirve para hacer fotografías, y que consta de un medio óptico, el objetivo, y de un medio mecánico, el obturador.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007



- Cueli López, J., 2010
- Guidi, G. y Remondino, F. 2012
- Lerma, J.L. et al, 2011
- Marambio, A., Pucci, B., Nuñez, M.A. y Buill, F., 2009
- Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Definición de la RAE (última visita: 23/11/2013).

Distancia focal / *Distanza focale* / *Focal length*.

- Sinónimos:

Definición: Distancia en mm desde el centro óptico de la lente hasta el plano focal.

- Comentarios:

- Referencias:

Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
Cueli López, J., 2010
Guidi, G. y Remondino, F., 2012
Wenzel, K. et al, 2013

- Notas: Inspirada en la definición de Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 76) “*Distance in mm from the optical centre of the lens to the focal plane*”.

Colinealidad / *collinealità* / *Collinearity*.

- Sinónimos:

- Definición: El principio de colinealidad establece que dado el centro de proyección de la cámara fotográfica, un punto P' sobre la imagen y su correspondiente punto P en el espacio deben yacer sobre una línea recta.

- Comentarios:

- Referencias:

Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
Guidi, G. y Remondino, F., 2012)
Lerma, J.L. et al, 2010
Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010

- Notas: Definición del principio de colinealidad de Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 168): “*che stabilisce come il centro di proiezione della camera fotografica, un punto P' sull'immagine e il suo corrispondente punto P nello spazio devono giacere su una linea retta*”.

Analógica / *analogica* / *Analogical*.

- Sinónimos:

- Definición: “*Dicho de un aparato o de un instrumento de medida, que la representa mediante variables continuas, análogas a las magnitudes correspondientes*”

- Comentarios:

- Referencias:

Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
Lerma, J.L. et al, 2011



- Notas: Definición de la RAE (última visita: 23/11/2013)

Analítica / *analitica* / *Analytical*

- Sinónimos:
- Definición: Adjetivo usado para hablar de elementos a los que se llega mediante la descomposición o el análisis.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012
 - Lerma, J.L. et al, 2011
- Notas: Definición de la autora a partir de la descripción de la RAE (última visita: 23/11/2013).

Estereoscópico / *Stereoscopico* / *Stereoscopic*.

- Sinónimos:
- Definición: Adejetivo que referencia a cualquier técnica capaz de recoger información visual tridimensional y/o crear la ilusión de profundidad mediante una imagen estereográfica, un estereograma, o una imagen tridimensional.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Fotografías estereoscópicas (Lerma, J.L., et al, 2011), Estereofotogrametría¹⁸ (Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007), Restitución estereofotogramétrica (Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007), Coppia Stereofotogrammetrica (Bianchini, C., 2007).
- Referencias:
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Definición de la autora a partir de la descripción de “Estereoscopía” de Wikipedia (última visita: 23/11/2013).

iii. Campo 3.- ESCÁNER LÁSER CONCEPTOS

Escáner Láser 3D / *3D laser scanner* / *3D laser scanner*.

- Sinónimos: Escáner Láser 3D, Láser escáner, 3D laser scanner, Laser Scanning, Laser scan, Scanner laser, Laserscan, Scanner 3D, Laser-based equipment, Barredores (escáneres) láser, Sensores de barrido láser, Sensor láser, equipo de medición de láser.
- Definición: “*Es un dispositivo, por lo general montado sobre un trípode o plataforma estable que explora, por medio de un haz de láser (radiación electromagnética monocromática, coherente y colimada), los elementos del espacio circundante en forma tal,*

¹⁸ (Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J. (2007, p. 24): “*permite la obtención de un modelo idéntico al original a partir de un par fotográfico. El poder trabajar con la visión estereoscópica posibilita que se pueda observar dicho modelo y medir de una forma exacta las líneas, superficies y volúmenes del elemento a levantar*”



que a cada punto del objeto explorado, se le asigna las coordenadas reales que está ocupando en el sistema de representación espacial”.

- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A., Pucci, B., Nuñez, M.A. y Buill, F., 2009
 - Merlo, A., 2007
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
- Notas: Riveiro Rodríguez, B. et al. (2011, p. 4).

LiDAR / LiDAR / LiDAR.

- Sinónimos:
- Definición: Acrónimo de Light Detection And Ranging. Los sistemas basados en la medida de distancias son en general llamados como LIDAR, sin embargo, en el área de topografía el acrónimo es usado frecuentemente para indicar la categoría específica de escáner láser aerotransportado.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
- Notas: Definición inspirada en Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 79): “(*Light Detection And Ranging*): *Systems based on the measurement of distance are in general indicated as LiDAR (Light Detection And Ranging), even if in the topographic area this acronym is often used for indicating the specific category of airborne laser scanner.*” Otra definición similar se encuentra en Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R. (2008, p. 16) “*Láser escáner que opera sobre una plataforma aerotransportada*”. Otra definición



diferente se encuentra en Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 98) (Light Detection And Ranging): “*Sensori a tempo di volo che possono essere impiegati su piattaforme in movimento (aereo, elicottero, treno, auto) o in modalità statica (rilievo classico terrestre)*” (Sensores a tiempo de vuelo que pueden ser empleados sobre plataformas en movimiento (avión, helicóptero, auto) o en modalidad estática (levantamiento clásico terrestre). Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 97) lo describen como: “*I sistemi che si basano sul principio della misura di distanza, sono in genere indicate come Laser Radar o LIDAR*” (Los sistemas que se basan sobre el principio de medida de distancia son generalmente nominados como Láser Radar o LIDAR).

RBM (Range-Based Modelling) / RBM / RBM.

- Sinónimos: Escáner Láser 3D, Láser escáner, 3D laser scanner, Laser Scanning, Laser scan, Scanner laser, Laserscan, Scanner 3D, Laser-based equipment, Barredores (escáneres) láser, Sensores de barrido láser, Sensor láser, Fotogrametría de escáner láser.
- Definición: Es un método que se basa en “*un instrumento que adquiere mediante rayos láser, en forma digital, la tendencia de las superficies externas de un objeto, sobre las cuales no viene hecha ninguna presunción a priori.*”
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Elementos barridos (Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.) Laser Range Camera (LRC) (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Barridos escáner láser (Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007), Scansione 3D (Bianchini, C., 2007), Escaneado (Fantini, F., 2012) (Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007) (Lerma, J.L., et al, 2011), Scansione 3D (Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012). Registro fotogramétrico digital (Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010)
- Referencias:
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Merlo, A., 2007
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
- Notas: Término inspirado en la descripción de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 78): “*l’acquisizione in forma digitale dell’andamento nello spazio delle superfici esterne*



di un oggetto, sulle quali non viene fatta nessuna assunzione a priori” Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 129) lo definen como: “está compuesto por un sistema que genera un haz láser (luz monocromática, coherente, intensa y sin dispersión) y un sistema de barrido, horizontal y vertical, de modo que efectuando una serie de perfiles se consigue cubrir toda la superficie a levantar, en forma de rejilla de paso impuesto por el operador. No necesita, por tanto, contacto directo con el modelo a levantar”.

Sensor activo / Sensori attivi / Active sensor.

- Sinónimos: Sensores 3D Activos, Active 3D sensor, Sensori 3D attivi, Active range sensing, Range image¹⁹, Range camera²⁰, 3D active methods, Range device, Sensori di distanza.
- Definición: Sensores que “emiten una luz desde el propio instrumento; esta luz tiene una estructura definida y conocida por el sensor que debe captarla (Guidi, 2010, p. 12)”
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Rilievo con sensori attivi²¹ (Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010).
- Referencias:
 - Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L. et al, 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Término definido por Rodríguez Navarro, P. (2012, p. 103).

Nube de puntos / Nuvola di punti / point clouds.

- Sinónimos: Nube de puntos 3D, 3D point clouds.
- Definición: Conjunto de coordenadas 3D que reflejan la superficie externa de un objeto y vienen de la captura con escáner láser 3D o desde la correspondencia entre las imágenes de éste utilizando siempre ecuaciones de colinealidad y los parámetros internos y externos obtenidos precedentemente.

¹⁹ Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 74): “The output attainable from such a device can be seen as an image having in each pixel the spatial coordinates (x, y, z) expressed in millimetres, optionally enriched with colour information (R, G, B) or by the laser reflectance (Y). This set of 3D data, called “range image”, is generally a 2.5D entity (i.e. at each couple of x,y values, only one z is defined)”

²⁰ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 95) “Gli strumenti attivi, normalmente impiegati per rilevare oggetti e produrre modelli 3D, sono generalmente detti range camera o, per quelli che utilizzano luce laser, laser scanner 3D” (Los instrumentos activos, normalmente empleados para levantar objetos y producir modelos 3D, son generalmente llamados “range camera” o, para aquellos que utilizan luz láser, “laser scanner 3D”). La misma definición se encuentra en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 78)

²¹ Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 164): “strumenti attivi rilevano distanze e forniscono direttamente misure tridimensionali dell’oggetto rilevato” (Instrumentos activos levantan distancias y proporcionan directamente medidas tridimensionales del objeto de interés) (p. 167): “I sensori attivi (...) rilevano la luce emessa dallo strumento stesso e riflessa dall’elemento oggetto di analisi” (Los sensores activos detectan la luz emitida por el instrumento mismo y reflejada desde el elemento objeto de análisis)



- **Comentarios:** Algunos conceptos relacionados con este término son: Nube de puntos de color (Marambio, A., et al, 2009), Nube di punti non strutturata²² (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Nube di punti strutturata²³ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Nube ligera (Cueli Lopez, J., 2010). Merlo llama al modelo de nube de puntos: Modelo discreto (Merlo, A., 2007).
- **Referencias:**
 - Alsadik, B., et al, 2013
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Bianchini, C., 2007
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Cueli López, J., 2010
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Marambio, A., et al, 2009
 - Merlo, A., 2007
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003.
 - Wenzel, K., et al, 2013
- **Notas:** Definición de la autora incluyendo una parte de la interpretación de la descripción hecha por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., (2010, p. 70) “*coordinate 3D che vengono dalla corrispondenza tra le immagini utilizzando sempre le equazioni di collinearità e i parametri interni ed esterni ottenuti precedentemente*”. Otra definición se encuentra en Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 100): “*per sistemi a tempo di volo, un insieme di punti in 3D.*” (por sistemas a tiempo de vuelo, un conjunto de puntos en 3D).

²² Definida por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 207) como “(unstructured point cloud): Una nube non strutturata è costituita da punti nello spazio che non risultano organizzati”. (Nube de puntos no estructurada: Una nube no estructurada está constituida por puntos en el espacio que no resultan organizados)

²³ Definida por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 207) como “(structured point cloud): nube di punti strutturata si compone di una serie di coordinate 3D allocate logicamente su una griglia bidimensionale e può essere a tutti gli effetti vista come una immagine 3D, dove a posto del colore troviamo una tripletta di coordinate spaziali.” (Nube de puntos estructurada: una nube de puntos estructurada se compone de una serie de coordenadas 3D situadas lógicamente sobre una malla bidimensional y puede ser en todos los efectos vista como una imagen 3D, donde en lugar del color se encuentra un triplete de coordenadas espaciales)



Diferencia de fase / *Variazione di fase / Phase-shift distance.*

- Sinónimos: CW, Scanner phase-based
- Definición: Se llama escáner de diferencia de fase cuando la distancia se calcula con una luz láser cuya intensidad es modulada sinusoidalmente a una frecuencia conocida, generando una onda continua (CW) de energía de la luz dirigida hacia el objetivo. La retrodispersión sobre la superficie de destino devuelve una onda de luz con retraso respecto a la sinusoidal transmitida por él, y por lo tanto caracterizado por una diferencia de fase con ella.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007.
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.
 - Fantini, F., 2010
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D., 2013
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
- Notas: Interpretación de la definición realizada por Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 80) “(phase shift): *In this case distance is estimated with a laser light whose intensity is sinusoidally modulated at a known frequency, generating a Continuous Wave (CW) of light energy directed toward the target. The backscattering on the target surface returns a sinusoidal light wave delayed respect to the transmitted one, and therefore characterized by a phase difference with it.*” Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, (2007, p. 130) lo describen como: “*Mediante la diferencia de fase entre la onda emitida por el sensor y la recibida después de que ésta haya sido reflejada por le objeto a medir. A ésta medida se le añade el número completo de longitudes de onda existentes entre el instrumento y la superficie*”.

Tiempo de vuelo / *Tempo di volo / Time Of Flight.*

- Sinónimos: Medida de distancia, Medición del tiempo de vuelo (TOF), TOF, Medición de distancia, Medición basados en el tiempo.
- Definición: “*Consiste en medir la distancia a partir del tiempo que tarda un fotodiodo en emitir y detectar una luz láser, de forma similar al proceso que utilizan los distanciómetros electrónicos*”.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Bianchini, C., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010



Lerma, J.L., et al, 2010

Lerma, J.L., et al, 2011

Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011

Rodríguez Navarro, P., 2012

- Notas: Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 130). Otra definición realizada por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 97) sería: “*il tempo che l’impulso luminoso impiega per andare e tornare dal bersaglio*” (el tiempo que el impulso luminoso emplea en ir y venir del blanco).

Triangulación / triangolazioni / Triangulation.

- Sinónimos: Triangulation devices, Triangulación óptica.
- Definición: Tipología de instrumentos basada en el individual punto láser con un sensor lineal o bidimensional que mide los ángulos generados por el rayo. Utiliza los sistemas de áreas de luz láser (hoja de luz) o escáner de diapositivas con sensores bidimensionales que registran los ángulos de haz de luz.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Tecnología láser stripe (Rodríguez Navarro, P., 2012)
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Interpretación de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 103): “*tipologia di strumenti basata sul singolo spot laser con un sensore lineare o bi-dimensionale che misura gli angoli generati dal raggio*” “*basato sulle aree di luce laser (sheet light) o scanner a slitta con sensori bidimensionali che registrano gli angoli del fascio di luce*” Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 130) lo definen como: “*se basa en el cálculo de las coordenadas espaciales a partir de la intersección directa, similar al caso estereofotogramétrico, con la diferencia de que en un extremo del sistema se sitúa el diodo emisor y en otro extremo se sitúa el diodo receptor por lo que necesita solamente una única cámara*”

Alineación / Allineamento / Alignment.

- Sinónimos: Registro, Registration, Registrazione, empalme (Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, JL., 2010)
- Definición: El objetivo de la fase de registro o alineación consiste en buscar la justa relación espacial entre una serie de nube de puntos relativas a un objeto captado desde varios puntos de vista con el fin de representarlo sobre la base de una vista tomada como referencia.



Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Point cloud alignment (Guidi, G. y Remondino, F. 2012), Scansioni allineate²⁴ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Point constraint (Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010)

• Referencias:

- Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
- Arbacea, L., et al, 2013
- Bianchini, C., 2007
- Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
- Corsini, M., et al, 2013
- Dore, C. y Murphy, M., 2012
- Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
- Lerma, J.L., et al, 2010
- Marambio, A., et al, 2009
- Rodríguez Navarro, P., 2012

- Notas: Interpretación de la descripción de Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 100) *“L’obiettivo della fase di registrazione consiste, quindi, nel cercare la giusta relazione spaziale fra una serie di nuvole di punti relative ad un oggetto ripreso da vari punti di vista al fine di rappresentarlo sulla base di una vista presa come riferimento.”* (pp. 100 *“allineamento preliminare delle scansioni”*) (Alineación preliminar de los escaneados). Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 211) la definen como: *“una delle range map viene utilizzata come riferimento iniziale. Se ne sceglie una adiacente e si avvia una procedura semiatomica che consente di trovare il posizionamento ottimale della seconda ripresa rispetto alla prima. Una volta che le prime due sono allineate le si considerano come un blocco unico, e si passa all’allineamento di una successiva ripresa adiacente, fino ad arrivare all’allineamento dei tutti i pezzi”* (Una de las “range map” (capturas) se utiliza como referencia inicial. Se elige una adyacente y se inicia un proceso semiautomático que consiste en encontrar la posición óptima de la segunda captura respecto a la primera. Una vez que las primeras dos están alineadas, se consideran como un bloque único, y se pasa a la alineación de la sucesiva captura adyacente, hasta llegar a la alineación de todas las nubes de puntos o mesh).

iv. **Campo 4.- TOPOGRAFÍA**
CONCEPTOS

Topografía / Topografía / Topography

- Sinónimos:
- Definición: *“Ciencia que estudia la representación gráfica en un plano, a una escala determinada, de una porción limitada de la superficie terrestre, con todos sus detalles naturales o artificiales, y el conjunto de métodos, procedimientos e instrumentos que permiten realizar mediciones para materializar dicha representación.”*
- Comentarios:
- Referencias:

²⁴ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 104) *“messe nello stesso sistema di riferimento”* (medidos en el mismo sistema de referencia)



- Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
Bianchini, C., 2007
Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
Docci, M., Maestri, D. 1984
Dore, C. y Murphy, M., 2012
Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D. 2013
Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
Rodríguez Navarro, P., 2012

- Notas: Definición sacada de los apuntes de Topografía de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPV). Tema 1, p. 5.

SIG / GIS / GIS.

- Sinónimos: Geographic Information System, Sistemi Informativi Geografici.
- Definición: Acrónimo de Sistema de Información Geográfica (SIG), se utiliza para almacenar, visualizar y analizar los datos geográficos. Las características espaciales se almacenan como geometría y se referencian con proyecciones de mapas y coordenadas. Los atributos almacenados en las tablas son entonces asociados con las características espaciales para permitir el análisis espacial de los datos.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Sistemas de Información Arquitectónica (SIA)²⁵ (Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007).
- Referencias:
 - Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J., 2007
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012)
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007
- Notas: Interpretación de la definición hecha por Dore, C. y Murphy, M., 2012 (pp. 370): “A *Geographic Information System (GIS) is used for storing, visualizing and analyzing geographic data. Spatial features are stored as geometry and referenced with map projections and coordinates. Attributes stored in tables are then associated with spatial features to allow for spatial analysis of data*” Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J. (2007, p. 21), sin embargo, lo definen como: “*un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura almacenamiento, manipulación, análisis, modelado y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión*”.

MDT / MDT / DTM.

- Sinónimos: Modelo Digital del Terreno, Modelli Digitali del Terreno, Digital Terrain Model.

²⁵ Buill, F., Nuñez, M.A. y Rodríguez, J.J. (2007, p. 21): “*puede gestionar la información arquitectónica de una ciudad en relación con la trama urbana en la que se encuentra, o bien con la manzana o el edificio objeto de estudio, vinculando información gráfica y alfanumérica mucho más detallada*”



- **Definición:** Acrónimo de Modelo Digital del Terreno. “*Es un modelo matemático, generado por ordenador a partir de coordenadas tridimensionales de los puntos que definen la superficie del mismo, obtenidas mediante un levantamiento taquimétrico o por fotogrametría*”
- **Comentarios:** Un concepto relacionado con este término es: Ground terrain Model (Dore, C. y Murphy, M., 2012).
- **Referencias:**
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007
- **Notas:** Definición sacada de los apuntes de Topografía de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPV).

Georreferenciación / Georeferenziazione / Geo-referencing.

- **Sinónimos:**
- **Definición:** “*Es un neologismo que refiere al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas y datum determinado.*”
- **Comentarios:** Algunos conceptos relacionados con este término son: Georeferenced point cloud/mesh (Koska, B. y Křemen, T., 2013), Georeferenced position (Dore, C. y Murphy, M., 2012), GPS (Sistema de Posicionamiento Global) (Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007).
- **Referencias:**
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Verdiani, G., 2003
- **Notas:** Definición sacada de Wikipedia (última visita: 23/11/2013).

Estación total / Stazione totale / Total station

- **Sinónimos:**
- **Definición:** “*Es un instrumento topográfico universal, formado por un teodolito, un IEMD y un microprocesador en una sola unidad. Estos aparatos, pueden medir automáticamente ángulos horizontales y verticales, así como distancias inclinadas desde una sola estación. Con base a estos datos, ellos pueden calcular instantáneamente las componentes horizontales y verticales de las distancias, las elevaciones y coordenadas.*”
- **Comentarios:** Un concepto relacionado con este término es: Teodolito (Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007).
- **Referencias:**
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
 - Verdiani, G., 2003



- Notas: Sacada de los Apuntes de Topografía de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

v. **Campo 5.- IMAGEN** CONCEPTOS

Imagen Digital / *Immagine digitale* / *Digital Image*.

- Sinónimos:

- Definición: “*La imagen digital es la representación bidimensional de una imagen empleando bits, unidad mínima de información compuesta por dígitos binarios (1 y 0), que se emplea a instancias de la informática y cualquier dispositivo de tipo digital*”

Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Aerial images (Lerma, J.L. et al, 2010), Aerial imagery (Wenzel, K. et al, 2013), Documentación digital (Marambio, A. et al, 2009), Foto digitali (Bianchini, C., 2007).

- Referencias:

Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007

Lerma, J.L. et al, 2011

Marambio, A. et al, 2009

Verdiani, G., 2003

- Notas: Definición sacada de “<http://www.definicionabc.com/tecnologia/imagen-digital.php>” (última visita: 10/10/2013).

Color / *Colore* / *color*.

- Sinónimos: Informazione cromática (RGB), Información de color.

- Definición: Es generalmente definido como la sensación visiva que se tiene cuando las ondas electromagnéticas de varia longitud reflejadas desde los cuerpos golpean la retina del ojo humano. En lenguaje común, es también, la apariencia cromática que presentan los objetos examinados a su luz natural.

- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Códigos RGB de color del punto (Cueli López, J., 2010), Color per vertex²⁶ (Apollonio, F.I., Baldissini, S., Manferdini, A.M., Remondino, F., 2010).

- Referencias:

Apollonio, F.I., Baldissini, S., Manferdini, A.M., Remondino, F., 2010

Arbacea, L., et al, 2013

Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010

Corsini, M., et al, 2013

Cueli López, J., 2010

Fantini, F., 2012.

Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012

Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010

Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010

²⁶ Apollonio, F.I., Baldissini, S., Manferdini, A.M., Remondino, F. (2010, pp. 284) “*in cui ogni vertice è assegnato un valore di colore RGB*” Apollonio, F.I., Baldissini, S., Manferdini, A.M., Remondino, F. (2010, pp. 284)



Lerma, J. L. et al, 2011

Rodríguez Navarro, P., 2012

Verdiani, G., 2003

- Notas: Interpretación de la definición realizada por Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F. (2010, p. 201): “è generalmente definito come la sensazione visiva che si ha quando le onde elettromagnetiche di varia lunghezza riflesse dai corpi colpiscono la retina dell’occhio umano” Remondino, F. y El-Hakim, S. (2007): “è (in linguaggio comune) anche l’apparenza cromatica che presentano gli oggetti esaminati alla loro luce naturale”

Mapa de color / Mappatura del colore / Color mapped.

- Sinónimos:
- Definición: El mapa de color es una imagen bidimensional que añade detalles con respecto al color y es reproducida sobre una o más caras de un modelo poligonal tridimensional.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Fantini, F., 2012.
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Rodríguez Navarro, P., 2012

Notas: Definición inspirada a partir de la definición de “mapeado del modelo”. Debe aclararse que existen dos tipos de mapas de color: de color difuso y de color aparente. El mapa de color aparente es aquel que incluye las condiciones precisas de luminosidad, iluminación, etc. presentes en el momento de la captura de las imágenes, mientras el color difuso es aquel que presenta un efecto compresivo compuesto por diferentes canales como el de rugosidad, especularidad, etc. (en general modificados cuando se realiza el render).

Píxel / Pixel / Pixel.

- Sinónimos: Picture element.
- Definición: Un píxel es la porción homogénea más pequeña de la imagen, en forma de rectángulo y estructurada en una matriz, en la cual se subdivide una imagen digital.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Pixel size (Wenzel, K. Et al, 2013), Textel²⁷ (Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010) (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010).
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Cueli López, J., 2010
 - Fantini, F., 2010.
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Marangoni, R. y Geddo, M., 1996

²⁷ Se define en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 302) como “i pixel della texture” (los píxeles de la textura). También es definido por Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F. (2010, p.220-221) como “un elemento unitario di texture applicato al polígono” (un elemento unitario de textura aplicado al polígono).



Verdiani, G., 2003.

- Notas: Según la Real Academia Española, se define como “*Superficie homogénea más pequeña de las que componen una imagen, que se define por su brillo y color*” Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J. (2007, p. 27) lo definen como: “*pequeñas unidades de información radiométrica que elimina la parte mecánica de medición y convierte en digitales los sistemas fotogramétricos*” Cannarozzo, Cucchiarini y Meschieri, 2012. Volumen 3. P.5 “*immagini non fotografiche, ma numeriche, cioè immagini digitali, strutturate in una matrice di piccoli elementi detti pixel.*” (imágenes no fotográficas, sino numéricas, es decir, imágenes digitales, estructuradas en una matriz de pequeños elementos llamados pixel). Marangoni, R. y Geddo, M. (1996, p. 6): “*Il campionamento spaziale consiste nella suddivisione della superficie dell’immagine in un determinato numero di rettangoli chiamati pixel (dall’inglese picture element) (...) in cui essa viene suddivisa ne determina la risoluzione spaziale*”

Mapeado / Mappatura / Mapped.

- Sinónimos: Texturización, Texturing.
- Definición: El mapeado del modelo en “*computer graphyc*” es un método para añadir detalles, una imagen de superficie o un color a imágenes generadas por el ordenador o a un modelo 3D. Este mapeado genera una textura. La textura es una imagen bidimensional que es reproducida sobre una o más caras de un modelo poligonal tridimensional.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Baking²⁸ (Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012).
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2010
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D., 2013
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2011
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Interpretación del término definido por Thomas, D., Orland, K., Steinberg, S. (2007, p.62): “*Il texture mapping in computer grafica è un metodo per aggiungere dettagli, un’immagine di superficie o un colore ad immagini generate al computer o ad un modello 3D. Una texture è un’immagine bidimensionale (sprite) che viene riprodotta su una o più*

²⁸ Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S. (2012, 33): “*(oppure render to texture, bake from object to texture, etc.) calcolo che permette di codificare esattamente, sotto forma di immagine, i valori di scostamento esistenti fra il modello subD e il modello ad alto dettaglio geometrico da laser scanner o high-poly.*” (Cálculo que permite codificar exactamente, mediante forma de imagen, los valores de desviación existentes entre el modelo de subdivisión y el modelo de alto nivel de detalle geométrico del escáner láser o “high-poly”)



facce di un modello poligonale tridimensionale". Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 94) lo llaman "texturing" y lo definen como "is achieved mapping a colour images onto the 3D geometric data" (Mapeo de imágenes en color de los datos geométricos 3D).

Bump mapping / *Mappe bump* / *Bump mapping*.

- Sinónimos: Mappa di rugosità.
- Definición: Es una técnica de simulaciones de irregularidad superficial que permite mostrar sobre la superficie del material una serie de golpes de frecuencia y dimensiones controlables mediante los parámetros de anchura y altura.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Battini, C., Fantini, F., 2007
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
- Notas: Interpretación de la definición de Manferdini, A.M. y Remondino, F., (2010, p. 178) "è una tecnica di simulazione di irregolarità superficiali che permette di mostrare sulla superficie del materiale una serie di bozzi di frequenza e dimensioni controllabili tramite i parametri di larghezza e altezza". Otra definición se encuentra en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 287): "Sono mappe di differenza ottenute calcolando la distanza di una superficie dall'altra" (Son mapas de diferencia obtenidos calculando la distancia de una superficie a otra".

Normal mapping / *Mappe delle normali* / *Normal mapping*.

- Sinónimos:
- Definición: Mientras el "bump mapping" obtenido con mapas de altura utiliza imágenes en tonos de gris para simular irregularidad y detalles de superficie sin modificar la geometría, la "normal mapping" utiliza imágenes multicanal (canales RGB).
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Surface normal (Wenzel, K. et al, 2013).
- Referencias:
 - Battini, C., Fantini, F., 2007
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Remondino, F. et al, 2012
- Notas: Interpretación de la definición de Manferdini, A.M. y Remondino, F., (2010, p. 190) "mentre il bump mapping ottenuto con height maps utilizza immagini in toni di grigio per simulare irregolarità e dettagli di superficie senza modificare la geometria, il normal mapping utilizza immagini multicanale (canali RGB)". Se encuentra otra descripción en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p 287): "sono mappe di differenza ottenute calcolando la variazione della normale del modello acquisito rispetto a quella del modello da texturizzare" (son mapas de diferencia obtenidas calculando la variación de las normales del modelo adquirido respecto a aquellas del modelo a texturizar).



Displacement mapping / Mappe di scostamento / Displaced mapping.

- Sinónimos: Mapa de desplazamiento, Displacement map.
- Definición: Es una técnica de “rendering” digital que utiliza mapas de altura (imágenes ráster en tonos de gris), o mapas de las normales y texturas procesadas para obtener efectos de relieve y de profundidad donde el modelo geométrico inicial no presenta el mismo grado de precisión.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: *Mappe di differenza*²⁹ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), *Displaced subdivision surface* (Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012) (Fantini, F., 2012), *Superfici di suddivisione* (Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012).
- Referencias:
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Remondino, F. et al, 2012
- Notas: Interpretación de la definición dada por Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 195) “è una tecnica di rendering digitale che utilizza height map (immagine raster in toni di grigio), oppure mappe delle normali e texture procedurali per ottenere effetti di rilievi e di profondità dove il modello geometrico iniziale non presenta lo stesso grado di accuratezza.” (Szymay-kalos e Umenhoffer, 2008).

Visualización / Visualizzazione / Visualization.

- Sinónimos:
- Definición: “Es la generación de una imagen mental o una imagen real de algo abstracto o invisible”
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: *Rendering*³⁰ (Guidi, G. y Remondino, F., 2012) (Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010), *Shared*³¹ (Guidi, G. y

²⁹ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 287): “Quando l’accuratezza è importante, si può fare uso di tecniche di rilievo tridimensionale per catturare i dettagli superficiali, che possono poi essere simulati sulla mesh a più bassa definizione tramite l’uso di mappe di differenza” (Cuando la precisión es importante, se puede hacer un levantamiento tridimensional para capturar los detalles superficiales, que pueden después ser simulados sobre la malla a más baja definición mediante el uso de mapas de diferencia)

³⁰ Tipo de visualización

³¹ Tipo de visualización. Es definida por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 280): “Per visualizzare un modello tridimensionale, questo deve essere associato ad uno shader, ovvero un insieme di istruzioni che determina come visualizzarne la geometria. Lo shader in sostanza definisce quale debba essere l’aspetto del materiale di un modello digitale tridimensionale, si che si tratti di un modello realizzato al CAD, che di un modello poligonale frutto di una acquisizione tridimensionale” (Para visualizar un modelo tridimensional, este debe ser asociado a un “shader”, o un conjunto de instrucciones que determina como visualizar la geometría. El “shader” en sustancia define cual debe ser el aspecto material de un modelo digital tridimensional, sea un modelo realizado en CAD, sea un modelo poligonal fruto de una adquisición tridimensional).



Remondino, F., 2012) (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Wireframe³² (Guidi, G. y Remondino, F., 2012), Photo-realistic perspective (Lerma, J.L. et al, 2010).

• Referencias:

- Bianchini, C., 2007
- Dore, C. y Murphy, M., 2012
- Guidi, G. y Remondino, F., 2012
- Marambio, A. et al, 2009
- Migliari, R., 2012
- Verdiani, G., 2003

- Notas: Definición de Wikipedia (última visita 22/11/2013). Otras definiciones se encuentran en la RAE. “Acción y efecto de representar mediante imágenes ópticas fenómenos de otro carácter / Hacer visible una imagen en un monitor”.

Renderización / *Rendering* / *Rendering*.

- Sinónimos: Imágenes de renderizado.
- Definición: Restitución visual del modelo.
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Rendering fotorealístico (Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012).
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
- Notas: Definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 279): “*Restituzione visiva del modello*”.

vi. **Campo 6.- EDICIÓN 3D**
CONCEPTOS

Edición 3D / *Edizione 3D* / *3D Editing*.

- Sinónimos: Mesh editing
- Definición: Serie de fases que llevan consigo la eliminación de incoherencias y al mejorado de la calidad de la superficie poligonal, buscando mantener dentro de lo posible la geometría y la forma original.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Corrección de bordes (Marambio, A., et al, 2009), Generation of cut section (Dore, C. y Murphy, M., 2012), Spigoli degeneri³³ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Spigoli inconsistenti³⁴

³² Tipo de visualización

³³ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.105): “*uno spigolo è condiviso da più di due triangoli*” (un borde que está dividido en más de dos triángulos)

³⁴ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.105): “*uno spigolo è condiviso da due triangoli con direzione della normale oposta*” (un borde que está dividido en dos triángulos con direcciones normales opuestas)



(Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Triangoli degeneri³⁵ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Triangoli duplicati³⁶ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Crossing face³⁷ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Degenerate edges³⁸ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Degenerate triangles³⁹ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Duplicate triangle⁴⁰ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Inconsistent edges⁴¹ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Non-mainfold face⁴² (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Redundant face⁴³ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Unstable face⁴⁴ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010)

• Referencias:

Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010

Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012

Guidi, G. y Remondino, F. 2012

- Notas: Interpretación de la definición realizada por Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 105): “*serie di fasi che portano all’eliminazione di artefatti e al miglioramento della qualità della superficie poligonale, cercando di preservare il più possibile la geometria e la forma originale*”. Otra definición se encuentra en Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 93)

³⁵ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.105): “*due o tre vertici di un triangolo sono uguali e il triangolo diventa quindi uno spigolo o un vertice*” (dos o tres vértices de un triángulo son iguales y el triángulo se convierte en un borde o vértice)

³⁶ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.105): “*due triangoli della stessa mesh hanno gli stessi vertici*” (dos triángulos de la misma malla tienen los mismos vértices)

³⁷ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 215): “*Sono quelle facce che si intersecano con la mesh senza connettersi a nessun nodo di essa (dentro del software Rapidform)*” (son aquellas caras que se intersectan con la malla sin conectarse a ningún vértice de ella)

³⁸ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 214): “*È un bordo condiviso da più di due triangoli (dentro del software Polyworks)*” (es un borde dividido en más de dos triángulos)

³⁹ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 214): “*Si verifica quando due o tre vertici di una faccetta triangolare della mesh sono uguali: in tal caso il triangolo degenera rispettivamente in un punto o in un segmento (dentro del software Polyworks)*” (Se verifica cuando dos o tres vértices de una cara poligonal de la malla son iguales: en tal caso el triángulo degenera respectivamente en un punto o en un segmento)

⁴⁰ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 214): “*Questo errore si verifica quando due triangoli nella stessa mesh hanno identici vertici (dentro del software Polyworks)*” (Este error se verifica cuando dos triángulos en la misma malla tienen idénticos vértices)

⁴¹ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 214): “*Un bordo inconsistente è condiviso da due triangoli adiacenti che hanno orientazione opposta (normali invertite) (dentro del software Polyworks)*” (Un borde inconsistente está compartido por dos triángulos adyacentes que tienen una orientación opuesta (normales invertidas))

⁴² Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 214): “*Si ha questo errore quando più di due facce condividono uno stesso bordo (equivale a Degenerate edges) (dentro del software Rapidform)*” (Se tiene este error cuando más de dos caras comparten un mismo borde (equivalente a Degenerate edges))

⁴³ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 214): “*Sono facce anormali che si possono trovare in una mesh quando un vertice insistono un numero diverso di vertici e di bordi (dentro del software Rapidform)*” (Son caras anormales que se pueden encontrar en una malla cuando un vértice tiene un número diverso de vértices y de bordes)

⁴⁴ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 215): “*Sono quelle facce adiacenti caratterizzate da normali invertite (equivale a Inconsistent edges) (dentro del software Rapidform)*” (Son aquellas caras adyacentes caracterizadas por tener normales invertidas (equivale a Inconsistent edges))



“allows to correct all possible topological incoherence generated after the polygonal surface generation”. (Permite corregir toda posible incoherencia topológica generada después de la generación de la malla poligonal)

Modelado / Modellismo / Modelling.

- Sinónimos:
- Definición: Consiste en la creación o modificación de modelos en tres dimensiones.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Alsadik, B. et al, 2013
 - Apollonio, F.I., et al, 2010
 - Bertocci, S., Bini, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Anghelieddu, D., 2013
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Marambio, A., Pucci, B., Nuñez, M.A. y Buill, F., 2009
 - Remondino, F. et al, 2012
- Notas: Definición de la autora.

Modelo Digital de Superficies (MDS) / Modelli digitali di superfici (MDS) / Digital Surface Model (DSM).

- Sinónimos: Modelo de superficies, Modelo de polígonos, Modelo poligonal, Surface model, Modello poligonale, Modelo de mallas, Mesh model, 3D model triangles, Modello a superfici, Polygonal model.
- Definición: Conjunto extremadamente denso de puntos, unidos entre ellos mediante pequeñas caras planas.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., 2010
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Merlo, A., 2007
- Notas: Definición inspirada en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010) “*Insieme estremamente denso di punti, collegati tra loro da piccole faccete planari*”.



Modelo Digital / *Modelli digitali* / *Digital Model*.

- Sinónimos:
- Definición: “*Un modelo 3D que se pueda manipular, medir, utilizar para reelaboraciones físicas, visualizar estática o dinámicamente, con el auxilio de un ordenador, representado en BIT, puede ser definido como modelo tridimensional digital*”
- Comentarios:
- Referencias:
 - Arbacea, L., et al, 2013
 - Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Fantini, F., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Merlo, A., 2007
 - Migliari, R., 2012
 - Verdiani, G., 2003.
- Notas: La definición viene de la interpretación de la encontrada en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 324): “*Un modelo 3D che si possa manipolare, misurare, utilizzare per rielaborazioni fisiche, visualizzare staticamente o dinamicamente, con l’ausilio di un computer, in quanto rappresentato da BIT, può essere definito senza tema di smentita come modello tridimensionale digitale*”. Siempre en la misma página encontramos otra definición: “*si intende in generale un modello tridimensionale che, come dice il nome è rappresentato da digit, ovvero da numeri, che se rappresentati in forma binaria all’interno di un computer diventano Binary digiT, ovvero BIT.*” (Se entiende en general un modelo tridimensional que, como dice el nombre está representado mediante “digit”, o de números, que representados en forma binaria dentro de un ordenador se convierten en Binarios digiT, o BIT)

Modelo matemático / *Modello matematico* / *Mathematical model*.

- Sinónimos: Rappresentazione matemática.
- Definición: Es aquel modelo fruto de una modelización manual, en la cual el operador dibuja, con ayuda de los oportunos software, sólidos, elementos para componer, o curvas más articuladas de las cuales generar complejas superficies matemáticas.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Modello geometrico (Bertocci, S., Bini, M., 2012) (Bianchini, C., 2007), Modello numerico (Bertocci, S., Bini, M., 2012) (Fantini, F., 2010).
- Referencias:
 - Bertocci, S., Bini, M., 2012
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Migliari, R., 2012
- Notas: Interpretación de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 325) “*Quelli frutto di una modellazione manuale, in cui l’operatore disegna, con l’ausilio di opportuni software, solidi elementi da comporre, oppure curve più articolate da cui generare complesse superfici matematiche*”



Modelización / *Modellazione* / *modelling*.

- Sinónimos:
- Definición: Parte de una formulación conceptual del objeto, que viene progresivamente definida en sus detalles con las técnicas de representación propias del dibujo. Solo en un segundo momento este sistema abstracto se transforma en objeto físico.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Automated 3D modelling procedures (Guidi, G. y Remondino, F. 2012), Digital photo modelling (Dore, C. y Murphy, M., 2012), Modelados fotorrealísticos 3D (Lerma, J.L., et al., 2011).
- Referencias:
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Lerma, J.L., et al., 2011
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Merlo, A., 2007
 - Migliari, R., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
- Notas: Interpretación de la descripción dada por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., (2010, p. 195): *“parte da una formulazione concettuale dell’oggetto, che viene progressivamente definita nei suoi dettagli con le tecniche di rappresentazione proprie del disegno. Solo in un secondo momento questo sistema astratto viene trasformato in oggetto fisico”*.

Reconstrucción virtual / *Ricostruzione virtuale* / *virtual reconstruction*.

- Sinónimos: Reconstrucciones 3D, Digital reconstruction, Restituzione virtuale.
- Definición: Reconstrucción de escenarios y objetos en tres dimensiones en el ordenador. *“Modelos que representan sea la síntesis interpretativa de las investigaciones históricas que un terreno de confrontación divisible entre diversos estudios en merito a las diversas soluciones reconstructivas adoptadas y como instrumento útil para la simulación de todos los aspectos de utilidad de los diversos ambientes, hasta el uso de estos modelos como instrumento de conocimiento y valorización para el público”*
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Image based surface reconstruction (Wenzel, K. et al, 2013), Sparse reconstruction from images (Koska, B. y Křemen, T., 2013), Photogrammetric surface reconstruction (Wenzel, K. et al, 2013) Reconstruct the 3D shapes (Guidi, G. y Remondino, F. 2012).
- Referencias:
 - Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012
 - Bianchini, C., 2007
 - Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007
 - Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D., 2013
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L., et al., 2011
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010



- Merlo, A., 2007
Remondino, F. y El-Hakim, S., 2007
Riveiro Rodríguez, B. et al, 2011
Verdiani, G., 2003
Wenzel, K. et al, 2013

- Notas: Interpretación de la descripción de la reconstrucción virtual de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 335): “*Questi modelli infatti rappresentano sia la sintesi interpretativa delle ricerche storiche che un terreno di confronto condivisibile tra i diversi studiosi in merito alle diverse soluzioni ricostruttive adottate e come strumento utile per la simulazione di tutti gli aspetti di fruibilità dei diversi ambienti, fino all’uso di questi modelli come strumento di conoscenza e valorizzazione al pubblico*”.

Malla - Mesh / mesh / mesh.

- Sinónimos: Malla de polígonos, 3D triangular mesh, Maglia, Maglia di poligoni, Mesh surface, Modelo poligonal sin estructura (malla).
- Definición: Modelo poligonal resultante de la conversión de la nube de puntos. Restitución de la geometría compuesta por triángulos.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Bianchini, C., 2007
 - Cueli López, J., 2010
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, JL., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A., et al, 2009
 - Merlo, A., 2007
 - Rodríguez Navarro, P., 2012
 - Verdiani, G., 2003
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Definición inspirada en la descripción de Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 104-105). Además añade: “*modello poligonale prodotto attraverso la fusione delle differenti scansioni*” (modelo poligonal producido a través de la fusión de los diferentes escaneados). Manferdini, A.M. y Remondino, F. (2010, p. 175) la describen como “*superficie poligonale*” (superficie poligonal). La descripción de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 196) enuncia “*i punti vengono successivamente trasformate in un insieme di faccette poligonali interconnesse fra di loro, che approssimano l’andamento della superficie dell’oggetto secondo una geometria poligonale*” (Los puntos vienen sucesivamente transformados en un conjunto de caras poligonales interconectadas entre ellas, que aproximan el curso de la superficie del objeto según una geometría poligonal). Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R. (2008, p. 21) la describen como “*triangular la nube de puntos*”.



Triangulación / Triangolarizzazione / Meshing.

Sinónimos: Generación de superficies poligonales, Fase de triangulación, Polygonal model generation, Meshing of the 3D point cloud, Triangulation, Merge, TIN⁴⁵, Unión de los puntos de escaneo, Facetear.

- Definición: Una vez que se obtiene una nube de puntos mediante la concordancia de imágenes o un conjunto de nubes de puntos alineados adquiridos con un sensor activo, generalmente se produce un modelo poligonal ("malla").
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I., et al, 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Cueli López, J., 2010
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008
 - Marambio, A., et al, 2009
- Notas: Interpretación de la definición de Guidi, G. y Remondino, F. (2012, p. 91) "*Once a point cloud from image matching or a set of aligned point clouds acquired with an active sensor are obtained, a polygonal model ("mesh") is generally produced*" Otra definición se encuentra en Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L. (2007, p. 3): "*las nubes de puntos se convierten en mallas de triángulos o cuadriláteros y constituye la parte central del proceso de reconstrucción tridimensional de un objeto*". Apollonio, F.I., et al, (2010, p. 277) definen el proceso como " *fusione in un'unica mesh, consiste nella trasformazione delle nuvole di punti in precedenza allineate in un'unica superficie poligonale*". (Fusión en una única malla, consiste en la transformación de las nubes de puntos en precedencia alineados en una única superficie poligonal). Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 206) la describe como: "*Il passaggio dalla nube grezza di punti 3D prodotta dal sensore ad un reticolo di poligoni connessi tra loro, i cui vertici coincidono con i punti misurati (mesh), è quando viene indicato con el termine meshing*" (El paso de la nube inicial de puntos 3D, producida por el sensor, a un retículo de polígonos conectados entre ellos, cuyos vértices coinciden con los puntos medidos (mesh), es cuando viene indicado con el término "meshing")

Subdivisión / Subdivisione / Subdivision.

- Sinónimos:
- Definición: Corresponde al proceso inverso respecto a la "decimación" (reducción de polígonos), y por lo tanto, a la introducción de un número superior de polígonos.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010

⁴⁵ Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R. (2008, p. 26) "Crear una superficie en base a la triangulación de los puntos"



- Notas: Interpretación de la descripción encontrada en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 218): “*corrisponde al processo inverso rispetto alla decimazione (...) consiste nella introduzione di un numero superiore di poligoni*”

Decimación / Decimazione / Decimated.

- Sinónimos: Reducción del número de polígonos, Reducción del número de triángulos, Reduced model size, Point/triangles reduction.
- Definición: Reduce sensiblemente la complejidad del modelo eliminando vértices y manteniendo, sin embargo, bajo control las variaciones introducidas respecto a la precisión inicial. Este proceso describe una clase de algoritmos que transforman una malla poligonal base en otra con un número menor de caras, bordes y vértices.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Apollonio, F.I., et al, 2010
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Marambio, A., et al, 2009
- Notas: Interpretación de la definición realizada por Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 106) “*riduce sensibilmente la complessità del modello, eliminando vertici e mantenendo comunque sotto controllo le variazioni introdotte rispetto alla precisione iniziale*”. Añade más dos páginas después “*descrive una classe di algoritmi che trasforma una data mesh poligonale in un'altra con un numero minore di facce, spigoli e vertici*”. Otra descripción se encuentra en Apollonio, F.I., et al, (2010, p. 281): “*definizione dell'algoritmo più idoneo a semplificare la superficie e diminuire il rumore, pur mantenendo la complessità formale richiesta*” (Definición del algoritmo mejor para simplificar la superficie y disminuir el ruido, manteniendo la complejidad formal requerida). Otra descripción se encuentra en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 217): “*Il numero dei poligoni può essere ridotto intervenendo direttamente con algoritmi che decimano la mesh, riducendo sensibilmente la complessità del modello e mantenendo comunque sotto controllo le variazioni introdotte rispetto alla precisione iniziale (Soucy e Laurendeau, 1995)*” (El número de polígonos puede ser reducido interviniendo directamente como algoritmos que “deciman” la malla, reduciendo sensiblemente la complejidad del modelo e manteniendo, aún así, bajo control las variaciones introducidas respecto a la precisión inicial).

Oclusión / Lacune / occlusion.

- Sinónimos: Zone d'ombra, Zonas de sombra.
- Definición: “*Zonas de sombras sin información en la nube de puntos*”
- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Zonas ocultas (Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007)
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012



Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010

Lerma, J.L. et al, 2011.

Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008

- Notas: Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008, p. 19. Definición similar se encuentra en (Biosca Taronger, J.M., S. Navarro Tarín y J. L. Lerma García, 2007, p. 5): “*Aquellas zonas del modelo que no salen en una determinada imagen tomada del objeto reconstruido*”. En italiano, Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.105) las definen como: “*assenza di dati in zone d’ombra presenti sull’oggetto al momento dell’acquisizione (ovvero quelli parti di superficie non raggiungibili dallo strumento) o da problemi di acquisizione legati alla particolare caratteristica di riflessione del materiale o da una bassa densità della nuvola che non consente all’algoritmo di triangolazione di generare una mesh completa*” (ausencia de datos en zonas de sombra presentes sobre el objeto en el momento de la adquisición {o aquellas parte de superficie no alcanzables por el instrumento} o por problemas de adquisición unidos a las particulares características de reflexión del material o de una baja densidad de la nube que no consiente mediante el algoritmo de triangulación generar una malla completa). Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 215) las definen, sin embargo, como: “*Possono essere generate da zone d’ombra presenti sull’oggetto o da problemi d’acquisizione legati alla particolare caratteristica di riflessione del materiale.*” (Pueden ser generadas mediante zonas de sombra presentes en el objeto o por problemas de adquisición unidos a las características particulares de reflexión del material).

Relleno huecos / Chiusura di fori / Fill holes.

- Sinónimos: Reducción del número de zonas ocultas, Eliminación de las sombras, Rellenar los agujeros.
- Definición: Generación de una parte de la superficie poligonal ausente, debido a la presencia de sombras en el momento de adquisición, por problemas de adquisición unidos a las particulares características de reflexión del material o de una baja densidad de la nube que no consiente mediante el algoritmo de triangulación generar una malla completa, utilizando la información de los bordes que la circundan.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Lerma, J.L., et al., 2011
 - Marambio, A., et al, 2009
 - Verdiani, G., 2003
- Notas: Inspirada en las definiciones usadas en el término “oclusiones”.

Ruido / Rumore / Noise.

- Sinónimos: Puntos erróneos.
- Definición: Puntos erróneos que surgen en la adquisición de datos, debido a un problema con el material o por la geometría del objeto (ej. objetos curvos presentan problemas en las zonas tangentes), o en la fase de registro debido a una alineación incorrecta entre diferentes nubes de puntos.



- Comentarios: Un concepto relacionado con este término es: Superficie rumorosa⁴⁶ (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010)
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A.
 - Lerma, J. L. et al, 2011
 - Marambio, A. et al, 2009
 - Verdiani, G., 2003
 - Wenzel, K. et al, 2013
- Notas: Definición realizada por la autora.

Textura / Tessitura / Texture

- Sinónimos:
- Definición: Es típicamente una imagen digital que reproduce la variación cromática de una superficie.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Apparenza visiva⁴⁷ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Texturas del color (Rodríguez Navarro, P., 2012), Fast texture (Cueli López, J., 2010), Quality texture (Cueli López, J., 2010).
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010
 - Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007
 - Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J, 2007
 - Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M. A. y Marambio Castillo, A.
 - Cueli López, J., 2010
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Lerma, J. L. et al, 2011.

⁴⁶Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 213) la definen como “*Possono essere legate alla scelta di un strumento di acquisizione non coerente con l’oggetto da rilevare, alla non perfetta eliminazione delle incoerenze in fase di allineamento, oppure alla generazione di errori topologici e alla non corretta triangolarizzazione di alcune aree in fase di fusione*” (Pueden ser legadas a la elección de un instrumento de adquisición no coherente con el objeto a levantar, a la no perfecta eliminación de las incoherencias en la fase de alineación, o debido a la generación de errores topológicos y a la no correcta triangulación de algunas áreas en fase de fusión).

⁴⁷ Definida por Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 114) como “*aspetto qualitativo. Possibilità del modello 3D di rappresentare l’oggetto reale riproducendo, nella maniera più fedele possibile, anche il comportamento della superficie rispetto alla riflessione della luce, includendo le caratteristiche di colore e di finitura della superficie stessa*”. (Aspecto cualitativo. Posibilidad del modelo 3D de representar el objeto real reproduciendo, en la manera más fiel posible, también el comportamiento de la superficie con respecto a la reflexión de la luz, incluyendo las características de color y de acabado de la superficie misma) “*Proprietà definita come texture della superficie.*” (propiedad definida como la textura de la superficie)



- Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010
Marambio, A. et al, 2009
Merlo, A., 2007
Remondino, F. y El-Hakim, S. (Eds.), 2007
Rodríguez Navarro, P., 2012
Wenzel, K. Et al, 2013

- Notas: Interpretación de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 279) “È tipicamente un’immagine digitale che riproduce la variazione cromatica di una superficie; (...) possono essere utilizzate per simulare altre caratteristiche visive oltre al colore, quali la lucità, la trasparenza, la rifrazione, ecc.”. Otra referencia que se encuentra con respecto a la descripción de la textura, se observa en Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p. 114) “può includere descrizioni relative alla geometria della superficie di scala fine, come ad esempio mappe ad alta risoluzione spaziale delle normali alla superficie o texture bi-direzionali. Tessitura del modello geometrico” (puede incluir descripciones relativas a la geometría de la superficie de escala fina, como por ejemplo mapas de alta resolución espaciales de las normales a la superficie o texturas bi-direccionales).

Texture mapping / *Texture mapping* / *Texture mapping*

- Sinónimos: Texture map
- Definición: Proyección de imágenes sobre la estructura geométrica tridimensional.
- Comentarios: Este término se usa siempre en inglés.
- Referencias:
 - Apollonio, F.I. et al, 2010
 - Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010
 - Corsini, M., et al, 2013
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Koska, B. y Křemen, T., 2013
 - Lerma, J.L. et al, 2010
 - Lerma, J. L. et al, 2011
- Notas: Interpretación de la definición dada por Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 279) “proiezione di immagini sulla struttura geometrica tridimensionale.” Continuando en la misma página, agrega que: “Il processo di texture mapping permette di aggiungere al modello tridimensionale alcune informazioni riguardanti il materiale e alcuni dettagli formali non presenti nel modello digitale, il tutto senza aumentare la complessità geometrica. Tale risultato viene raggiunto proiettando opportunamente un’immagine (texture) sulla superficie dell’oggetto, che è resa fruibile al momento della restituzione visiva del modello.” (El proceso de “texture mapping” permite de adjuntar al modelo tridimensional alguna información con respecto al material y algunos detalles formales no presentes en el modelo digital, todo sin aumentar la complejidad geométrica. El resultado viene adjunto proyectando oportunamente una imagen (textura) sobre la superficie del objeto, que se hace accesible en el momento de la restitución visiva del modelo) Otra definición la encontramos en Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F. (2010, p.220): “Il texture mapping consiste nel mappare un’immagine sulla geometria di un oggetto per creare l’aspetto del dettaglio di superficie fine.” (El “texture mapping” consiste en mapear una imagen sobre la geometría de un objeto para crear el aspecto del detalle de superficie fina) “Il texture mapping sia la



mappatura di una funzione su una superficie 3D” (El “texture mapping” es el mapeado de una función sobre una superficie 3D). En Apollonio, F.I. et al (2010, p. 284) se describe “*in cui una singola immagine texture è “mappata” sul modello*” (en la cual una imagen individual texturizada es mapeada sobre el modelo).

Espacio UV / Spacio UV / Space UV.

- Sinónimos: Sistema di riferimento UV
- Definición: Cuando se aplica una proyección a una malla, el vértice de cada triángulo se combinado con un par de coordenadas adicionales, U y V, que determinan la posición en el espacio de la textura. Cada triángulo se encuentra así asociado a una porción específica de la textura. El espacio de la textura es un plano cartesiano, llamado espacio UV, donde U es la coordenada horizontal y V la coordenada vertical.
- Comentarios:
- Referencias:
 - Fantini, F., 2011
 - Fantini, F., 2010.
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
- Notas: Interpretación de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 296): “*Quando si applica una proiezione ad una mesh il vertice di ciascun triangolo viene abbinato ad una coppia di coordinate aggiuntive, U e V, che ne determinano la posizione nello spazio delle texture. Ciascun triangolo si trova così associato ad una porzione specifica della texture. Lo spazio della texture è un piano cartesiano, detto spazio UV, dove U è la coordinata orizzontale e V la coordinata verticale*”

CAD / CAD / CAD.

- Sinónimos: Computer Aided Desing
- Definición: “*El diseño asistido por computadora, más conocido por sus siglas inglesas CAD (computer-aided design), es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades. Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D). Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos*”
- Comentarios:
- Referencias:
 - Bianchini, C., 2007
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, J.L., 2010
- Notas: Definición sacada de Wikipedia (última visita: 22/11/2013).

NURBS / NURBS / NURBS.

- Sinónimos:



- **Definición:** Es el acrónimo de Non Uniform Rational B-Splines (NURBS). Es una clase de curvas geométricas, las B-Splines racionales no uniformes, utilizadas en computer graphic para representar curvas y superficies. Una NURBS es por lo tanto la representación matemática que un programa software, por ejemplo un sistema CAD 3D, crea de un objeto, para definir con precisión su forma.
- **Comentarios:** Algunos conceptos relacionados con este término son: Rappresentazione matematica (Migliari, R., 2012) (Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010), Modello numerico (Bertocci, S., Bini, M., 2012) (Fantini, F., 2010), Displaced subd (Bertocci, S., Bini, M., 2012) (Fantini, F., 2011).
- **Referencias:**
 - Fantini, F., 2012
 - Guidi, G. y Remondino, F. 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Merlo, A., 2007
 - Migliari, R., 2012
 - Verdiani, G., 2003
- **Notas:** Inspirada en la descripción de Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (2010, p. 356): “*Non Uniform Rational B-Splines (NURBS): È una classe di curve geometriche, le B-Splines razionali non uniformi, utilizzate in computer grafica per rappresentare curve e superfici. Una NURBS è quindi la rappresentazione matematica che un programma software, ad esempio un sistema CAD 3D, crea di un oggetto, per definirne accuratamente la forma*”.

Filtrado / Filtraggio / Filtering.

- **Sinónimos:**
- **Definición:** Filtrar un dato significa modificar intrínsecamente la información unida a cada punto individual, interviniendo directamente sobre las coordenadas espaciales o sobre la información cromática. El filtrado de los datos puede afectar a dos principales aspectos: por un lado la eliminación de los elementos externos a la geometría levantada, o por el otro la modificación de los datos afectados por un error incompatible con las características geométricas del modelo físico.
- **Comentarios:** Algunos conceptos relacionados con este término son: Limpiar los datos (Marambio, A., et al, 2009), Remove redundancies (Lerma, J.L., et al, 2010).
- **Referencias:**
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010
 - Lerma, J.L., et al., 2011
- **Notas:** Interpretación de la definición de Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, 205): “*Filtrare un dato significa modificare intrinsecamente le informazioni legate ad ogni singolo punto, agendo direttamente sulle coordinate spaziali o sulla informazione cromatica (...) Il filtraggio dei dati può riguardare due principali aspetti: da un lato l’eliminazione degli elementi estranei alla geometria rilevata, dall’altro la modifica dei dati affetti un errore incompatibile con le caratteristiche geometriche del modello fisico*”.



Pre-procesamiento / *pre-elaborazione* / *pre-processing*.

- Sinónimos:
- Definición: “*incluye la reducción del ruido, el ajuste del color, contraste y luminosidad de las imágenes, el coloreado de las nubes de puntos y el registro de las posiciones del escáner*”.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Post procesamiento⁴⁸ (Marambio, A., et al, 2009), Post processing (Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012).
- Referencias:
 - Dore, C. y Murphy, M., 2012
 - Lerma, J.L., et al, 2010
 - Marambio, A., et al, 2009
- Notas: Marambio, A., et al. (2009, p. 5)

Post-producción / *post-elaborazione* / *Post-processing*.

- Sinónimos:
- Definición: El modelo digital 3D obtenido a partir de las fases de registro de los escaneados, triangulación y edición debe, a menudo, ser sometido a más de un post-procesado para adaptarlo a la aplicación que se está llevando a cabo.
- Comentarios: Algunos conceptos relacionados con este término son: Remeshing⁴⁹ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010) (Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010), Smoothing⁵⁰ (Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010), Retopology⁵¹ (Fantini, F., Rodríguez-

⁴⁸ Marambio, A., et al. (2009, p. 5): “*incluye la optimización de la nube de puntos general y la creación de secciones y ortomágenes de los edificios a una resolución “x” para la representación de la escala “y.”*”

⁴⁹ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.113): “*data una mesh tridimensionale, determinare una nuova superficie poligonale i cui elementi costruttivi siano in grado di soddisfare requisiti di qualità, fornendo una buona approssimazione della mesh di partenza. Il termine approssimazione deve essere inteso sia in relazione alla posizione, che all’orientamento delle normali e ad altre proprietà di ordine superiore*” (Dada una malla tridimensional, determinar una nueva superficie poligonal en la cual los elementos constructivos satisfagan requisitos de calidad, dando una buena aproximación de la malla de partida. El termino aproximado deber ser entendido sea en relación a la posición que a la orientación de las normales y a otras propiedades de orden superior) Otra definición se encuentran en Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A. (2010, p. 218): “*è una regolarizzazione generale della posizione dei vertici della mesh, generalmente molto disordinata al termine del processo di editing e ottimizzazione*” (es una regularización general de la posición de los vértices de la malla, generalmente muy desordenada al terminar el proceso de edición y optimización)

⁵⁰ Apollonio, F.I. y Remondino, F. (2010, p.106): “*ridurre (lisciare) artefatti in modo tale che la forma globale, o i componenti a bassa frequenza, sia garantita. Prende in considerazione un’area attorno a ciascun vertice entro cui ridurre le differenze di quota tra i punti in base ad una tolleranza indicata*” (reducir (alisar) artefactos de tal modo que la forma global, o los componentes a baja frecuencia, sea garantizada. Tiene en consideración un área en torno a cada vértice dentro del cual reduce las diferencias de cota entre puntos basado en la tolerancia indicada).

⁵¹ Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S. (2012, p. 32): “*tecnica di modellazione che di fatto è una sorta di remeshing controllato interattivamente dall’utente ed ha come finalità quella di ottenere una topologia prevalentemente quadrangolare che “ricalca” la forma complessa ottenuta mediante rilievo*



Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012) (Fantini, F., 2012), Verificación del modelo (Marambio, A., et al, 2009).

• Referencias:

Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010

Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010

Rodríguez Navarro, P., 2012

- Notas: Interpretación de la definición encontrada en Apollonio, F.I. y Remondino, F., (2010, p. 105): “*il modello digitale 3D ottenuto dalle fasi di registrazione delle scansioni, triangolazione ed editing deve, spesso, essere sottoposto ad un’ulteriore post-processing al fine di adattarlo all’applicazione che si sta conducendo.*”

laser scanner o mediante sistemi di scultura digitale 3D.” (Técnica de modelación que de hecho es un conjunto de “remesing” controlado interactivamente por el usuario y tiene como finalidad obtener una topología prevalentemente cuadrangular que “recalca” la forma compleja obtenida mediante láser escáner o mediante sistemas de escultura digital 3D)



F. ÍNDICE DE TÉRMINOS

Español

Términos	Página	Términos	Página
A			
Adquisición de datos	242	Alto nivel de detalle	254
Aéreo	247	Analítica	265
Alineación	271	Analógica	264
Alta definición	254	área de solape	246
alta resolución	254	Auto-calibración	249
B			
Baja definición	254	Barridos	245
bajo detalle	254	Barridos escáner láser	267
Barredores (escáneres) láser	265, 267	Bump mapping	278
C			
CAD	291	Colinealidad	264
Calibración	247	Color	275
Calibrar inversamente	248	Color per vertex	275
Cámara	263	Corrección de bordes	280
Clásico	256	Corrección del eje óptico	248
Códigos RGB de color del punto	275	Croquis	256
D			
Datos brutos	245	Diana de control	246
Decimación	287	Dianas circulares	246
Desviación estándar	244	Dianas codificadas	246
Diana	246	Dianas esféricas	246



Dianas naturales	246	Distorsión	245
Diferencia de fase	270	Documentación digital	275
Digital	255	Documentación métrica	245
Displacement mapping	279	Drone	250
Distancia focal	264		
E			
Edición 3D	280	Escáner Láser 3D	265, 267
Elementos barridos	267	Espacio UV	291
Eliminación de las sombras	288	Estación total	274
Empalme	271	Estereofotogrametría	265
Equipo de medición de láser	265	Estereoscópico	265
Error topológico	244	Exactitud	243
Escaneado	267		
F			
Facetear	286	Fotograma	260
Fase de triangulación	286	Fotogrametría	257
Filtrado	292	Fotogrametría de escáner láser	267
Flujo de trabajo	250	Fotogrametría Digital Automatizada	258
Fotografía	260	Fotoplano	261
Fotografías estereoscópicas	265	Fotorrealista	256
G			
Generación de superficies poligonales	286	GPS (Sistema de Posicionamiento Global)	274
Georreferenciación	274		



I

IBM (Image-Based Modelling)	258	Imágenes de renderizado	280
Image matching	259	Información de color	275
Imagen Digital	275	Iterative Closest Point (ICP)	252
Imágenes con carácter métrico	260		

L

Láser escáner	265, 267	LiDAR	266
Levantamiento	242	Limpiar los datos	292

M

Malla - Mesh	285	Modelado	282
Malla de polígonos	285	Modelado inverso	251
Mapa de color	276	Modelados fotorrealísticos 3D	284
Mapa de desplazamiento	279	Modelización	284
Mapeado	277	Modelo de mallas	282
MDT	273	Modelo de polígonos	282
Medición	245	Modelo de polígonos	282
Medición basados en el tiempo	270	Modelo de superficies	282
Medición de distancia	270	Modelo Digital	283
Medición del tiempo de vuelo (TOF)	270	Modelo Digital de Superficies (MDS)	282
Medida de distancia	270	Modelo Digital del Terreno	273
Medida directa	256	Modelo matemático	283
Method Bundle Adjustment	249	Modelo poligonal sin estructura (malla)	285
Método general de la fotogrametría	258	Modelos de malla simplificados	255
Modelos optimizados	255		



N

Nivel de detalle	252	Nube de puntos de color	269
Normal mapping	278	Nube ligera	269
Nube de puntos	268	NURBS	291
Nube de puntos 3D	268		

O

Oclusión	287	Ortofotografía	260
Optimización	251	Ortoimágenes	261
Orientación	261	Ortoproyección	261
Ortofoto	260		

P

Parámetros de orientación	262	Pre-procesamiento	293
Píxel	276	Proceso de autocalibración	248
Post-producción	293	Puntos de control	246
Precisión	244	Puntos homólogos	262

R

RBM (Range-Based Modelling)	267	Reducción del número de triángulos	287
Reconstrucción virtual	284	Reducción del número de zonas ocultas	288
Reconstrucciones 3D	284	Registro	271
Rectificación	263	Registro fotogramétrico digital	267
Recubrimiento	246	Rellenar los agujeros	288
Reducción del número de polígonos	287	Relleno huecos	288



Rendering fotorealístico	280	Resolución	280
Renderización	280	Restitución estereofotogramétrica	265
Representación virtual	250	Ruido	288
Reproducción virtual	250		
S			
Sensor activo	268	Sensores de imagen	260
Sensor láser	265, 267	SIG	273
Sensor pasivo	260	Sistemas de Información Arquitectónica (SIA)	273
Sensores 3D Activos	268	Subdivisión	286
Sensores de barrido láser	265, 267	Superficie rumorosa	289
T			
Terrestre	247	Toma de datos	242
Textura	289	Topografía	272
Texturas del color	289	Tradicional	256
Texture mapping	290	Triangulación	271, 286
Texturización	277	Triangulación óptica	271
Tiempo de vuelo	270	Tridimensional	253
U			
UAV	250	Unión de los puntos de escaneo	286
V			
Verificación del modelo	294	Visualización	279
Virtual	257		
Z			
Zonas de sombra	287	Zonas ocultas	287



Inglés

Términos	Página	Términos	Página
3D acquisition pipeline	242	3D laser scanner	265, 267
3D active methods	268	3D model triangles	282
3D capturing techniques	242	3D point clouds	268
3D data acquisition	242	3D	253
3D editing	280	Three-dimensional	253
3D imaging	258	3D triangular mesh	285
A			
Accuracy	243	Alignment	271
Accurate	254	Analogical	264
Active 3D sensor	268	Analytical	265
Active range sensing	268	Autocalibration	249
Active sensor	268	Automated 3D modelling procedures	284
Additional Parameters (Aps)	262	Automated procedures (“image matching”)	259
Aerial	247	Automatic camera calibration	249
Aerial imagery	275	Automatic image processing methods	259
Aerial images	275		
B			
Baking	277	Bump mapping	278
C			
CAD	291	Camera resectioning	247
Calibration	247	Classical	275
Camera	263	Close range photogrammetry (CRP)	276



Close range stereo pairs	259	Computer Aided Desing	291
Coded Target	246	Control point	246
Collinearity	264	Correspondences across	246
Color	275	Crossing face	281
Color mapped	276	CW	270
D			
Decimated	287	Digital Terrain Model	273
Degenerate edges	281	Digitalizzazione	250
Degenerate triangles	281	Digitizing	250
Degree of detail	252	Displaced subd	292
Digital	255	Displaced subdivision surface	279
Digital Image	275	Displacement mapping	279
Digital Model	283	Displacement map	279
Digital photo modelling	284	Distortion	245
Digital reconstruction	284	DTM	273
Digital Surface Model (DSM)	282	Duplicate triangle	281
E			
Exterior orientation parameters	262		
F			
Fast texture	289	Filtering	292
Fill holes	288	Focal length	264
G			
Generation of cut section	280	Georeferenced point cloud/mesh	274
Geographic Information System	273	Georeferenced position	274



Geo-referencing	274	Ground terrain Model	274
GIS	273		
H			
High-Definition	254	High-resolution	254
Highly detailed	254	Homologous point	262
I			
IBM (Image-Based Modelling)	258	Image-based 3D reconstruction	258
Image based surface reconstruction	284	Image-based technique	258
Image matching	259	Inconsistent edges	281
Image overlapping	246	Interior orientation parameters	262
Image processing	259	Intrinsic camera parameters	262
Image survey	258	Iterative Closest Point (ICP)	252
Image-based 3D model	258		
L			
Laser Range Camera (LRC)	267	Levels of Detail (LOD)	252
Laser scan	265, 267	LiDAR	266
Laser Scanning	265, 267	Low detailed	254
Laser-based equipment	265, 267	Low-resolution	254
M			
Mapped	277	Mesh model	282
Mathematical model	283	Mesh surface	285
Merge	286	Meshing	286
Mesh	285	Meshing of the 3D point cloud	286
Mesh editing	280	Mesurement	245



<i>Method Bundle Adjustment</i>	249	Modelling	282, 284
Method Self-calibrating bundle adjustment	249		
N			
Noise	288	Normal mapping	278
Non-manifold face	281	NURBS	291
O			
Occlusion	287	Orthographic images	261
Optimization	251	Orthoimage	261
Orientation	261	Orthophoto	260
Ortho photo creation	261		
P			
Pair of images	258	Pixel	276
Passive sensor	260	Pixel size	276
Passive technique	260	Point cloud alignment	272
Phase-shift distance	270	Point clouds	268
Photogrammetric image processing methods	259	Point constraint	272
Photogrammetric surface reconstruction	284	Point/triangles reduction	287
Photogrammetric survey	259	Polygonal model	282
Photogrammetry	257	Polygonal model generation	286
Photographs	260	Post processing	293
Photo-realistic	256	Post-processing	293
Photo-realistic perspective	280	Precision	244
Picture element	276	Pre-processing	293
Pipeline	250	Principal point offset	262



Q

Quality texture 289

R

Range camera 268

Range device 268

Range image 268

Range images 258

Range map 242

Raw data 245

RBM 267

Reality-based 3D modelling 258

Reconstruct the 3D shapes 284

Rectification 263

Reduced model size 287

S

Scanner 3D 265, 267

Scanner laser 265, 267

Scanner phase-based 270

Self-calibration 249

Self-calibration bundle
adjustment 249

Shared 279

Smoothing 293

Space UV 291

T

Redundant face 281

Registration 271

Remeshing 293

Remove redundancies 292

Rendering 279

Rendering 280

Resezione 261

Resolution 253

Retopology 293

Reverse engineering process 251

Reverse modelling 251

Sparse reconstruction from
images 284

Stereoscopic 265

Structure-from-motion
software (SFM) 258

Subdivision 286

Surface model 282

Surface normal 280

Survey 242



Target	246	Time Of Flight	270
Target coordinate system	246	TIN	286
Tecnología láser stripe	271	TOF	270
Terrestrial	247	Topography	272
Textel	276	Topological error	244
Texture	289	Total station	274
Texture map	290	Triangulation	271, 286
Texture mapping	290	Triangulation devices	271
Texturing	277		
U			
UAV	250	Unstable face	281
Uncertainty	244		
V			
Virtual	257	Visualization	279
virtual reconstruction	284		
W			
Wireframe	280	Workflow	250

Italiano

Términos	Página	Términos	Página
<i>3D laser scanner</i>	265		
A			
Accuratezza	243	Aereo	247
Acquisizione dei dati	242	Allineamento	271



Alta definizione	254	Analogica	264
Alto livello di dettaglio	254	Apparenza visiva	256, 289
Analitica	265	Auto-calibrazione	249
B			
Bassa definizione	254		
C			
CAD	291	Chiusura di fori	288
Calibration and orientation data	248	Clasico	256
Calibration pattern	248	Collinearità	264
Calibrazione	247	Colore	275
Camera	263	Coppia Stereofotogrammetrica	265
D			
Dati grezzi	245	Digitalización	250
Decimazione	287	Distanza focale	264
Digitale	255	distorsione	245
E			
Edizione 3D	280	Errore topologico	244
F			
Fase di acquisizione	242	Fotogrammi	260
Filtraggio	292	Fotomodellazione	258
Foto digitali	275	fotorealistico	256
Fotogrammetria	257		
G			
Geometric camera calibration	248	GIS	273
Georeferenziazione	274		



I

IBM (Image-Based Modelling)	258	Informazione cromática (RGB)	275
Image matching	259	Iterative Closest Point (ICP)	252
Immagine digitale	275		

L

Lacune	287	Livello di dettaglio	252
LiDAR	266		

M

Maglia	285	Modellazione	284
Maglia di poligoni	285	Modelli digitali	283
Mappa di rugosità	278	Modelli Digitali del Terreno	273
Mappatura	277	Modelli digitali di superfici (MDS)	272
Mappatura del colore	276	Modelli Fotogrammetrici 3D	258
Mappe bump	278	Modellismo	282
Mappe delle normali	278	Modello a superfici	282
Mappe di differenza	279	Modello discreto	269
Mappe di scostamento	279	Modello geometrico	283
MDT	283	Modello HP (high-poly)	254
Mesh	285	Modello master	254
Method Bundle Adjustment	249	Modello matematico	283
Metodo proiettivo inverso	248	Modello numerico	283, 292
Misurazioni	245	Modello poligonale	282

N

Nube di punti non strutturata	269	NURBS	291
Nube di punti strutturata	269	Nuvola di punti	268



Nuvola grezza	245		
O			
Orientamento	261	Ottimizzazione	251
Ortofoto	260		
P			
Parametri Aggiuntivi (AP)	262	Post-elaborazione	293
Photogrammetric measurement	245	Precisione	244
Pipeline	250	Pre-elaborazione	293
Pixel	276	Punti omologhi	262
Post procesamiento	293		
R			
Raddrizzamento	263	Reverse modelling	251
Radiometric calibration	248	Ricopertura	246
Rappresentazione matematica	283, 282	Ricoprimento	246
RBM	267	Ricostruzione virtuale	284
Registrazione	271	Rilevamento	242
Rendering	280	Rilievo	242
Resoluzione	253	Rilievo con sensori attivi	268
Restituzione 3D	259	Riprese	242
Restituzione virtuale	284	Rumore	288
S			
Scansione 3D	267	Sensori 3D attivi	268
Scansioni allineate	272	Sensori attivi	268
Sensore passivo	260	Sensori di distanza	268



Sistema di riferimento UV	291	Spigoli inconsistenti	280
Sistemi Informativi Geografici	273	Stazione totale	274
Sovrapposizione delle prese	246	Stereoscopico	265
Spacio UV	291	Subdivisione	286
Spigoli degeneri	280	Superfici di suddivisione	279
T			
target	246	Topografia	272
Tecniche di misura passiva	260	Triangolarizzazione	286
Tempo di volo	270	triangolazioni	271
terrestre	247	Triangoli degeneri	281
Tessitura	289	Triangoli duplicati	281
Texture mapping	290	tridimensionale	253
U			
UAV	250		
V			
Variazione di fase	270	Visualizzazione	279
Virtuale	257		
Z			
Zone d'ombra	287		



G. ÍNDICE DE AUTORES

Para realizar este estudio terminológico ha sido importante hacer una selección de los autores que eran apropiados estudiar, haciendo una selección en los campos objeto de estudio (arquitectura, ingeniería y el patrimonio, dentro del levantamiento y la restitución de modelos en 3D) y en los tres idiomas que se contemplan en esta tesis (español, inglés e italiano). Por ello, se ha hecho una breve descripción de cada uno de los autores, que permita una contextualización general.

- ❖ **BUILL POZUELO, Felipe**⁵². Felipe Buill es doctor en Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, profesor titular de Fotogrametría en la EPSEB, Ingeniero Técnico en Topografía, licenciado en Geografía y responsable del laboratorio de fotogrametría de la EPSEB. Además es profesor en el Máster en Restauració de Monuments de la Universidad Politécnica de Cataluña.

- ❖ **CUELI LÓPEZ, Jorge Tomás**⁵³. Nacido en Unquera, Cantabria, es un ingeniero industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII) de la Universidad de Valladolid. Trabaja en Punto Arquitectura, S.L.P., empresa que desde su fundación se ha caracterizado por la creación de equipos multidisciplinares que den respuesta a todas las facetas que en la actualidad plantean la construcción, rehabilitación y patología de edificaciones. Está certificada en ISO 9.001 y 14.001 como Sistema de Gestión Empresarial dirigidas al Estudio y Desarrollo de Proyectos Arquitectónicos, Dirección de Obra y Coordinación de Seguridad y Salud. En ella, se ha desarrollado una división dedicada a *Project Management* con actuaciones importantes en Cantabria. Al mismo tiempo se potencia la fotogrametría arquitectónica, método mediante el cual son capaces de proporcionar planos de cualquier edificio existente.

- ❖ **DOCCI, Mario**. Nacido en Siena, en el 1935, Adquiere el título de arquitecto por la “*Facoltà d’Architettura di Roma*” en el 1962. Trabaja como arquitecto y urbanista en Roma. Es profesor catedrático de la *Facoltà d’Architettura dell’Università La Sapienza*, en la cual es Presidente del 1988 a septiembre del 2000. Además, enseña en la *Scuola di Specializzazione in Restauro dei Monumenti* (Escuela de Especialización en Restauración de los Monumentos) en la misma universidad. Es Vicerrector de la *Università La Sapienza* desde el año 1997 al 2000. Representante italiano en el “Comitato Consultivo CEE” para la Profesión de Arquitecto desde el 1992 hasta la actualidad. Desarrolla actividad didáctica y de investigación en colaboración con instituciones nacionales y extranjeras, coordinando numerosos grupos de investigación. Es fundador y director de la revista “*Disegnare, idee, immagini*”. Ha desarrollado una intensa actividad de investigación centrada sobre la temática de la historia y la metodología del levantamiento, la historia de los métodos de Representación, las problemáticas entre el diseño y proyecto, y, la proyectación

⁵² <http://mrmbcn.net/equipo-docente-2/#.UgC0bJKNLzw> (última visita: 13/12/2013)

⁵³ <http://www.worldphotogrammetry.com/sobre-nosotros/item/9-quienes-somos.html> (última visita: 13/12/2013)



arquitectónica y urbanística. Siempre ha desarrolla su actividad profesional en el sector de la proyectación arquitectónica y urbanística, pero desde hace muchos años su interés ha prevalecido concentrado sobre la restauración arquitectónica y urbana. Es miembro de diversas asociaciones culturales, entre ellas, “La Pontificia Accademia dei Virtuosi del Pantheon”, y además, de algunas instituciones científicas, como “Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici” y “ASS.I.R.CO (Associazione italiana recupero e consolidamento costruzioni)”. Ha escrito numerosos libros, entre ellos “Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno” y “Manuale di rilievo architettonico e urbano”.⁵⁴

- ❖ **FANTINI, Filippo.** Arquitecto por la Universidad Politécnica de Milán, desde el 2003. Desde siempre activo en el ámbito de la investigación y de la formación sobre temas de *computer graphic*, se ocupa de levantamiento y representación mediante el uso de nueva tecnología que aplica en el campo de la tutela y la valorización de los Bienes Culturales. Desde el 2004 colabora constantemente con el laboratorio de levantamiento del Departamento de Proyección de la Arquitectura de la *Università degli Studi di Firenze* con la cual participa en numerosas campañas de levantamiento finalizadas a la documentación de sitios de particular interés histórico-artístico entre los cuales se encuentra: Villa Adriana (Tívoli), Sperlonga (Latina), Massa Marittima (Grosseto) e Xian (Shanghái, China). Profesor a contrato de Diseño Automático dentro del curso universitario en Diseño Industrial de la *Università degli Studi di Firenze* en el 2005, gana el concurso de doctorado de investigación en el sector científico disciplinar ICAR 17 en diciembre del mismo año. Desde julio del 2009 a junio del 2011 es becario de la beca “Santiago Grisolia” en el Instituto de Restauración del Patrimonio (IRP) de la Universidad Politécnica de Valencia donde colabora con un grupo interdisciplinar de expertos en un proyecto financiado por la Comisión Europea “ATHENA”. Desde octubre del 2011 pasa a la posición de contratado, en calidad de “técnico superior” en el mismo instituto de la Universidad Politécnica donde al mismo tiempo es involucrado en otros proyectos de cooperación internacional con Marruecos (arquitectura de tierra) y Guatemala (arqueología Maya). Participa en seminarios de estudio sobre temas de levantamiento digital y de museografía; edita publicaciones y frecuenta los principales convenios internacionales sobre temas de Patrimonio Cultural en relación al uso de las nuevas metodologías de representación. Actualmente trabaja en el desarrollo de su tesis de doctorado en la Universidad Politécnica de Valencia sobre el tema de la proyección de los lugares para el espectáculo en el mundo antiguo, en particular sobre el teatro romano. Desde septiembre del 2013 es investigador a tiempo determinado en la facultad de Ingeniería del “*Alma Mater Studiorum di Bologna*” Campus de Ravenna.

54

www.zam.it/biografia_Mario_Docci

y

<http://gomppublic.uniroma1.it/Docenti/Render.aspx?UID=d800c29f-7bd7-4d7e-ae2-c2ef93388f94>
(última visita: 13/12/2013)



- ❖ **GAIANI, Marco**⁵⁵. Marco Gaiani es un profesor catedrático de *Design* en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Bolonia. Nace en Bolonia el 8 de febrero de 1960 y se licenció en 1985 en Ingeniería Civil sección Edilicia con cum laude en la “Università degli Studi di Bologna”. En 1989 se laurea como técnico en el “Istituto di Architettura e Urbanistica dell'Università degli Studi di Bologna”. En 1993 se convierte en investigador confirmado por el grupo disciplinar “H11X Disegno”, dentro de la Facultad de Arquitectura de la “Università di Ferrara”. En 1999 entra como profesor asociado en el área H11X-“Disegno” en la Facultad de Arquitectura Leonardo del Politécnico de Milán, Departamento DITEC. El 1 de marzo del 2002 pasa a ser profesor extraordinario del sector científico-disciplinar H11X (ICAR 17) - “Disegno” en la Facultad del Design del Politécnico de Milán y profesor titular en marzo del 2005. En el año 2002-2003 es Director vicario y más tarde (2003-2004) se convierte en Director del Departamento INDACO (Departamento de Diseño Industrial, de las Artes, de la Comunicación y de la Moda) del Politécnico de Milán. Del 1 de abril de 1993 al 31 de enero del 1999 es fundador y responsable del centro de computer graphic de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Ferrara. Miembro del Comité Directivo del Centro para la Gráfica Informatizada del Centro Informático de Ateneo del Politecnico di Milano desde diciembre del 1999. Fundador y responsable del Laboratorio de “Virtual Prototyping & Reverse Modeling” del Politécnico de Milán desde el 2002. Especializado en la modelación digital para la arquitectura y para el *design*, se ha empeñado en el último decenio, en el estudio y en la optimización de métodos y sistemas para el levantamiento y la documentación de la arquitectura histórica y moderna, de las obras de interés arqueológico y de la escultura y, más recientemente, en el campo del *virtual prototyping* y el *redering* aplicado a la industria del *design* y a la investigación sobre métodos didácticos de enseñanza de las técnicas de representación digital tridimensional.

- ❖ **GUIDI, Gabriele**⁵⁶. Gabriele Guidi es Profesor asociado de Design (ICAR/17) en la Facultad de Design del Politécnico de Milán. Se licenció en Ingeniería en la Università degli Studi di Firenze en febrero del 1988. Su experiencia nace en el mundo de la imagen en el cual inició a hacer investigación en 1988. En julio del 1992 consigue el título de Doctor de Investigación. En septiembre de 1994 vence un concurso para un puesto de investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Florencia. En 1998 recibe la confirmación de Investigador. Desde 1999 orienta su investigación sobre temáticas con relación al levantamiento tridimensional iniciando un estudio que acaba en el 2001 con la terminación de una estancia como “Visiting Researcher” en el “Visual Information Technology (VIT) Group del National Research Council Canada (Ottawa, Ontario), reconocido como uno de los centros de referencia internacional en el sector del levantamiento y del modelado tridimensional. Es autor de más de 100 publicaciones nacionales e internacionales sobre técnicas de levantamiento tridimensional, sea con

⁵⁵<http://www.unibo.it/SitoWebDocente/default.htm?UPN=marco.gaiani%40unibo.it&TabControl1=TabCV> (última visita: 13/12/2013)

⁵⁶http://guida.design.polimi.it/guida/2009/index.php/faculty_docenti/docente/5967 (última visita: 13/12/2013)



métodos activos (escaneados láser), que con pasivos (fotogrametría). Se ha ocupado de aplicaciones en el campo de los bienes culturales cuidando, entre otros, el modelado de famosas estatuas de Donatello incluso la Magdalena y el David de bronce. En el campo del design ha introducido el levantamiento digital con integraciones de fotogrametría y escáner láser.

- ❖ **HAALA, Norbert**⁵⁷. Es doctor ingeniero, profesor adjunto y Diputado Director del “Institute for Photogrammetry” de la “University of Stuttgart” (Alemania). En la actualidad trabaja en las líneas de investigación de “Dense 3D Surface Reconstruction by Aerial Image Matching”. (Métodos de *Image matching* usados para la reconstrucción 3D de superficies a partir de imágenes aéreas), “Unmanned Airborne Systems/Vehicles (UAS/UAV)” (Drone) y “Virtual City Models” (Modelos virtuales de la ciudad). Ha escrito una gran cantidad de artículos sobre fotogrametría.
- ❖ **KŘEMEN, Tomás**⁵⁸. Doctor ingeniero en la Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Geodesia Especial de la Universidad de Praga (República Checa). Profesor de Topografía en Ingeniería y de Levantamiento de Edificios.
- ❖ **LERMA GARCÍA, José Luis**⁵⁹. José Luis Lerma es profesor de “Fotogrametría analítica” y “Procesos digitales” en el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría (DICGF) adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica (ETSICGT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es Ingeniero Técnico en Topografía desde el 1992 e ingeniero en Geodesia y Cartografía desde el 1996. En 1999 obtiene el título de doctor en Geodesia y Cartografía. Es profesor de fotogrametría en la Facultad de Gestión de la Información y Medio (Máster Internacional en Geomática) de la Universidad de Ciencias Aplicadas Karlsruhe (Alemania). Sus líneas de investigación son “Fotogrametría del objeto cercano”, “Automatización de sistemas fotogramétricos digitales. Desarrollo de software”, “Análisis termográficos en conservación y restauración”, “Integración de datos multispectrales: UV, visible, IR y LiDAR”, “Escaneado láser aerotransportado y terrestre”, “Generación de ortoimágenes convencionales y verdaderas”, “Creación de entornos fotorrealísticos y productos multimedia”, “Realidad virtual y visualización fotorrealística” y “Visualización 3D y animación de ciudades”. Ha publicado diversos libros sobre fotogrametría, y diferentes artículos sobre fotogrametría y escáner láser.
- ❖ **MAÑANA-BORRAZÁS, Patricia**⁶⁰. Licenciada en Historia en 1997 por Universidad de Santiago de Compostela, con orientación curricular en Arqueología y Prehistoria. Arqueóloga y especialista en registro geométrico del patrimonio. Técnica de investigación en Instituto de Ciencias del Patrimonio (Incipit). Consejo Superior de Investigaciones

⁵⁷ http://www.ifp.uni-stuttgart.de/institut/staff/haala_publicationen.htm (última visita: 13/12/2013)

⁵⁸ <http://k154.fsv.cvut.cz/~kremen/> (última visita: 13/12/2013)

⁵⁹ <http://jllerma.webs.upv.es/> (última visita: 13/12/2013)

⁶⁰ <http://csic.academia.edu/PatriciaMananaBorrazas/CurriculumVitae> (última visita: 13/12/2013)



Científicas (CSIC) en Santiago de Compostela desde enero de 2009, ejecutando tareas concretas de documentación tridimensional del patrimonio cultural, empleando diversas técnicas de registro: escáneres láser 3D, escáner de luz estructurada, fotogrametría, así como diverso software de edición y modelado de los datos 3D para su representación.

- ❖ **MURPHY, Maurice**⁶¹. Profesor, Presidente Superior del programa Cert. Líneas de investigación: “Building Conservation and new technology applications” (Conservación de Edificios y aplicaciones de nueva tecnología), “Application of CD ROM and WEB design for educational courseware in building technology” (la aplicación de CD ROM y diseño web para cursos educativos en tecnología de la construcción), “Training and education in building conservation” (formación y la educación en la conservación de Edificios), “Laser Scanning of existing buildings, BIM” (Escaneado láser de los edificios existentes, BIM)

- ❖ **REMONDINO, Flabio**. Estudia Ingeniería Medioambiental en el Politécnico de Milán (1993-1998). En el 2006 obtiene el título de doctor en fotogrametría en Suiza. En el 2010, realiza el post-doc en SOI unit, FBK Trento, Italia. A partir del 2010, se convierte en el jefe de la unidad de investigación 3DOM, FBK Trento. Del 2000 al 2008, es “webmaster” en ISPRS (*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*). En el 2002, comienza a trabajar como delegado nacional de Suiza en CIPA (*International Committee for Documentation of Cultural Heritage*), hasta el 2007. Del 2004 al 2008 trabaja como Copresidente de WGV/4 “Virtual Reality and Computer Animation”. En el 2008, se convierte en consejero ejecutivo del CIPA, y, en este mismo año, pasa a ser presidente del WGV/4 “Imaged- and range-based 3D modelling” hasta el 2012. En el 2012, es nombrado presidente del ISPRS Technical Commission V, cargo que durará hasta el 2016. También en el 2012, es nombrado presidente de la Comisión Técnica I en EuroSDR. Sus ámbitos de investigación son la fotogrametría, el escáner láser, el modelado 3D, el procesado de imágenes y la teledetección (remote sensing). Ha realizado numerosas conferencias en dichos ámbitos, organizado, además, diversos eventos científicos internacionales sobre ello. Ha participado en diversos comités científicos, casi todos a nivel internacional y ha escrito una gran cantidad de artículos, dirigiendo, además, algunas tesis doctorales, siempre sobre el campo de la fotogrametría, el escáner láser y el modelado 3D.

- ❖ **RIVEIRO RODRÍGUEZ, Belén**⁶². Es licenciada en ingeniería estructural por la Universidad de Vigo, e ingeniera en levantamiento terrestre y fotogrametría por la Universidad de Newcastle. También ha estudiado en EEUU. Hoy es profesora e investigadora en la Universidad de Vigo. Doctora por la Universidad de Vigo, con Mención Europea (2011). Sus líneas de investigación son “Aplicación de las técnicas de medición geomática con monitorización dimensional/estructural de obras de ingeniería civil”, “Automatización dos procedimientos de inspección de infraestructuras en base a

⁶¹<http://www.dit.ie/construction/departamentofconstructionmanagementtechnology/staff/> (última visita: 13/12/2013)

⁶² <http://webs.uvigo.es/departamentot05/personalbelen.html> (última visita: 13/12/2013)



metodologías avanzadas para la parametrización geométrica y de comportamiento de los materiales” y “Desenvoltura de sistemas de gestión de infraestructuras”.

❖ **RODRÍGUEZ NAVARRO, Pablo**⁶³. Desde el año 1994 imparte docencia en el Dep. de Expresión Gráfica Arquitectónica de la UPV, y en el 2000 inicia la docencia en una nueva asignatura, “Fotografía”. Dos años después activa una nueva asignatura que se denominó “Rectificación Fotogramétrica”. En el último Plan de estudios estas dos asignaturas se adecuaron y avanzaron denominándose respectivamente “Tratamiento digital de la imagen” y “Fotogrametría Arquitectónica”. En paralelo, y desde la creación del Máster Oficial CPA, imparte la misma disciplina en la asignatura de “Metodologías y Técnicas de Reconocimiento y Evaluación”. En cuanto a la parte investigadora, siempre ha estado vinculada a la Fotografía y sus aplicaciones para el levantamiento gráfico. A principios de los 2000 con el asesoramiento del prof. Pablo Navarro, monta el laboratorio de “Fotografía y Fotogrametría” de la ETS de Ingeniería de Edificación. Será también el Prof. Navarro el que lo introduzca en el mundo del escáner láser. Más tarde, en el año 2011, realiza una estancia de investigación en la Facultad de Arquitectura de Florencia, en el grupo de la prof. Emma Mandelli; un año después, realiza una nueva estancia de investigación, en el Politécnico de Milán, en el grupo de investigación del prof. Gabriele Guidi, siendo en la actualidad Profesor Visitante de ambas Universidades. En cuanto al ámbito internacional, destaca su participación en el comité del VSMM 2012 (Milano) donde participa como sesión chair de la sección de Patrimonio Arquitectónico; actualmente trabaja para Digital Heritage 2013 (Marsella) donde participará como *Programm Comité*. Trabaja para la revista DISEGNARECON (Bologna) donde es editor del número en curso que está dedicado a los usos de la fotografía en el levantamiento llevando por título “Disegnare con la fotografia digitale”. Si bien hasta ahora se ha dedicado a la investigación en levantamientos 3D, realizando trabajos tanto en base fotogramétrica y obtención de nubes de puntos a través del escáner láser, actualmente sus mayores intereses se centran en las fases de “obtención, edición y aplicación” de las fotografías para su aplicación en los modelos tridimensionales.

❖ **SCOPIGNO, Roberto**. Director de investigación en el CNR-ISTI (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione, Consejo Nacional de las Investigaciones - Instituto de la Ciencia y Tecnología). Roberto gana la posición de investigador en el CNR-CNUCE en 1986, convirtiéndose en Investigador Senior en 1997 y, finalmente, en Director de investigación en el 2001 en el ISTI. Desde 1990 trabaja en el Departamento de Ingeniería Informática y en el Departamento de *Computer Science* de la *Università di Pisa*, donde imparte cursos de *Computer Graphics*. Ha sido investigador visitante en la Universidad de Vigo y en la Universidad de California en Santa Cruz (USA). Además, ha sido invitado para estancias cortas, seminarios y cursos de Doctorado en otras universidades internacionales. Roberto ha sido nombrado coordinador de la acción de investigación nacional sobre el *Cultural Heritage & ICT* (titulado en italiano “*Fruizione e*

⁶³ Información aportada por Pablo Rodriguez.



Valorazione del Patrimonio Culturale”), que es una de las seis actuaciones del “*Cultural Heritage Department*”. Ha participado en varios proyectos de investigación (financiados por la UE y agencias nacionales). Se ocupa de: modelado con datos de multiresolución y *rendering*, Láser escáner 3D, reconstrucción de superficies, gráficos interactivos y realidad virtual, visualización científica, e, interpretación del volumen. *Cultural Heritage* (CH) y *Computer-Aided Medicine/Surgery* (Patrimonio Cultural y Medicina asistida por ordenador/ Cirugía) son los principales campos de aplicación para las metodologías y tecnologías desarrolladas por él. Ha publicado más de ciento ochenta artículos en revistas, conferencias y libros internacionales.⁶⁴

⁶⁴ <http://vcg.isti.cnr.it/~scopigno/> (última visita: 13/12/2013)



H. REFERENCIAS

- ❖ Alsadik, B., Remondino, F., Menna, F., Gerke, M. y Vosselman, G., 2013. “Robust extraction of image correspondences exploiting the image scene geometry and approximate camera orientation” en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 20133D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*. 25 – 26 Febrero, Trento, Italy, pp. 1-9.
- ❖ Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010. “Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione. Utilizzo di laser scanner su superfici marmoree di epoca romana” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 118-161.
- ❖ Apollonio, F.I., Baldissini, S., Manferdini, A.M., Remondino, F., 2010. “Rilievo 3D nell’area archeologica di Pompei: risultati e considerazioni.” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 270-307.
- ❖ Apollonio, F.I., Gaiani, M. y Manferdini, A.M., 2010. “Modellazione semantica. Metodi a multirisoluzione” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 236-269.
- ❖ Apollonio, F.I. y Remondino, F., 2010. “Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 94-117.
- ❖ Arbacea, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbridi, M., Idelson, A.I., Scopigno, R., 2013. “Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue” en *Journal of Cultural Heritage*. Editorial Elsevier. Volume 14, Number 4, Julio – Agosto 2013, pp. 332-345.
- ❖ Baldissini, S., Gaiani, M. y Remondino, F., 2010. “Rilievo, gestione e mappatura del colore” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 200-235.
- ❖ Balzani, M., Ferrari, F. y Viroli, F., 2012. “La cittadella di Gozo a Malta. Strategie di restauro e di valorizzazione del sistema di fortificazione maltese” en *Actas de 16a Conferenza Nazionale ASITA*. Vicenza 6-9 novembre 2012, pp.107-114.



- ❖ Battini, C., Fantini, F., 2007. “Clouds and clay. Superfici di suddivisione ed ottimizzazione” en De Carlo, L. (ed.) *Informatica e fondamenti scientifici della rappresentazione*. Editrice Gangemi. Roma, pp. 175-186.
- ❖ Bertocci, S., Bini, M., 2012. *Manuale di rilievo architettonico e urbano*. CittàStudi Edizioni. Novara, Italia.
- ❖ Bianchini, C., 2007. “Laser scanning X” en Docci, M. (ed.) *Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la costruzione e fruizione di modelli virtuali 3D dell'architettura e della città*. Gangemi editore, Roma, pp. 24-31.
- ❖ Biosca Taronger, J.M., Navarro Tarín, S. y Lerma García, J.L., 2007. Modelado tridimensional de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y fotogrametría, *7 Setmana Geomàtica*, Febrero 20–23, Barcelona, España.
- ❖ Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M.A. y Marambio Castillo, A. “Estudio de la calidad en la medida con láser escáner.” Disponible en: <http://www-cpsv.upc.es/documents/SG7pap065.pdf>. (última visita 13/12/2013)
- ❖ Buill, F., Nuñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007. *La fotogrametría arquitectónica*. Edición UPC. Barcelona.
- ❖ Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012. *Fotogrametría. Misure, rilievo, progetto. Volumen 3*. Zanichelli editore S.p.A., Bolonia.
- ❖ Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Gherardi, R. , Fusiello, A. & Scopigno, R., 2013. “Fully Automatic Registration of Image Sets on Approximate Geometry” en *International Journal of Computer Vision*. Editorial Springer US. Volumen 102, Número 1-3, Marzo 2013, pp. 91-111.
- ❖ Cueli López, J., 2010. *Cursos gratis de fotogrametría. Tutoriales Photomodeler*. Disponible en: <http://www.worldphotogrammetry.com/home/itemlist/category/6-cursos-gratuitos.html> (última visita: 13/12/2013)
- ❖ Docci, M., Maestri, D., 1984. *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*. Editori Laterza. Bari.
- ❖ Dore, C. y Murphy, M., 2012. “Integration of Historic Building Information Modelling (HBIM) and 3D GIS for Recording and Managing Cultural Heritage Sites” en *18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*. VSMM 2012 Virtual Systems in the Information Society. 2 - 5 Septiembre 2012 Milan, Italia, pp. 369-376.



- ❖ Fantini, F., 2010. “Image Based Data Processing (IBDP): la restituzione attraverso displaced subD a partire da rilevamento laser scanner” en Mandelli, E. y Velo, U. (ed.) *Il modello in architettura. Cultura scientifica e rappresentazione*. Materia e Geometria. Alinea Editrice. Florencia. pp. 1-10.
- ❖ Fantini, F., 2011. “La modellazione in Displaced sub-D. Modelli a dettaglio variabile da scansione laser” en Verdiani, G. (ed.), *Il ritorno all'immagine, nuove procedure image based per il Cultural Heritage*. Lulu.com, pp. 37-72. (última visita: 13/12/2013)
- ❖ Fantini, F., 2012. “Modelos con nivel de detalle variable realizados mediante un levantamiento digital aplicados a la arqueología” en *Revista EGA (Expresión Gráfica Arquitectónica)*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, pp. 306-217.
- ❖ Fantini, F., Rodríguez-Navarro, P. y Di Tondo, S., 2012. “Il problema della mappatura del colore nei modelli digitali 3d a displaced subdivision surface da rilevamento laser scanner in ambito archeologico” en Rossi, M. y Siniscalco, A., (ed.) *Colore e colorimetrica. Contributi multidisciplinari. Vol. VIII A*. Dip. Indaco. Politecnico di Milano, pp. 31-38.
- ❖ Guidi, G. y Remondino, F., 2012. “3D Modelling from Real Data” en *Modelling and Simulation in Engineering*. Edited by Catalin Alexandru, InTech, 3 de Marzo, pp. 69-102.
- ❖ Guidi, G., Russo, M. y Angheluddu, D. 2013. “Digital reconstruction of an archaeological site based on the integration of 3d data and historical sources” en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 2013 3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 25 – 26 Febrero, Trento, Italia, pp. 99-105.
- ❖ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. McGraw-Hill. Italia.
- ❖ Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, JL., 2010. “Fundamentos y aplicaciones de la tecnología de Escáner Láser para documentación y restauración del patrimonio. Algunos ejemplos de aplicación en La Comunidad Valenciana” en Alcántara Onofre, A., Lara Gutiérrez, A. M. (ed.) *Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano*. Ciudad de México: Universidad Politécnica de Valencia, pp. 17-41.
- ❖ Koska, B. y Křemen, T., 2013. “The combination of laser scanning and structure from motion technology for creation of accurate exterior and interior orthophotos of St. Nicholas Baroque church” en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 2013 3D-ARCH 2013 - 3D Virtual*



Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25 – 26 Febrero, Trento, Italia, pp. 133-138.

- ❖ Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M. y Villaverde V., 2010. “Terrestrial Laser Scanning and Close Range Photogrammetry for 3D Archaeological Documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló As a Case Study” en *Journal of Archaeological Science* 37. Elsevier, pp. 499–507.
- ❖ Lerma, J.L., Cabrelles, M., Navarro, S., and Seguí, A.E., 2011. “La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser” en *Documentación gráfica del patrimonio*, Ministerio de Cultura, pp. 108-117.
- ❖ Manferdini, A.M. y Remondino, F., 2010. “Modellazione 3D da immagini Perperline fotogrammetrica” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 162-199.
- ❖ Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A. y Blanco-Rotea, R., 2008. “Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)” en *Arqueología de la arquitectura*. 5 enero-diciembre, Madrid / Vitoria. pp. 15–32.
- ❖ Marambio, A., Pucci, B., Nuñez, M.A. y Buill, F., 2009. “La aplicación del escáner láser terrestre en la catalogación del patrimonio arquitectónico del casco histórico de Castellfollit de la Roca” en *VIII Semana Geomática Internacional*, pp. 1-8.
- ❖ Marangoni, R. y Geddo, M., 1996. *Le immagini digitali. Formati e gestione*. Hoepli Informatica. Milán.
- ❖ Merlo, A., 2007. “Dal “modelo” della città ai Sistemi Informativi Urbani: Sorana 3D” en Docci, M. (ed.) *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell’architettura e della città*. Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell’architettura. Sapienza, Università di Roma. Gangemi Editore. Roma, pp.114-117.
- ❖ Migliari, R., 2012. “La Geometria descrittiva nel quadro storico della sua evoluzione dalle origini alla rappresentazione digitale” en Carlevaris, L., De Carlo, L. y Migliari, R. (ed.) *Attualità della Geometria descrittiva. Seminario nazionale sul rinnovamento della Geometria descrittiva*. Sapienza Università di Roma. Roma, pp. 15-42.
- ❖ Remondino, F. y El-Hakim, S. (ed.), 2007. 2nd International Workshop "3D-ARCH'07" - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 12-13 July, ETH Zurich, Suiza.



- ❖ Remondino, F., Lo Buglio, D., Nony, N. y De Luca, L., 2012. “Detailed primitive-based 3d modeling of architectural elements” en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5*. XXII ISPRS Congress, 25 Agosto – 01 Septiembre 2012, Melbourne, Australia, pp. 285-290.
- ❖ Riveiro Rodríguez, B., Armesto González, J., González Jorge, H., Arias Sánchez, P., 2011. *Manual práctico para modelado 3D con escáner láser RIEGL LMS Z390 y software RISCAN PRO*. ETS de Ingenieros de Minas. Universidad de Vigo.
- ❖ Rodríguez Navarro, P., 2012. “La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos” en *Revista EGA (Expresión Gráfica Arquitectónica)*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, pp.100-111.
- ❖ Thomas, D., Orland, K., Steinberg, S., 2007. *The videogame style guide and reference manual*. Power Play Publishing, p. 62.
- ❖ Verdiani, G., 2003. *Il battistero di Pisa, rilievo e rappresentazione digitale tra ricerca e innovazione*. Dottorato di ricerca. Rilievo e Rappresentazione dell’Architettura e dell’Ambiente. XV Ciclo. Università degli Studi di Firenze. Florencia.
- ❖ Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D. Y Haala, N., 2013. “Image acquisition and model selection for multi-view stereo” en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W1, 2013 3D-ARCH 2013 - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 25 – 26 Febrero, Trento, Italia, pp. 251-258.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje
Isabel Martínez-Espejo Zaragoza



Tesis Doctoral

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES



A. CONCLUSIONES EN ESPAÑOL

La tesis se presenta, conforme a su estructura, como un documento dividido en dos partes: una parte introductoria, compuesta por el *abstract*, la introducción y el estado del arte de los sistemas de levantamiento innovadores actuales y de restitución; y una segunda parte que supone el desarrollo en sí de ésta, compuesta por 4 casos de estudio y un capítulo de terminología, que permiten una comparación lexical y un análisis detallado, en el ámbito de la integración de los diferentes métodos de levantamiento con herramientas avanzadas y su restitución.

El aporte de esta tesis tiene una doble naturaleza, por un lado una parte operativa y por el otro una parte teórica. El desarrollo de ésta se presenta como un estudio detallado sobre la modelación 3D a partir de la integración mediante diferentes técnicas avanzada de levantamiento tridimensional. Los cuatro capítulos de casos de estudios son una parte aplicativa que integra los diversos métodos de levantamiento, que permiten obtener modelos tridimensionales con o sin textura, funcionales o no para operaciones de anastilosis, el mapeado riguroso del color sobre ellos, el uso de la fotogrametría aérea a partir de UAV, pero que en todo caso permiten una integración entre ellos. Aunque en algunos casos se realiza su comparación, no es su finalidad, y esta comparación se realiza solo para comprobar la posible fusión de éstos manteniendo el alto nivel de detalle que los caracteriza.

En el primero caso de estudio, se utilizan dos sistemas de levantamiento de diferente nivel de precisión, pero de igual categoría (sensores activos), uno para objetos pequeños y otro para objetos de mayor tamaño. Dicho uso, permite confrontar el uso de ambos para obtener un único modelo 3D en el cual realizar todas las pruebas necesarias para el fin buscado, la anastilosis de la bóveda. En el segundo caso de estudio, se realiza una comparación entre dos sistemas diversos (sensores activos y pasivos) para analizar la posibilidad de esta unión formando un solo modelo. En estos dos primeros casos, se le da una exclusividad al tema de la morfología, descartando el interés por textura, no siendo relevante en ambos casos.

En el tercer caso de estudio, siguiendo en la vertiente de la integración, la forma pierde la exclusividad dividiéndose con la textura, que cobra importancia. Este caso, además, tiene una finalidad también funcional. Presenta como primer objetivo realizar una serie de experimentaciones funcionales a una restauración: ejecutar las integraciones de las partes faltantes de un fresco. Este objetivo, se utiliza, a su vez, como pretexto para efectuar diversas experimentaciones sobre otros sistemas de levantamiento externos al escáner láser (herramienta preponderante hasta el momento). Se emplean programas de foto-modelación para resolver el problema de la textura de alta definición, en particular, el *Agisoft Photoscan* y el *Eos Systems PhotoModeler*. Se usa, además, un programa de modelación 3D (fuera del campo del levantamiento), *Luxology Modo*, unido a *PhotoModeler*, para la fase de proyección de fotogramas.

Para el tema de la textura se prueban dos vías diversas, buscando una alta precisión morfológica acompañada de una alta resolución cromática. Se debe aclarar que, si se marca como único objetivo la integración a través de diseños bidimensionales, el uso del escáner láser



es suficiente, pero si se presenta a su vez la necesidad de obtener una imagen de alta calidad cromática, entra en juego la experimentación con técnicas de *Image-based Modelling*, por ser este el camino considerado más adecuado para llegar a dicha finalidad.

La primera vía usada es aquella en la que el modelo se obtiene a partir de un levantamiento con escáner láser y se utiliza el programa de fotogrametría solo para encontrar la posición relativa de las cámaras con respecto al modelo, usando después programas de *Reverse Modelling* para aplicarle la textura. El resultado a nivel morfológico es el mejor, ya que el modelo proviene directamente del levantamiento mediante *Range-based Modelling* pero presenta cierta discordancia en la textura, en las zonas de unión entre fotogramas. La segunda vía, consiste en obtener todo el modelo (morfología y textura) mediante técnicas de *Image-based Modelling*. Se usan programas como *Agisoft PhotoScan* o *PhotoModeler*, integrados o separadamente, dando buenos resultados, sea sobre el perfil de la exactitud, pero sobre todo desde un punto de vista de fiabilidad cromática.

De esta doble vía se consigue obtener un modelo de alta definición morfológica (a partir del levantamiento con el escáner) y un modelo de alta definición cromática (mediante técnicas de *Image-based Modelling*). ¿Dónde nace el límite? Para generar el desarrollo en 2D, con textura, buscado de la bóveda (objetivo principal del caso de estudio), los programas que actualmente están disponibles en el mercado no proporcionan soluciones simples. En consecuencia, visto que el modelo tridimensional adecuado, morfológicamente hablando, para los restauradores es el del escáner láser, se procede a una apertura manual. Considerando, a su vez, que en cualquier modo, esta apertura manual, que se ha realizado al modelo de escáner láser se puede aplicar también a cualquier modelo poligonal, siendo, sin embargo, una operación costosa, y no directa y automatizada. El problema, por lo tanto, es la falta de automatización que, en este momento, presentan algunos programas.

En el 4º caso de estudio, continuando con la experimentación de la integración con diversas técnicas de levantamiento se introduce la innovación del drone, modelación mediante fotogrametría aérea captada con UAV. Tanto en el 3 caso como en éste, se observa que el programa *Agisoft PhotoScan* es una de las vías más eficaces por la automatización del proceso usando técnicas de *Image-based Modelling*. Esta confirmación es importante, ya que pone en evidencia que cuanto más automático es un proceso y menor la intervención, este proporciona una fiabilidad mayor. El concepto es que si se introducen técnicas empíricas y se usan muchos programas, quizás se obtiene un buen resultado, pero se deben usar diversos filtros y cambios de formatos para la exportación e importación de los file. Todos estos pasajes introducen alteraciones en el file original, que quizás van en la dirección adecuada si el objetivo es obtener un buen modelo 3D mapeado, pero si nos quedamos solo en la parte de levantamiento, el discurso cambia, porque se debe continuamente verificar las alteraciones introducidas con respecto al dato original.

En este caso, tanto la fachada como la cubierta de la iglesia se obtienen mediante un proceso automatizado generando un modelo texturizado en *Agisoft PhotoScan 0.9.1.*, que como se comprueba puede fácilmente integrarse con el modelo de escáner láser. También en este caso, la



utilización de *Agisoft PhotoScan* demuestra su eficacia, tanto desde un punto de vista de la calidad de la *mesh* como cromático. No sucede lo mismo con el programa *Photomodeler*, que demuestra ser más costoso, presentando tiempos de procesado largos (*time consuming*) combinados con un trabajo por parte del operador mayor, generando a su vez una *mesh* que si bien permite un control puntual alto sobre el error, no es compensable con la calidad de la *mesh*, no aceptable en comparación con la calidad morfológica que presentan el resto de los modelos 3D.

Por lo tanto, se puede decir, después de este conjunto de experiencias, independientemente de la parte lexical, nomenclatura, etc., que cuanto más automatizadas son las soluciones, en línea de máxima, mejores son, y más fácil la integración entre los modelos resultantes. El aumento de operaciones manuales (como en el caso de la bóveda del Palacio Roncioni: tomar los puntos en *Rapidform*, importarlos en *Photomodeler*, después re-proyectar el fotograma...), genera un pipeline más largo y articulado, y no proporciona la precisión necesaria. Se puede declarar, por lo tanto, que aunque el programa *Photomodeler Scanner* es un buen programa en sí, cuando se trata de obtener modelos 3D, probado tanto en la iglesia como en el palacio Roncioni, aunque permite un gran control en cada una de los pasos individuales, después, esta capacidad de control no corresponde a una calidad de la restitución final, que sin embargo, para nosotros es lo más importante, porque nos interesa la calidad topológica de los modelos. Una alta calidad topológica de los modelos, permite una intervención más simple, una mayor correspondencia de los modelos y, por lo tanto, una mejor integración entre ellos. Como ya se ha dicho, la finalidad de la tesis no es analizar cuanto es mejor una técnica con respecto a otra, sino como hacer dialogar estos tipos de tecnologías.

Con esta premisa, se puede afirmar que, aunque el interés del arquitecto, va siempre unido a un estudio para obtener un conocimiento de la arquitectura, la intención del operador con un objetivo de integración entre modelos puramente técnico y científico, es la búsqueda de soluciones con una mayor eficacia productiva, considerando la posibilidad de que esta eficacia presente ciertos límites. Uno de estos límites es, por ejemplo, la imposibilidad de programas como el *Agisoft PhotoScan* de ver punto por punto cual es el error. La automatización comentada, como una ventaja, presenta la desventaja, en algunos programas, de lo que algunos expertos llaman la “*black box*” (caja negra), que no permite controlar los cálculos internos del programa paso a paso. Sin embargo, se puede estudiar la calidad general del modelo, de la textura, etc. Así, considerando la automatización general del proceso, se puede confirmar la preferencia hacia estas soluciones, ya que no son solo más eficaces desde un punto de vista del tiempo necesario sino también con respecto a la calidad del producto acabado, del modelo, que es nuestro objetivo.

Analizando cada caso de estudio por separado se pueden declarar las siguientes afirmaciones o conclusiones:

Del primer caso de estudio, “Restauración virtual: El caso de una bóveda gótica en Coves de Vinromá”, se deduce que los modelos obtenidos a partir del escáner a triangulación y del escáner TOF, pueden ser fusionados en un único modelo para permitir una reconstrucción



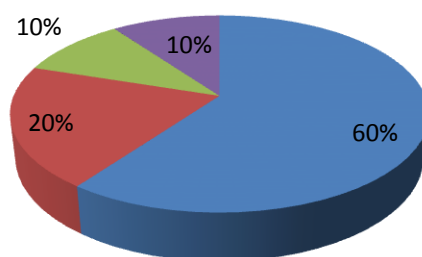
virtual. En el momento en el que se realiza este caso de estudio, no se considera la fotogrametría, pero debe comprenderse, también, que tratándose de un trabajo sobre arquitectura gótica, sobre todo, sobre trazas, montañas y reconstrucciones formales, el interés sobre la textura es mínimo. Así, se afirma que la fotogrametría no interesa, ya que existen tanto diversos sistemas para obtener modelos cuya finalidad sea el aspecto topológico, sin tener en cuenta la textura. En este caso de estudio, es importante el comprobar cómo es posible la integración entre modelos obtenidos con dos sensores activos con diferente nivel de detalle. Estos dos modelos independientes, convergen para ser filtrados con las técnicas propias de los análisis que se hacen en el ámbito de la arquitectura, se usan los esquemas gráficos y proyectuales que se utilizaban en el ámbito del gótico. Utilizando todo lo que ha llegado a través de los estudios de las bóvedas de esa época y tipología, se analizan los datos obtenidos con el escáner. Partiendo de diversos levantamientos, se integra todo en un único modelo para permitir hacer un elaborado estudio analítico.

Como se comprueba en el resultado, efectivamente este único modelo permite obtener una solución, difícilmente alcanzable sin esta tecnología de última generación. Estudiando la arquitectura gótica y observando en general, la primera idea marcaba que la bóveda fuese un casquete esférico. Sin embargo, gracias al levantamiento de pequeños objetos (las claves y las dovelas) y su integración a un objeto mayor (la capilla) es posible comprobar que no es la solución que cubriría la capilla mayor de la iglesia. Esto permite demostrar la utilidad de la integración de dos técnicas diferentes, escáner a triangulación y escáner TOF.

Toda la tesis se basa sobre este aspecto, la convergencia de los modelos obtenidos a partir de diversas técnicas para permitir su integración y obtener un único modelo con la máxima información y el máximo nivel de detalle posible (con o sin textura, con o sin superficies de subdivisión, etc.). El objetivo principal es la conversión de todo en un único modelo 3D, desde el cual en una segunda fase es posible realizar los diversos análisis que en cada momento precisan los arquitectos. Para dicha conversión es necesario el uso de varios programas, ya que como se ha comentado por ahora no es posible realizar todo el trabajo en un único programa.

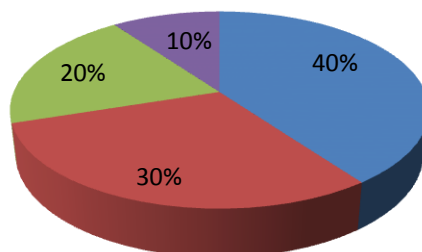
Tiempo de elaboración Range-based Modelling

■ Rapidform XOR3 ■ Luxology Modo ■ Cyclone 7 ■ Otros



Tiempo de elaboración Image-based Modelling

■ Rapidform XOR3 ■ PhotoModeler / PhotoScan ■ Luxology Modo ■ Otros



Figuras 9.01 y 9.02. Gráficos del tiempo de elaboración de las técnicas de *Range-based Modelling* y *Image-based Modelling*.

El 2º Caso de estudio, “Anastilosis virtual de modelos adquiridos mediante escáner láser: Piazza d’Oro dentro del Recinto Arqueológico de Villa Adriana (Tívoli, Roma)” combina los dos métodos de levantamiento del primer caso, pero además introduce la innovación del uso de *Image-based Modelling* (*Agisoft PhotoScan*) para la integración de los modelos realizados a partir de *Range-based Modelling*. Este estudio, datando su comienzo a finales del 2010, presenta en su momento un aspecto incoativo, ya que es uno de los primeros casos realizados. En este caso, el objetivo principal se centra en el uso instrumental de *Agisoft PhotoScan* para rellenar partes no detectables o partes que por la naturaleza misma de objeto no permiten un buen levantamiento mediante un escáner a triangulación. El escáner a triangulación presenta ciertas limitaciones, como el problema de la distancia, de la iluminación, del material o según la



morfología del objeto. Como se ha podido comprobar, el escáner a triangulación presenta una alta limitación debido a la distancia, requiere un rango de medición bastante marcado, presentando problemas si la distancia se reduce o se aumenta fuera de cierta holgura permitida. Por otra parte, este escáner también se ve influenciado por la iluminación, si ésta es demasiado alta, los resultados son en algunos casos la absoluta ausencia de algunas zonas levantadas. El material también se convierte en una limitación cuando éste no es totalmente opaco, como en el caso del vidrio o el mármol, ya que la reflectancia de los rayos emitidos por el escáner es diferente, no permitiendo realizarse una buena captura de la señal remitente. En el caso de la morfología, se hace evidente una buena respuesta en el caso de objetos con relieves, presentando, al contrario, problemas en la fase de alineamiento cuando el objeto exhibe partes demasiado planas. El *Agisoft PhotoScan* demuestra ser una solución óptima para resolver estos problemas y también en casos en los que la falta de detalles del objeto hace innecesario la inversión de tiempo que necesita el escáner, presentándose la fotogrametría como la opción más adecuada.

Alejándonos, sin embargo, del detalle podemos concluir, que en los dos primeros casos, el objetivo principal es la forma; entender diversas cosas sobre un objeto que ya no está presente. En estos dos casos, sirven los modelos integrativos, reconstructivos, pero no la textura, por lo que las técnicas de *Image-based Modelling* son únicamente utilizadas como integración. Con esto se pretende decir, que el uso de esta tecnología no es tan imprescindible, ya que se podría haber usado un escáner ToF, eligiendo una densidad alta, en las zonas que presentaban problemas al escáner a triangulación y el resultado habría sido el mismo.

Entendiéndose esto, se puede decir que los resultados son bastante positivos porque el tipo de error que se obtiene es bastante limitado, pudiendo resolverse mediante instrumentos de modelación, en programas de *reverse modelling*, mediante “*smoothing*” aplicado a las partes de superposición que no salen exactamente iguales.

En las otras dos experiencias no se muestra esta presencia del análisis desde un punto de vista de la interpretación. Los dos primeros casos son estudios más formales. Sin embargo, en el caso 3º, “Integración de frescos: Bóveda con frescos del Palacio Roncioni”, es justo que se considere que se parte de exigencias profesionales dentro del campo de la restauración. En este caso, se mantiene un cierto interés por la forma, pero cobra un alto protagonismo el color, la forma interesa junto al color. El objetivo final, en este caso, es el de obtener grandes tablas impresas, que sirvan como base para trabajar los restauradores. Por lo tanto, en este estudio la forma es importante pero pierde la exclusividad, debido a la alta importancia del color. Centrándonos en el problema, se presume que actualmente no existe un software que realice el desarrollo en 2D de la bóveda de un modo automático, ya que si bien existen soluciones, en fase de experimentación, sobre la conversión de un modelo *mesh* a una versión bidimensional con la textura, por ej. la parametrización (llamado comúnmente en los programas de “*entertainment*” los *UVmapping*), estos no son exactamente la solución al problema presente.

Con esta base, se realiza un estudio, basándose en la forma. Se analiza la tipología de las bóvedas, superficies compuestas generalmente de cilindros o conos, y mediante el uso de las



propiedades geométricas, se obtiene un desarrollo. Para el levantamiento se utiliza fundamentalmente el escáner TOF, con colorización del punto: el punto viene caracterizado del RGB y su reflectancia. También se realiza una campaña fotográfica destinada a una restitución fotogramétrica.

En el empleo de programas de fotogrametría se utilizan dos vías diferentes, como ya se comentaba, por un lado el uso integrado para la obtención de la geometría y de la forma con dos programas de foto-modelación, *Agisoft PhotoScan* y *Photomodeler*, de los cuales haremos valoraciones más adelante, y por otro, un sistema para aplicar la textura siempre unido a *Photomodeler* con un uso estrictamente unido a la operación de “alineación” de la cámara fotográfica, con el fin de encontrar los parámetros de orientación de la cámara. Esta segunda vía tiene como fin re-proyectar los fotogramas, con un sistema que se encuentra en los programas de modelación, y con ello, obtener una textura, fundamentalmente a partir de una imagen. Este sistema realiza el desarrollo del modelo mediante una *UVmap*, obtenida en el programa Modo (programa que pertenece al sector del *Entertainment*).

Las conclusiones que se pueden hacer sobre este caso específico están unidas a una fiabilidad que ha sido comprobada en el lugar. A través de la impostación de planos dentro de un programa de gestión de los datos del escáner láser, *Leica Cyclone*, se obtiene un desarrollo manual. El tipo de levantamiento realizado incluye el color y la reflectancia de la luz, por lo tanto mediante una discretización de la superficie continua sobre estos planos es posible obtener un resultado extremadamente fiable con respecto al perfil métrico del desarrollo. No se puede decir lo mismo del aspecto cromático, ya que es bastante decadente. Se puede afirmar que, a día de hoy, el escáner no da un resultado satisfactorio en los casos en los que prevalece la importancia del color. La resolución y la calidad de los fotogramas, capturados mediante máquinas fotográficas posicionadas dentro el escáner, es muy baja. Algunos escáneres presentan también la posibilidad de introducir una cámara externa, o sea, hacer un levantamiento y re-proyectar la imagen, pero aun así las soluciones no muestran la calidad esperada. Sin embargo, la situación es diversa cuando dentro del campo de la modelación geométrica, sobre la superficie se decide aplicar una imagen. Esta vía es más eficaz porque, aunque se debe trabajar más (tiene una fase manual de *UV mapping*, etc.), tiene bajo control mucho más la calidad, el resultado final.

Desde el punto de vista funcional, para los restauradores, el desarrollo de la bóveda en 2D a partir de la *mesh* obtenida con el escáner láser, es suficiente, considerando que con ello ya es posible obtener todos los perfiles y los límites de los frescos que la adornan, permitiendo esta operación de integración. Sin embargo, si se quiere aprovechar dicho levantamiento para tener una documentación del fresco de alta calidad, esto no es posible. Pensando en dicha posibilidad, se aprovecha este caso de estudio para realizar las pruebas que permiten incluir en un modelo de alta calidad morfológica, una alta calidad cromática.

Buscando este modelo con alta resolución cromática, se prueban dos programas de *Image-based Modelling*, *Photomodeler* y *Agisoft PhotoScan*. Ambos dan buenos resultados pero presentan ciertas diferencias. En el perfil operativo, el programa *Photomodeler* presenta el



problema de que para seguir la resección de la foto-cámara, o lo que es lo mismo, para encontrar los parámetros de los que se hablaba previamente, útiles para la proyección de las fotos sobre el modelo, la operación es larga, y compleja, presentando a su vez el inconveniente de que los resultados no son de alta calidad: aunque presenta un alto aspecto estético no se puede decir lo mismo del aspecto métrico de la re-proyección.

Por lo tanto, dadas las pruebas realizadas, y apoyándonos en los resultados especificados en el caso de estudio 3, se puede afirmar que, siguiendo un desarrollo de este modelo con las fotos re-proyectadas (haciendo el *baking* etc.), además de ser una vía más fatigosa, es una vía que no permite obtener suficiente exactitud.

Por otra parte, por cuanto concierne a los dos modelos obtenidos con *PhotoModeler* y *Agisoft PhotoScan*, para la obtención no solo de la estructura de la escena (el *network* de la foto-cámara) sino también para la generación del modelo, los dos programas no dan los mismos resultados.

Agisoft PhotoScan es la solución que, a pesar de ser casi fundamentalmente automatizada, no permitiendo una intervención, o un conocimiento puntual, como *PhotoModeler Scanner* (que permite estudiar punto por punto los errores), y desde un cierto punto de vista en contraposición a un estudio que se ponga como objetivo el análisis de la precisión morfológica, al mismo tiempo, en la integración entre modelos, éste permite obtener una *mesh* más limpia y, en consecuencia, una textura de calidad mayor. Este programa, además, presenta una mejor combinación entre los fotogramas individuales, una mayor homogeneización del color y una mayor calidad de la *mesh* a nivel morfológico.

Hasta aquí se puede, por lo tanto, afirmar, que el escáner es el método más eficaz, ya que toma además de la posición de los puntos en el espacio, el color, que aunque no es un color fiable al 100%, presenta una reflectancia que varía según la transición de la pintura de los colores claros y oscuros, mostrando una reflectancia diversa¹, y siendo una solución automática, en la que en una sola captura se obtiene toda la información, no influyendo acciones intermedias como puede ser la re-proyección (asociación entre punto en el espacio y pixel en los fotogramas obtenidos de la foto-cámara). Como solución automática se puede considerar también el *Agisoft PhotoScan*, ya que para la generación del modelo es necesaria solamente la impostación de un mínimo conjunto de parámetros. Además, en las últimas versiones permiten también obtener una fiabilidad mayor gracias a la introducción de un nuevo comando, “optimización”, que tiene en cuenta los parámetros internos de la cámara, obtenidos a través de un gran número de imágenes que hacen de red como sucede en el *PhotoModeler Scanner* en la fase de alineación (también llamada fase de registro).

Una carencia que se encuentra, por ejemplo, en estos programas de *Image-based Modelling* es la ausencia de instrumentos que permitan colocar planos de las posiciones que conocemos

¹ Es importante aclarar que para el tema de la restauración, en efecto, es suficiente con la reflectancia ya que documenta exactamente la forma definida del fresco sobre la superficie de la bóveda, pero no sería así si se busca la documentación del fresco en su color original.



exactamente, como los *reference plane* de *Leica Cyclone 7*. No hay instrumentos de desarrollo. Sí que presentan instrumentos de *UVmapping*, pero estos instrumentos, en todo caso, son diversos con respecto a un desarrollo que pueda servir a un restaurador.

Por último, en el cuarto caso de estudio, “Nueva herramienta para el levantamiento de cubiertas: Iglesia San Miniato en Marciana (Cascina, Pisa)” se introduce una nueva herramienta, el drone, la foto-modelación a partir de fotogrametría aérea. Para trabajar las fotografías capturadas desde el UAV, se prueban dos programas, como en el caso de estudio precedente. También en este caso, se observa que la calidad y la resolución de la *mesh* obtenida en las zonas comunes capturadas con el escáner a Tiempo de Vuelo (ToF) y mediante las técnicas de *Image-based Modelling* no son comparables. Sin embargo, comparando los dos modelos obtenidos mediante *Image-based Modelling*, el resultado, al igual que en el caso de la bóveda del Palacio Roncioni, es el mismo, la calidad de la *mesh* a nivel morfológico y topológico es superior en el modelo obtenido con *Agisoft PhotoScan*. Se debe comentar que este programa, aunque aún presenta ciertas limitaciones de control interno y es susceptible de mejoras, ha sufrido una gran evolución durante el ámbito temporal del desarrollo de la tesis. Ha cambiado y crecido muchísimo, permitiendo en el último caso de estudio conseguir un modelo de alta calidad morfológica y cromática. Mientras en un primer momento permitía solo producir modelos para hacer *render*, o sea, como una función accesoria, ahora, sin embargo, se ha convertido en una herramienta potente capaz de generar modelos que permiten una integración con los datos del escáner. (Por ej. La antigua versión de *Agisoft PhotoScan* no exportaba nubes densas, la nueva si, y por lo tanto da la posibilidad de exportarlas a programas como *Leica Cyclone 7*, permitiendo combinar elaborados extremadamente precisos). Como se ha visto antes, para la restauración del color, en los frescos, esta puede ser la solución, proyectar la información cromática de la versión de *Agisoft PhotoScan* a la nube de puntos del escáner. Además, permite confrontar datos que provienen de instrumentación diversa, como escáner láser terrestre, UAV, etc.

La integración de modelos, y consecuentemente, de las técnicas de modelación, es fundamental, y resulta, por lo tanto, importante, sea para el análisis de carácter arquitectónico que para aquel que están unido a técnicas de intervención, como en el caso de la bóveda principalmente.

La introducción del drone es importante para las técnicas de intervención, pero sobre todo es importante porque introduce una nueva posibilidad para el levantamiento en zonas no accesibles o de difícil accesibilidad (ej. La cubierta). Otra ventaja del drone, es la posibilidad a nivel de seguridad en la obra, como por ejemplo si es necesario hacer un levantamiento de una iglesia en ruinas tras un terremoto. Entre ir una persona a hacer el levantamiento y utilizar un UAV, la elección es clara, tanto a nivel económico como “social”, ya que el uso de máquinas es cada vez más rentable mientras que la intervención de personas siempre incluye un gasto en seguros que aumenta notablemente el precio, si se quiere analizar desde un punto de vista económico, dejando de lado el punto de prevención y seguridad de riesgos laborales.



La diferencia entre modelos basados en técnicas de *Image-based Modelling* y *Range-based Modelling* se ha reducido notablemente, ya que la fiabilidad de los modelos realizados con el primer tipo está muy unida a la capacidad de una persona de estructurar apropiadamente el *network* (la posición de las diferentes cámaras respecto al objeto). Desde este punto de vista, el dron, ha supuesto un gran avance, ya que permite eliminar uno de los problemas más frecuentes, presente siempre que se efectúa un levantamiento de elementos cercanos, las capturas en el plano vertical. Un ejemplo claro son las casas, con una cámara es posible captar esencialmente un plano horizontal, se puede intentar hacer una zona más amplia usando el zoom, pero en definitiva se obtiene un plano de desarrollo del objeto esencialmente horizontal. Por ello la fiabilidad de este levantamiento será muy elevada en la parte inferior y mucho menor en la superior. En el caso del dron, el *network* tiene una cierta flexibilidad mayor, da la posibilidad de documentar el objeto desde varias partes y, en consecuencia, aumentar la capacidad. Permite acercar el levantamiento fotogramétrico al del escáner láser, integrándolo.

Cerrando las conclusiones particulares de cada caso de estudio, se afirma que en general, la integración es el futuro, no solo en el ámbito de la modelación 3D, sobre la cual buena parte de la tesis está girando, sino en el acercamiento entre programas de fotogrametría y aquellos que sirven para el tratamiento de datos del láser escáner. De tal modo que, la profesionalidad de programas de fotogrametría que trabajan en modo extremadamente automatizado, nos permitan obtener no solo datos de alta calidad para permitir una buena integración con el láser escáner, sino también que permitan una absoluta combinación.

Se puede comprender esta tesis, además, como una evolución que va desarrollándose al mismo tiempo que los programas que van apareciendo y por lo tanto las técnicas de modelización. El programa *Agisoft PhotoScan* pasa de ser una herramienta de *Computer Vision* (para uso visivo más que técnico) a un programa que genera modelos comparables con los del escáner. La restitución en 3D, también va sufriendo una evolución en la tesis, que pasa de un interés centrado únicamente en la forma (ya que el tema del color presenta aún demasiados problemas²) a un interés por la restitución total que genere modelos similares a la realidad, modelos tridimensionales de alta resolución en forma y color. Hoy, gracias a la implementación de sistemas siempre más avanzados, se combina la posibilidad de mantener la ventaja de la automatización y la posibilidad de generar modelos donde a la alta resolución morfológica se le suma la alta resolución cromática. Esto es un aspecto importante, ya que se puede pensar que, en un futuro inmediato, se presente como solución, una metodología bastante útil basada en la realización de modelos fotogramétricos y modelos láser escáner juntos. De manera tal que se pueda obtener los beneficios de los dos a la vez, la potencialidad mejor de uno y del otro: escáner láser para la forma y las técnicas de *Image-based Modelling* para el color.

Esta tesis, se ve altamente influenciada por el transcurso del tiempo: la evolución y el paso del tiempo son la clave. Años atrás la fotogrametría era una solución concerniente solo a los expertos de topografía. Hoy, con estos sistemas, se ha convertido en algo más cercano y fuera de un ámbito tan específico, los topógrafos han dado soluciones en las que el programa hace

² Ver las actas de *Conferenza Nazionale del colore*, Florencia, 19-20 Septiembre 2013 y *Conferenza Nazionale del colore*, Roma, Septiembre 2011.



casi todo en automático. Evidentemente, esto no solo interesa a los arquitectos sino que interesará también a aquellos que vienen del otro sector, el de la ingeniería. Es importante señalar, que los desarrolladores de los programas están escuchando las peticiones que vienen de ambos sectores. En la actualidad la fotogrametría ha vuelto a tomar un puesto relevante dentro del levantamiento de bienes culturales, algo que no sucedía pocos años atrás³. Los desarrolladores de software han demostrado la voluntad de dar a las personas que trabajan en el sector de la geomática o de la fotografía, instrumentos que de alguna manera compensen, la ya comentada “*black box*”, que supone el no saber exactamente el trabajo interno del programa. Se sabe que tienen sistemas de reconocimiento de la forma, que calcula los parámetros de la cámara, etc., pero mientras en el *PhotoModeler Scanner* es mostrado todo de forma explícita, no es el caso de programas como *Agisoft PhotoScan*. Sin embargo, se ve una continua evolución, en la que cada vez son más los datos proporcionados para permitir hacer un levantamiento certificado en el que se pueda controlar cuales son los errores que vienen realizados por dichos programas.

Se puede afirmar que, por un lado, el beneficio de los sensores activos es innegable, pero al mismo tiempo la profesionalización o la mejora cualitativa de los programas de fotogrametría está permitiendo unir estos dos modelos en modelos que en cualquier caso sintetizan al máximo la calidad bajo el perfil de la medida y del color.

Sin embargo, una de las cuestiones actualmente abiertas en la investigación es la de proporcionar a los desarrolladores de software la idea de introducir en los programas instrumentos fiables para los objetivos de los restauradores. Los programas de *Reverse modelling* nacen para satisfacer las exigencias de ingenieros o diseñadores, *Agisoft PhotoScan* o *Photomodeler Scanner*, la de los topógrafos, pero a partir de este estudio se comprueba que aún, en este momento, existen carencias en los programas para las necesidades específicas que presentan los restauradores. A lo largo de los diferentes casos de estudio, se comprueba, en diversas ocasiones, los problemas debidos a la necesidad de exportar e importar por no encontrar en un único programa las herramientas que permitirían realizar todo el proceso, desde el levantamiento mediante fotografías o escáner láser hasta la restitución final del modelo.

Así se puede concluir que con este conjunto de experiencias se va siguiendo, a su vez, la evolución y las mejoras que van surgiendo en el mundo de levantamiento y la restitución. Además, se puede afirmar que también la terminología, es muy importante, porque el vocabulario de los arquitectos (que son los que se dedican principalmente a la construcción de modelos 3D) se está acercando, en un aspecto más profesional, a estos instrumentos, cosa que antes ocurría menos.

La cuestión terminológica ha sido afrontada con la voluntad de efectuar una comparación lexical entre los 3 idiomas. Como se comenta en la introducción de la tesis, apoyado por diferentes expertos del campo, se ha observado una carencia de paridad en el uso del lenguaje técnico que usan los expertos en el campo del levantamiento y la restitución en 3D. Observándose continuamente esta falta de igualdad y uniformidad en los términos, se presenta

³ Conferencia de Remondino en Corso MICMAC, Politecnico di Torino. 3 - 6 febrero 2014.



en el último capítulo de la tesis un estudio de la terminología específica, en la que se comparan términos y permite marcar en los 3 idiomas un concepto y los términos que se utilizan para referirse a él. Con este capítulo se pretende aportar una homogeneidad en la terminología no obtenida hasta ahora en dicho ámbito, y comentada por diversos autores (Amoruso, G., Apollonio, F.I., Remondino, F., 2010, Guidi y Remondino, 2012).

B. CONCLUSIONES EN ITALIANO (*CONCLUSIONI*)

La tesi si presenta conformemente alla sua struttura, come un documento diviso in due parti: una parte introduttiva, composta dall'abstract, l'introduzione e lo stato dell'arte dei sistemi di rilievo innovativi attuali e di restituzione; e una seconda parte contenente lo sviluppo di essa, con quattro casi di studio e un capitolo di terminologia, che permette una comparazione lessicale e un'analisi dettagliata, nell'ambito dell'integrazione dei diversi metodi di rilievo con strumenti avanzati e la loro restituzione.

Il contributo di questa tesi ha una duplice natura, una parte operativa e un'altra teorica. Lo sviluppo di quest'ultima si presenta come uno studio dettagliato di modellazione 3D, a partire dall'integrazione mediante differenti tecniche avanzate di rilievo tridimensionale. I quattro capitoli di casi di studio sono una parte applicativa che integra i diversi metodi di rilievo, che permettono di ottenere modelli tridimensionali con o senza *texture*, funzionali o meno per operazioni di anastilosi, la mappatura rigorosa del colore su di essi e l'uso della fotogrammetria aerea a partire da UAV. Ognuno di questi casi, seppur in modo diverso, consente l'integrazione tra i vari metodi di rilievo. Sebbene in alcuni casi il confronto si realizza tramite comparazione, la sua finalità non è questa, perchè questo confronto viene eseguito solo per verificare l'eventuale fusione di essi per mantenere elevato il livello di dettagli che li caratterizza.

Nel primo caso di studio si utilizzano due sistemi di rilievo con differente livello di precisione ma di medesima categoria (sensori attivi), uno per oggetti piccoli e l'altro per oggetti di dimensioni maggiori. Questo studio permette di confrontare l'uso di entrambi i sistemi per ottenere un unico modello 3D nel quale realizzare tutte le prove necessarie per il fine ricercato: l'anastilosi della volta. Nel secondo caso di studio, invece, si realizza una comparazione tra due sistemi diversi (sensori attivi e passivi) per analizzare le possibilità di un'unione formando un solo modello. In questi primi due casi, si dà un'esclusività al tema della morfologia, scartando l'interesse per la *texture* che in entrambi i casi non è rilevante.

Nel terzo caso di studio, dal punto di vista dell'integrazione, la forma perde la sua esclusività dividendosi con la *texture* che acquista importanza. Questo caso, inoltre, ha anche una finalità funzionale. Presenta come primo obiettivo la realizzazione di una serie di sperimentazioni funzionali su una restaurazione: effettuare le integrazioni delle parti mancanti di un affresco. Questo obiettivo si utilizza allo stesso tempo come pretesto per effettuare diverse sperimentazioni su altri sistemi di rilievo estranei allo scanner laser (strumento predominante fino a questo momento). Si utilizzano programmi di foto-modellazione per risolvere il problema della *texture* di alta definizione, in particolare vengono utilizzati: *Agisoft Photoscan*,



ed *Eos Systems PhotoModeler*. Viene anche usato un programma di modellazione 3D (fuori dal campo del rilievo) chiamato *Luxology Modo* unito a *PhotoModeler* per la fase di proiezione dei fotogrammi.

Per quanto riguarda la *texture* si tentano due percorsi diversi, cercando di ottenere un'alta precisione morfologica accompagnata da un'alta risoluzione cromatica. Si deve chiarire che, se si insegue come unico obiettivo l'integrazione attraverso il disegno bidimensionale, l'uso dello scanner laser è sufficiente, però se si presenta a sua volta la necessità di ottenere un'immagine di alta qualità cromatica entra in gioco la sperimentazione con le tecniche di *Image-based Modelling*, in quanto questo percorso è il più appropriato per raggiungere tale obiettivo.

Il primo percorso seguito è quello in cui il modello si ottiene a partire da un rilievo con scanner laser e si utilizza il programma di fotogrammetria solo per individuare la posizione relativa delle telecamere rispetto al modello, usando successivamente programmi di *Reverse Modelling* per poter applicare la *texture*. Il risultato a livello morfologico sarà dunque migliore, perchè il modello proviene direttamente dal rilievo mediante *Range-Based Modelling* ma presenta una certa discordanza nella *texture* nella zona di unione tra i fotogrammi. La seconda strada consiste nell'ottenere tutto il modello (morfologia e *texture*) mediante tecniche di *Image-Based Modelling*. Per questo si usano programmi come *Agisoft Photoscan* o *Photo Modeler*, integrati tra loro o separatamente, dando buoni risultati, sia sul profilo dell'accuratezza, ma soprattutto dal punto di vista dell'affidabilità cromatica.

Da questo doppio percorso si riesce a ottenere un modello ad alta definizione morfologica (dal rilievo con il laser scanner) e un modello ad alta definizione cromatica (utilizzando tecniche di *Image-based Modelling*). Dove nasce il limite? Per generare lo sviluppo in 2D (con *texture*) cercato della volta (obiettivo principale del caso di studio), i programmi che sono attualmente disponibili sul mercato non forniscono soluzioni semplici. Di conseguenza, dato che il modello tridimensionale adeguato, morfologicamente parlando, per i restauratori è quello del laser scanner, si procede all'apertura manuale. Considerando, allo stesso tempo, che in ogni caso, questa apertura manuale che è stata fatta sul modello di laser scanner è applicabile a qualsiasi modello poligonale, essendo tuttavia un'operazione costosa, e non diretta e automatizzata. Il problema dunque è la mancanza di automazione che in questo momento presentano alcuni programmi.

Nel quarto caso di studio, continuando con la sperimentazione dell'integrazione con varie tecniche di rilievo, viene introdotta l'innovazione del drone (modellazione da fotogrammetria aerea catturata da UAV). Sia nel terzo caso che in questo, si osserva che il programma *Agisoft PhotoScan* è uno dei modi più efficaci per l'automatizzazione del processo utilizzando tecniche di *Image-based Modelling*. Questa conferma è importante, poiché dimostra che quanto più automatico è un processo meno lo è l'intervento e questo offre una maggiore affidabilità. Il concetto è che se vengono introdotte tecniche empiriche e utilizzati molti programmi, si può ottenere un buon risultato, ma è necessario utilizzare diversi filtri e modifiche del formato per l'esportazione e l'importazione dei file. Tutti questi passaggi causano delle alterazioni al file originale, che possono andare nella giusta direzione se l'obiettivo è quello di ottenere un buon



modello 3D mappato, ma il discorso cambia se rimaniamo solo nella parte del rilievo, poiché si devono continuamente verificare le alterazioni introdotte ai dati originali.

In questo caso, sia la facciata sia il tetto della chiesa sono ottenuti attraverso un processo automatizzato generando un modello texturizzato da *Agisoft PhotoScan 0.9.1.*, che, come si verifica, può essere facilmente integrato con il modello di scanner laser. Anche in questo caso, l'uso di *Agisoft PhotoScan* dimostra la sua efficienza, sia dal punto di vista della qualità della *mesh* che dal punto di vista cromatico. Non succede così con il programma *Photodeler*, che risulta essere più costoso, presentando lunghi tempi di elaborazione (*time consuming*) combinati con un maggiore lavoro da parte dell'operatore, e generando allo stesso tempo una *mesh* che anche se permette un alto controllo puntuale sull'errore, non compensa con la sua qualità, e ciò non è accettabile in confronto alla qualità morfologica che presentano gli altri modelli 3D.

Pertanto si può dire, dopo questa serie di esperienze, qualunque sia la parte lessicale, nomenclatura, ecc., che le soluzioni più automatizzate sono in linea di massima le migliori, ed è più facile l'integrazione tra i modelli risultanti. L'aumento di operazioni manuali (come nel caso della volta del Palazzo Roncioni: prendere i punti in *Rapidform*, importarli in *Photodeler*, poi ri-progettare il fotogramma...), genera una *pipeline* più lunga e articolata, e non fornisce la precisione necessaria. È possibile dichiarare quindi, che, anche se il programma *Photodeler* è un buon programma in sé, quando si tratta di ottenere modelli 3D, testati sia nella chiesa che nel Palazzo Roncioni, anche se permette un grande controllo in ciascuna delle fasi individuali, in seguito, questa capacità di controllo non corrisponde a una qualità della restituzione finale, che tuttavia, per noi è la più importante, perché ci interessa la qualità topologica dei modelli. Un'alta qualità topologica dei modelli, permette un semplice intervento, una migliore corrispondenza dei modelli e, di conseguenza, una migliore integrazione tra loro. Come già detto, lo scopo della tesi non è analizzare quanto sia meglio una tecnica rispetto ad un'altra, ma come far dialogare questi tipi di tecnologie.

Con questa premessa, si può affermare che, sebbene l'interesse dell'architetto, sia sempre legato a uno studio per ottenere una conoscenza dell'architettura, l'intenzione dell'operatore con un obiettivo di integrazione tra modelli puramente tecnici e scientifici, è quello di trovare soluzioni con una maggiore efficienza produttiva, considerando la possibilità che questa efficienza abbia effettivamente dei limiti. Uno di questi limiti è, per esempio, l'incapacità di programmi come *Agisoft PhotoScan* di vedere punto per punto qual è l'errore. L'automazione, riportata come vantaggio, ha lo svantaggio, in alcuni programmi, quello che alcuni esperti chiamano la "black box" (scatola nera), di non permettere di controllare i calcoli interni del programma passo dopo passo. Tuttavia, si può studiare la qualità complessiva del modello, della *texture*, ecc. Pertanto, considerando l'automazione globale del processo, si può confermare una preferenza per queste soluzioni, poiché sono non solo più efficaci dal punto di vista del tempo richiesto, ma anche per quanto riguarda la qualità del prodotto finito, il modello, che è il nostro obiettivo.

Analizzando ogni caso di studio separatamente si possono dichiarare le seguenti affermazioni o conclusioni:



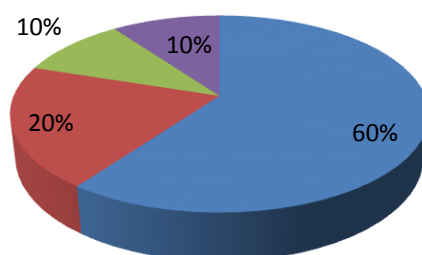
Dal primo caso di studio, "Restauro virtuale: Il caso di una volta gotica in Coves de Vinromá", si deduce che i modelli ottenuti dallo scanner a triangolazione e dallo scanner TOF, possono essere uniti in un unico modello per consentire una ricostruzione virtuale. Nel momento in cui viene realizzato questo caso di studio, la fotogrammetria non viene considerata, ma si dovrebbe anche comprendere che, essendo un lavoro sull'architettura gotica, specialmente su tracce, battute ed ricostruzioni formali, l'interesse sulla *texture* è minimo. Quindi, si afferma che la fotogrammetria non interessa, dato che ci sono tanti sistemi per ottenere modelli la cui finalità sia l'aspetto topologico, a prescindere dalla *texture*. In questo caso di studio, è importante dimostrare come sia è possibile l'integrazione tra modelli ottenuti con due sensori attivi con diverso livello di dettaglio. Questi due modelli indipendenti, convergono per essere filtrati con le tecniche proprie delle analisi che si effettuano nel campo dell'architettura, vengono utilizzati gli schemi grafici progettuali che si utilizzavano nell'ambito del gotico. Usando tutto ciò che è arrivato attraverso gli studi delle volte di questo periodo e tipologia, si analizzano i dati ottenuti con lo scanner. Sulla base dei vari rilievi, si integra il tutto in un unico modello per consentire uno elaborato studio analitico.

Come si può vedere nel risultato, effettivamente questo unico modello permette di ottenere un esito difficilmente raggiungibile senza questa tecnologia di ultima generazione. Studiando l'architettura gotica e osservando in generale, la prima idea indicava che la volta fosse un *casquete* sferico. Tuttavia, grazie al rilievo di piccoli oggetti (le chiavi e i segmenti di arco) e la loro integrazione in un oggetto più grande (la cappella) è possibile verificare che non è la soluzione che copriva il presbiterio della chiesa. Questo permette di dimostrare l'utilità dell'integrazione delle due diverse tecniche, scanner a triangolazione e scanner TOF.

L'intera tesi si basa su questo aspetto, la convergenza dei modelli ottenuti partendo da diverse tecniche per permettere la loro integrazione e ottenere un unico modello con il massimo di informazioni e massimo livello di dettaglio possibile (con o senza *texture*, con o senza le superfici di suddivisione, ecc). L'obiettivo principale è quello di convertire tutto in un unico modello 3D, dal quale in una seconda fase, è possibile realizzare le varie analisi che in ogni momento richiedono gli architetti. Per questa conversione è necessario l'uso di diversi programmi, poiché come si è discusso finora non si può fare tutto il lavoro con un unico programma.

Tempo di elaborazione Range-based Modelling

■ Rapidform XOR3 ■ Luxology Modo ■ Cyclone 7 ■ Altri



Tempo di elaborazione Image-based Modelling

■ Rapidform XOR3 ■ PhotoModeler / PhotoScan ■ Luxology Modo ■ Altri

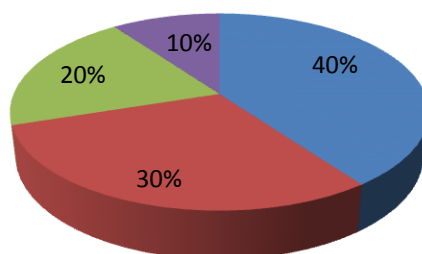


Figure 9.03 y 9.04. Grafici del tempo di elaborazione nel caso di *Range-based Modelling* e *Image-based Modelling*.

Il secondo caso di studio, "Anastilosi virtuale di modelli acquisiti da scanner laser: Piazza d' Oro nel Sito Archeologico di Villa Adriana (Tivoli , Roma)" combina i due metodi di rilievo del primo caso, ma introduce anche l'innovazione dell'utilizzo di *Image-based Modelling* (*Agisoft PhotoScan*) per l'integrazione di modelli realizzati da *Range-based Modelling*. Questo studio, il cui inizio risale alla fine del 2010 , presenta allo stesso tempo un aspetto innovativo, poiché è uno dei primi casi realizzati. In questo caso, l'obiettivo principale è l'uso strumentale di *Agisoft PhotoScan* per riempire parti non rilevabili o parti che per la natura stessa dell'oggetto non consentono un buon rilievo mediante uno scanner a triangolazione. Lo scanner a triangolazione presenta alcune limitazioni, come il problema della distanza, dell'illuminazione, del materiale o della morfologia dell'oggetto. Come si è potuto verificare, lo scanner a



triangolazione presenta una alta limitazione dovuta alla distanza, richiede un intervallo di misurazione piuttosto marcato, presentando problemi se la distanza si riduce o aumenta oltre una certa ampiezza consentita. Inoltre, questo scanner è influenzato anche dall'illuminazione, se è troppo alta, i risultati sono in alcuni casi la totale mancanza di alcune aree di rilievo. Il materiale diventa anche una limitazione quando non è completamente opaco, come nel caso del vetro o del marmo, poiché la riflettanza dei raggi emessi dallo scanner è diversa, non permettendo di eseguire una buona cattura del segnale mittente. Per la morfologia, si fa evidente una buona risposta nel caso di oggetti con rilievi, mostrando, al contrario, problemi nella fase di allineamento quando l'oggetto esibisce parti troppo piatte. L'*Agisoft PhotoScan* dimostra essere una soluzione ottimale per risolvere questi problemi e anche nei casi in cui la mancanza di particolari dell'oggetto rende non necessario l'investimento di tempo di cui ha bisogno lo scanner, presentandosi la fotogrammetria come l'opzione più appropriata.

Allontanandoci, tuttavia, dal particolare si può concludere che nei primi due casi, lo scopo principale è la forma; capire diverse cose su un oggetto che non è più presente. In questi due casi, servono i modelli integrativi, ricostruttivi, ma non la *texture*, essendo le tecniche di *Image-based modelling* unicamente usate come integrazione. Questo vuol dire che l'uso di questa tecnologia non è essenziale, poiché si sarebbe potuto utilizzare uno scanner TOF, scegliendo una alta densità, nelle aree che presentavano problemi con lo scanner a triangolazione e il risultato sarebbe stato lo stesso.

Capendo questo, si può dire che i risultati sono molto positivi, perché il tipo di errore che si ottiene è piuttosto limitato, potendosi risolvere con strumenti di modellazione, in programmi di *reverse modelling*, attraverso "*smoothing*" applicati alle parti sovrapposte che non appaiono esattamente uguali.

Nelle altre due esperienze non si mostra questa presenza dell'analisi dal punto di vista dell'interpretazione. I primi due casi sono studi più formali. Tuttavia, nel terzo caso, "Integrazione di affreschi: Volta affrescata del Palazzo Roncioni", è lecito supporre che si parte dai requisiti professionali richiesti nel campo del restauro. In questo caso, rimane un certo interesse per la forma, ma il colore la fa da protagonista, la forma interessa insieme al colore. L'obiettivo finale, in questo caso, è quello di ottenere grandi tabelle stampate, che servano come base per lavori di restauro. Pertanto, in questo studio, la forma è importante ma perde l'esclusività a causa della elevata importanza del colore. Concentrandosi sul problema, si presume che non esiste attualmente alcun software che esegue lo sviluppo 2D della volta in modalità automatica, poiché anche se ci sono soluzioni in fase di sperimentazione, sulla conversione di un modello *mesh* in una versione bidimensionale con la *texture*, per es. la parametrizzazione (comunemente chiamato nei programmi di "*entertainment*" *UVmapping*), questi non sono esattamente la soluzione al problema presente.

Su questa base, viene eseguito uno studio, basato sulla forma. Si analizza la tipologia delle volte, superfici generalmente composte di cilindri o coni, e utilizzando le proprietà geometriche, si ottiene uno sviluppo. Per il rilievo è principalmente utilizzato lo scanner TOF, con



colorazione del punto: il punto è caratterizzato dal RGB e dalla sua riflettanza. Viene eseguita anche una campagna fotografica per la restituzione fotogrammetrica.

Nell'impiego dei programmi di fotogrammetria vengono seguiti due percorsi differenti, come già osservato, da una parte l'uso integrato per avere la geometria e la forma con due programmi di fotomodellazione, *Photodeler* e *Agisoft PhotoScan*, dei quali si farà la valutazione in seguito, e dall'altra, un sistema per applicare la *texture* unita sempre a *Photodeler* con un uso strettamente legato alla fase di "allineamento" della fotocamera, al fine di trovarne i parametri di orientamento. Questo secondo percorso è finalizzato al riprogetto dei fotogrammi, con un sistema che si trova nei programmi di modellazione, e ad ottenere così una *texture* prevalentemente a partire da un'immagine. Questo sistema esegue lo sviluppo del modello attraverso una *Uvmap*, ottenuta nel programma *Modo* (programma appartenente al settore del *Entertainment*).

Le conclusioni che possono essere fatte in questo caso specifico sono collegate a una affidabilità che si è dimostrato sul posto. Attraverso l'impostazione di piani all'interno di un programma di gestione dei dati del laser scanner, *Leica Cyclone*, si ottiene un sviluppo manuale. Il tipo di rilievo eseguito comprende il colore e la riflettanza della luce, pertanto attraverso una discretizzazione della superficie continua su questi piani è possibile ottenere un risultato altamente affidabile rispetto al profilo metrico di sviluppo. Non si può dire lo stesso dell'aspetto cromatico, poiché è molto decadente. Possiamo dire che ad oggi, lo scanner non dà risultati soddisfacenti nei casi in cui l'importanza del colore prevale. La risoluzione e la qualità dei fotogrammi, catturati dalle macchine fotografiche posizionate all'interno dello scanner, è molto bassa. Alcuni scanner hanno anche la possibilità di introdurre una fotocamera esterna, cioè, fare un rilievo e riproiettare l'immagine, ma anche così le soluzioni non mostrano la qualità attesa. Tuttavia, la situazione è diversa quando nel campo di modellazione geometrica, si decide di applicare un'immagine sulla superficie. Questo percorso è più efficace perché, anche se è necessario più lavoro (ha una fase di mappatura UV manuale, ecc.), ha molto di più sotto controllo la qualità: il risultato finale.

Dal punto di vista funzionale, per i restauratori, lo sviluppo della volta in 2D dalla *mesh* ottenuta con lo scanner laser è sufficiente, considerando che con esso è già possibile ottenere tutti i profili e i limiti degli affreschi che la adornano, permettendo questa operazione di integrazione. Tuttavia, se si vuole approfittare di questo rilievo per avere una documentazione degli affreschi di alta qualità, ciò non è possibile. Pensando a questa possibilità, questo caso di studio viene utilizzato per eseguire i test che permettono di includere in un modello di alta qualità morfologica, un alta qualità cromatica.

Cercando questo modello con alta risoluzione cromatica, si testano due programmi di *Image-based modelling*: *Photodeler* e *Agisoft PhotoScan*. Entrambi funzionano bene, ma hanno alcune differenze. Nel profilo operativo, il programma *Photodeler* presenta il problema che per seguire la resezione della fotocamera, o per dire lo stesso, per individuare i parametri di cui si è parlato in precedenza utili per la proiezione delle immagini sul modello. L'operazione è lunga e complessa, presentando allo stesso tempo l'inconveniente che i risultati non sono di



elevata qualità, poiché anche se ha un notevole aspetto estetico non si può dire lo stesso dell'aspetto metrico della riproiezione.

Pertanto, date le prove realizzate, e basandosi sui risultati specificati nel terzo caso di studio, possiamo dire che, seguendo uno sviluppo di questo modello con le foto riprogettate (facendo il *baking*, ecc.), oltre ad essere un percorso più faticoso, è un percorso che non consente di ottenere abbastanza accuratezza.

Inoltre, per quanto riguarda i due modelli generati con *Photodeler* e *Agisoft PhotoScan*, per ottenere non solo la struttura della scena (il network delle macchine fotografiche), ma anche per la generazione del modello, i due programmi non danno gli stessi risultati.

Agisoft PhotoScan è la soluzione che, pur essendo quasi prevalentemente automatizzata, non permettendo alcun intervento, o di ottenere informazioni puntuali come fa *Photodeler* (che consente di studiare gli errori punto per punto), e da un certo punto di vista in contrapposizione a uno studio che si pone come obiettivo l'analisi della precisione morfologica, allo stesso tempo, nella integrazione tra modelli, permette una *mesh* più pulita e, conseguentemente, una *texture* di qualità superiore. Questo programma presenta anche una migliore combinazione tra i singoli fotogrammi, una maggiore omogeneizzazione del colore e una migliore qualità della *mesh* a livello morfologico.

Finora si può quindi affermare che lo scanner è il metodo più efficace, poiché prende la posizione dei punti nello spazio, e anche il colore, che pur non essendo un colore affidabile al 100%, ha un riflettanza che varia con il passaggio della pittura dai colori chiari e scuri (mostrando una riflettanza diversa⁴) ed essendo una soluzione automatica, in cui con una sola cattura tutte le informazioni vengono raccolte, non influenzate da azioni intermedie come la riproiezione (associazione tra punto nello spazio e pixel nei fotogrammi ottenuti dalla fotocamera). Come soluzione automatica si può anche considerare l'*Agisoft PhotoScan*, poiché per la generazione del modello è necessaria solo l'impostazione di un set minimo di parametri. Inoltre, le versioni più recenti consentono anche di ottenere una maggiore affidabilità, grazie all'introduzione di un nuovo comando, "ottimizzazione", che tiene conto dei parametri interni della camera, ottenuti attraverso un gran numero di immagini che fanno da rete come accade nel *PhotoModeler* nella fase di allineamento (detta anche fase di registrazione).

Una carenza che si trova, per esempio, in questi programmi di *Image-based Modelling* è la mancanza di strumenti per permettere di introdurre piani delle posizioni che conosciamo esattamente, come i *reference plane* di *Leica Cyclone 7*. Non ci sono strumenti di sviluppo. Hanno sì strumenti di *UVmapping*, ma questi, in ogni caso, sono differenti rispetto ad uno sviluppo che può servire a un restauratore.

Infine, nel quarto caso di studio, "Nuovo strumento per il rilievo di coperture: Chiesa di San Miniato a Marciana (Cascina, Pisa)" viene introdotto un nuovo strumento, il drone, la foto-

⁴ È importante chiarire che per il tema del restauro, infatti, è sufficiente la riflettanza poiché documenta esattamente la forma definita dell'affresco sulla superficie della volta, ma non sarebbe così se si cerca la documentazione dell'affresco nel suo colore originale.



modellazione da fotogrammetria aerea. Per elaborare le fotografie catturate dal UAV, vengono testati due programmi, come nel caso di studio precedente. Ancora una volta, si osserva che la qualità e la risoluzione della *mesh* ottenuta nelle aree comuni catturate dallo scanner a tempo di volo (TOF) e attraverso le tecniche di *Image-based Modelling* non sono comparabili. Tuttavia, confrontando i due modelli ottenuti mediante *Image-based Modelling*, il risultato, come nel caso della volta del Palazzo Roncioni, è la stessa: la qualità della *mesh* a livello morfologico e topologico è superiore nel modello ottenuto con *Agisoft PhotoScan*. Si deve commentare che questo programma, anche se presenta alcune limitazioni di controllo interno ed è suscettibile di miglioramento, ha subito una grande evoluzione nel periodo di sviluppo della tesi. È cambiato e cresciuto enormemente, permettendo in quest'ultimo caso di studio di ottenere un modello di alta qualità morfologica e cromatica. Mentre in un primo momento permetteva solo di produrre modelli per fare *rendering*, cioè, come un ruolo accessorio, ora, , è diventato un potente strumento in grado di generare modelli che permettono l'integrazione con i dati dello scanner. (Es. La vecchia versione di *Agisoft PhotoScan* non esportava nuvole dense, la nuova sì, e quindi dà la possibilità di esportarle in programmi come *Leica Cyclone 7*, consentendo di combinare elaborati estremamente accurati). Come visto in precedenza, per il restauro del colore negli affreschi, questa potrebbe essere la soluzione: progettare le informazioni cromatiche della versione di *Agisoft PhotoScan* nella nuvola di punti dello scanner. Inoltre, permette anche di confrontarsi con i dati provenienti da strumenti diversi, come laser scanner terrestre, UAV, ecc.

L'integrazione di modelli, e di conseguenza, delle tecniche di modellazione, è essenziale, ed è quindi importante, sia per l'analisi di carattere architettonico che per coloro che sono collegati a tecniche di intervento, come principalmente nel caso della volta.

L'introduzione del drone è importante per le tecniche di intervento, ma è particolarmente importante perché introduce una nuova possibilità per il rilievo in zone non accessibili o di difficile accesso (ad esempio, la copertura). Un altro vantaggio del drone, è la possibilità a livello di sicurezza nella costruzione, come per esempio se bisogna fare un rilievo di una chiesa in rovina dopo un terremoto. Tra mandare una persona a fare il rilievo e utilizzare un UAV, la scelta è chiara, sia economicamente che come "sociale", poiché l'uso delle macchine è sempre più redditizio, mentre l'intervento delle persone comprende sempre la spesa per l'assicurazione che aumenta in modo significativo il prezzo, se si vuole analizzare da un punto di vista economico, lasciando da parte la questione della sicurezza e la prevenzione dei rischi professionali.

La differenza tra modelli basati su tecniche di *Image-based Modelling* e *Range-based Modelling* si è notevolmente ridotta, in quanto l'affidabilità dei modelli realizzati con il primo tipo è strettamente legata alla capacità di una persona di strutturare correttamente il network (la posizione delle diverse fotocamere rispetto all'oggetto). Da questo punto di vista, il drone è stato un avanzamento importante perché elimina uno dei problemi più comuni, presente ogni volta che viene effettuato un rilievo di elementi vicini: le catture nel piano verticale. Un chiaro esempio sono le case, una macchina fotografica è in grado di catturare essenzialmente un piano orizzontale, si può provare a fare una zona più ampia utilizzando lo zoom , ma in definitiva viene ottenuto un piano di sviluppo dell'oggetto sostanzialmente orizzontale. Pertanto,



l'affidabilità di questo rilievo sarà molto alta nella parte inferiore e molto meno in quella superiore. Nel caso del drone, il network ha una flessibilità maggiore, offre inoltre la possibilità di documentare l'oggetto da più parti, e quindi di aumentarne i dettagli. Consente di avvicinare il rilievo fotogrammetrico a quello dello scanner laser, integrandolo.

Chiudendo i risultati particolari di ciascun caso di studio, si afferma che, in generale, l'integrazione è il futuro, non solo nel campo della modellazione 3D, attorno a cui gran parte della tesi ruota, ma nell'avvicinamento tra i programmi di fotogrammetria e quelli che servono per il trattamento dei dati di scansione laser. In modo che, la professionalità dei programmi di fotogrammetria che lavorano in modo estremamente automatizzato, ci permettano non solo di ottenere dati di alta qualità per consentire una buona integrazione con il laser scanner, ma permettano anche una combinazione assoluta.

Si può intendere questa tesi, inoltre, come un'evoluzione che va sviluppandosi nello stesso tempo che vanno apparendo i programmi e quindi le tecniche di modellazione. Il programma *Agisoft PhotoScan* passa per essere uno strumento di Computer Vision (per un uso visivo più che tecnico) a un programma che genera modelli comparabili con quelli dello scanner. La restituzione in 3D, subisce anch'essa un'evoluzione nella tesi, che passa da un interesse focalizzato esclusivamente sulla forma (poiché il tema del colore presenta ancora troppi problemi⁵) a un interesse per la restituzione totale che genera modelli simili alla realtà: modelli tridimensionali ad alta risoluzione di forma e colore. Oggi, grazie alla realizzazione di sistemi sempre più avanzati, si combina la capacità di mantenere il vantaggio dell'automazione e la possibilità di generare modelli dove all'alta risoluzione morfologica si aggiunge l'elevata risoluzione cromatica. Questo è un aspetto importante, poiché si può pensare che, in un futuro molto vicino, si presenti come una soluzione: una metodologia molto utile basata nella realizzazione di modelli fotogrammetrici e modelli di scanner laser insieme. Al fine di ottenere i vantaggi di entrambi allo stesso tempo, il migliore potenziale di uno e dell'altro : scanner laser per la forma e le tecniche di *Image-based Modelling*, per il colore.

Questa tesi è fortemente influenzata dal passaggio del tempo: l'evoluzione e il trascorrere del tempo sono fondamentali. Anni fa la fotogrammetria era una soluzione riguardante solo esperti di topografia. Oggi, con questi sistemi, è diventata qualcosa di più vicino e al di fuori di un campo tanto specifico: i topografi hanno dato soluzioni in cui il programma fa quasi tutto automaticamente. Ovviamente, questo non è solo di interesse per gli architetti, ma anche per chi proviene da un altro settore, l'ingegneria. È importante notare che gli sviluppatori dei programmi stanno ascoltando le richieste provenienti da entrambi i settori. Oggi la fotogrammetria è tornata a prendere una posizione rilevante all'interno del rilievo dei beni culturali, fatto che non succedeva pochi anni fa⁶. Gli sviluppatori di software hanno dimostrato la volontà di dare alle persone che lavorano nel campo della geomatica o fotografia, strumenti che in qualche modo compensino, la già citata "black box", che suppone il non sapere esattamente il lavoro interno del programma. Sono noti che hanno sistemi di riconoscimento

⁵ Vedere gli atti di *Conferenza Nazionale del colore*, Firenze, 19-20 Settembre 2013 y *Conferenza Nazionale del colore*, Roma, Settembre 2011.

⁶ Conferenza di Remondino in Corso MICMAC, Politecnico di Torino. 3 - 6 febbraio 2014.



della forma, che calcola i parametri della fotocamera, ecc., ma mentre nel *PhotoModeler* viene mostrato tutto esplicitamente, non è il caso di programmi come *Agisoft PhotoScan*. Tuttavia, si vede una continua evoluzione, in cui sono sempre di più i dati forniti per consentire un rilievo certificato rivolto a permettere di controllare quali sono gli errori che vengono fatti da questi programmi.

Si può dire che, da un lato, il beneficio di sensori attivi è innegabile, però allo stesso tempo la professionalità o il miglioramento qualitativo dei programmi di fotogrammetria sta permettendo di unire questi due modelli in modelli che in qualsiasi caso sintetizzano al massimo la qualità sotto il profilo della misurazione e del colore.

Tuttavia, una delle questioni attualmente aperte nel campo della ricerca è quella di fornire agli sviluppatori di software l'idea di introdurre nei programmi strumenti affidabili ai fini degli obiettivi dei restauratori. I programmi di *Reverse modelling* nascono per soddisfare le esigenze di ingegneri o progettisti, *Agisoft PhotoScan* o *Photomodeler*, quelle dei topografi, ma da questo studio si è constatato che ancora in questo momento, ci sono lacune nei programmi per le specifiche esigenze presentate dai restauratori. Nel corso dei diversi casi di studio, si verificano, in diverse occasioni, i problemi dovuti alla necessità di esportare e importare per non trovare in un unico programma gli strumenti che consentirebbero di realizzare l'intero processo: dal rilievo attraverso fotografie o scanner laser fino alla restituzione finale del modello.

Quindi si può concludere che questo insieme di esperienze sta seguendo, a sua volta, l'evoluzione e i miglioramenti che si stanno introducendo nel mondo del rilievo e della restituzione. Inoltre, si può affermare che anche la terminologia è molto importante, perché il vocabolario degli architetti (che sono quelli che si dedicano principalmente nella costruzione di modelli 3D) si sta avvicinando, in un aspetto più professionale, a questi strumenti, cosa che in precedenza si verificava meno.

La questione terminologica è stata affrontata con la volontà di fare un confronto lessicale tra le tre lingue. Come si racconta nella parte introduttiva della tesi, sostenuta da diversi esperti del settore, si è trovata una mancanza di parità nell'uso del linguaggio tecnico usato dagli esperti nel campo del rilievo e della restituzione in 3D. Osservando continuamente questa mancanza di uguaglianza e uniformità dei termini, si presenta nell'ultimo capitolo della tesi uno studio della terminologia specifica, in cui i termini sono confrontati e permettono di comporre nelle tre lingue un concetto ed i termini che vengono utilizzati per fare riferimento ad esso. Con questo capitolo si cerca di fornire una coerenza nella terminologia non ottenuta finora in questo campo, e discussa da vari autori (Amoruso, G., Apollonio, F.I. e Remondino, F., 2010, Guidi e Remondino, 2012).



C. REFERENCIAS

- ❖ Amoruso, G., Apollonio, F.I. y Remondino, F. 2010. “Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione. Utilizzo di laser scanner su superfici marmoree di epoca romana” en Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.) *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 118-161.
- ❖ Guidi, G. y Remondino, F., 2012. “3D Modelling from Real Data” en *Modelling and Simulation in Engineering*. Edited by Catalin Alexandru, InTech, 3 de Marzo, pp. 69-102.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje
Isabel Martínez-Espejo Zaragoza



Tesis Doctoral

CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFIA



A. BIBLIOGRAFIA BÁSICA¹

- ❖ Benedetti, B., Gaiani, M. y Remondino, F. (ed.), 2010. *Modelli Digitali 3D in archeologia: Il caso di Pompei*. Edizioni della Normale. Scuola Normale Superiore Pisa, pp. 118-161.
- ❖ Bertocci, S., Bini, M. (ed.), 2012. *Manuale di rilievo architettonico e urbano*. CittàStudi Edizioni. Novara, Italia, pp. 215-232.
- ❖ Buill, F., Núñez, M.A., Rodríguez, J.J., 2007. *La fotogrametría arquitectónica*. Edición UPC. Barcelona.
- ❖ Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012. *Fotogrametría. Misure, rilievo, progetto. Volumen 3*. Zanichelli editore S.p.A., Bologna
- ❖ Cueli López, J.T., 2011. *Fotogrametría práctica*. Ed. Tantin. Santander. ISBN 978-84-9692-093-4.
- ❖ Cueli López, J., 2010. *Cursos gratis de fotogrametría. Tutoriales Photomodeler*. Disponible en: <http://www.worldphotogrammetry.com/home/itemlist/category/6-cursos-gratuitos.html> (última visita: 13/12/2013)
- ❖ Docci, M. y Maestri, D., 1984. *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*. Ed. Laterza. Roma
- ❖ Fantini, F., 2008. *Il modello di stadio da Villa Adriana. Indagine su un progetto incompiuto*. Università degli Studi di Firenze. Florencia.
- ❖ Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. McGraw-Hill. Italia.
- ❖ Guidi, G. y Remondino, F., 2012. “3D Modelling from Real Data” en *Modelling and Simulation in Engineering*. Edited by Catalin Alexandru, InTech, 3 de Marzo, pp. 69-102.
- ❖ Herráez Boquera, J., Navarro Esteve, P y Denia Ríos, JL., 2010. “Fundamentos y aplicaciones de la tecnología de Escáner Láser para documentación y restauración del patrimonio. Algunos ejemplos de aplicación en La Comunidad Valenciana” en Alcántara Onofre, A., Lara Gutiérrez, A. M. (ed.) *Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano*. Ciudad de México: Universidad Politécnica de Valencia, pp. 17-41.

¹ En este capítulo se señala solo una bibliografía general de la tesis, ya que para los temas específicos de cada capítulo se puede consultar directamente en el apartado “referencias” de éstos.



- ❖ Kraus, K., 1994. *Fotogrammetria. Vol. 1. Teoria e applicazioni*. Libreria universitaria Levrotto & Bella. Torino.
- ❖ Kraus, K., 1997. *Photogrammetry. Vol. 2. Advanced Methods and Applications*. Dümmler Verlag. Bonn.
- ❖ Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2012. *Interpretazione museografica dei portici con fregi di caccia della "Piazza d'Oro"*. Tesis del Máster Itinerante en "Museografía, Architettura e Archeologia. Progettazione Strategica e Gestione Innovativa del Patrimonio Archeologico" instituido por la "Accademia Adrianea di Architettura e Archeologia Onlus" dirigida por Francisco Juan Vidal. Roma, Italia
- ❖ Migliari, R. (ed.), 2009. *Geometria descrittiva, volume II, tecniche e applicazioni*. Città Studi edizioni-De Agostini Scuola. Novara, pp. 60-94.
- ❖ Martínez-Espejo Zaragoza, I., 2010. *La Iglesia de los Desamparados de Les Coves de Vinromá. Hipótesis y restitución virtual de la bóveda de la capilla mayor*. Tesina del Máster Oficial de Conservación del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia dirigida por Francisco Juan Vidal. Valencia.



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



CAPÍTULO 11. AGRADECIMIENTOS



A. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a Francisco Juan Vidal, un profesor, que desde que llegué al Master hace unos cuatro años, ha puesto siempre en mí su confianza. Un persona a la que admiro por su capacidad de trabajo, su paciencia y su sabiduría. Agradecerle que me haya apoyado siempre en mis proyectos, y haya sabido ver en mí, la persona que yo a veces dudo ser.

Agradecer a Filippo Fantini toda su dedicación. El haberme abierto este mundo, para mi nuevo, de la tecnología para el levantamiento del patrimonio arquitectónico, del que me ha enseñado tantísimo. Agradecer sinceramente toda su ayuda, en todos esos días trabajando hasta las tantas, y su conexión con el mundo italiano que tanto me ha enseñado.

Agradecer a la profesora Gabriella Caroti, no solo el que me haya enseñado y ayudado tanto y que haya puesto su confianza en mí, dándome tantas oportunidades, que me han hecho sentir de verdad valorada, sino el hecho de haberme hecho conocer a una persona que de verdad se ha convertido en mi persona de referencia, sobre a donde me gustaría llegar. Mi admiración por ella, hace que cuando me siento flaquear, aparezcan las fuerzas para continuar. Es una persona decidida en los momentos claves, cercana en los momentos en que te sientes perdida, fuerte cuando no está de acuerdo para defender sus ideas, y tantas cosas más que se podrían decir. Es esa persona en la que piensas cuando te preguntan a quién te gustaría parecerte “cuando seas mayor”.

Agradecer a Andrea Piemonte, su cercanía, su ayuda, su disponibilidad y su simpatía, que te ayuda a pedirle consejo cuando el camino no es tan claro. Agradecerle que me haya enseñado tanto, con esas cualidades que te hacen darte cuenta que, de verdad, es un magnífico profesor.

A Benedetta Adembri, directora de la Villa Adriana, su ayuda para conocer a fondo la Villa Adriana, su apoyo en algunos momentos de dificultad, y su fascinación por su trabajo, que tanto me ha inspirado para realizar una investigación que ella ha convertido en apasionante.

A Pablo Navarro por ayudarme con el primer levantamiento con escáner láser TOF, una de las piezas claves que ha permitido aflorar mi interés por la nueva tecnología aplicada al levantamiento arquitectónico.

A Marco Bevilacqua, Juan Carlos Navarro Fajardo, Pablo Rodríguez, Rafa Marín y Sergio Di Tondo, que siendo profesores no directamente ligados a mi doctorado, me ha enseñado muchísimo, mostrándose siempre disponibles y ayudándome siempre que los he necesitado.

A Jorge Martínez, por su ayuda en el trabajo, por los momentos de despacho de apoyo mutuo cuando venían las dudas existenciales sobre el trabajo que estábamos realizando, y por haberse convertido en un gran amigo y apoyo.



A Federico Capriuoli, por trabajar conmigo probando algunos modelos, y endulzando esas mañanas de desesperación, de largas horas de espera, con esas ricas muestras de gastronomía italiana.

A Jorge Cueli experto en *Photomodeler*, que me ha aclarado muchas dudas de este programa sin las que habría sido imposible llegar a los resultados obtenidos, agradecerle su rapidez respondiéndome siempre y su gran disponibilidad.

A mis compañeros de Pisa, Andrea Bedini y Jessica Micheloni, que me han apoyado muchísimo desde que llegué, compartiendo cada uno de mis logros, y enseñándome a nivel profesional y sentimental.

A Federico Caliarì y a todos los miembros del Premio Piranesi y del Master de la Academia Adrianea, que en parte me inspiraron para que mi doctorado cogiese este camino, enseñándome que aprender y estudiar no siempre tiene que ser aburrido.

A Pedro Collado, que desde que me conoció en la carrera y lo elegí como director del proyecto final, siempre ha estado apoyándome y ayudándome, recomendándome siempre los mejores caminos para llegar a cumplir mi sueño.

A Fernando y Sara, Erasmus de la politécnica de Valencia, que he conocido en Pisa, y con los que hemos compartido la fase de levantamiento con escáner de la iglesia de San Miniato. Ha sido una experiencia poder compartir un poco de mi conocimiento del escáner con ellos y que ellos me hayan ayudado a darme cuenta de algunas cosas que debía revisar en mi investigación.

A mi familia, que ha soportado como nadie, todos mis momentos de incomprensión, de dificultad, de intentos de tirar la toalla... y en conclusión todos esos momentos que pasa una persona cuando debe afrontar un trabajo muy duro e intenso. Agradecer, en especial a mi madre, el apoyo que me ha dedicado, el que me haya soportado en mis momentos difíciles, cuando la tensión me ha hecho comportarme, digamos, menos agradable, y sobre todo esa confianza ciega, que en algunos momentos dentro de mí ha estado ausente, de que lo conseguiría. Gracias por tu entrega, por ponerme siempre delante a todas tus necesidades, por ser mi apoyo constante siempre, un siempre con mayúsculas que hace que mi sienta realmente afortunada.

Agradecer, en general, a todas las personas que de un modo u otro me han ayudado y apoyado para poder realizar este proyecto, y sin las cuales no podría haberlo realizado.

Por último, agradecer a mis amigos, tanto los españoles como los italianos, haberme ayudado anímicamente para poder continuar en mi trabajo día tras día sin desistir en esos días en que parece que todo se tuerce. En especial, quiero agradecer más concretamente a dos personas, a mi amiga María Martínez Valado, que de verdad ha estado ahí aguantando carros y carretas, y ha sido siempre un apoyo constante, hasta los días en que yo misma me habría mandado a algún sitio lejano, por ser un ejemplo a seguir y una figura a la que admirar, además de una verdadera



PRECISIONES SOBRE EL LEVANTAMIENTO 3D INTEGRADO CON HERRAMIENTAS
AVANZADAS, APLICADO AL CONOCIMIENTO Y LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO

Universidad Politécnica de Valencia. Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje

Isabel Martínez-Espejo Zaragoza

Tesis Doctoral



amiga, y a Maurizio Ginghiali, que se ha convertido en el apoyo que me ha permitido llegar al final, el hombro que me ha sostenido en los últimos momentos de desesperación, por ponerme por delante de sus necesidades, por estar ahí sin rechistar cuando me he convertido en una persona difícil, por conocerme y querer seguir estando a mi lado. A veces no hay palabras que puedan expresar suficiente la gratitud, por lo que solo os puedo decir: gracias.

Isabel Mtnez-Espejo Zaragoza