



Escuela
Politécnica

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

Máster Universitario de Especialización
en Geotecnologías Topográficas en la
Ingeniería

Trabajo Fin de Máster

**ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EL
LEVANTAMIENTO
ARQUITECTÓNICO**

Daniel Almagro Caballero de León
Septiembre, 2016



Escuela
Politécnica

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

Máster Universitario de Especialización en
Geotecnologías Topográficas en la Ingeniería

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

Autor: Daniel Almagro Caballero de León

Fdo.:

Directora: Aurora Cuartero Sáez

Fdo.:

Tribunal Calificador

Presidente: Álvaro Gómez Gutiérrez

Fdo.:

Secretaria: M^a Mar Pozo Ríos

Fdo.:

Vocal: Manuel Guerrero Castro

Fdo.:

CALIFICACIÓN: _____

FECHA: septiembre de 2016



RESUMEN

El siguiente trabajo explica las diferentes técnicas de levantamiento arquitectónico y de fachada existentes en la actualidad y cuál podría resultar más asequible, fiable y rápido para realizarlo. Por ello, nos acabamos centrando en la fotogrametría de objeto cercano o fotogrametría terrestre como método más interesante para realizar esta serie de trabajos.

Teniendo presentes todas las técnicas de levantamiento arquitectónico existentes, desde las manuales-tradicionales como croquis y flexómetro, pasando por las topográficas con estación total o nivel topográfico y finalizando con las últimas técnicas como el escáner láser 3D, nos decantamos por realizar una comparación entre 4 software fotogramétricos existentes a nuestra disposición y de libre adquisición para el registro de un mismo edificio.

El desarrollo de las técnicas fotogramétricas en estas últimas décadas (*Structure From Motion*) hacen que este método sea cada vez más sencillo y tenga procesos más automatizados. Esto nos permite obtener información métrica de gran precisión a partir de realizar varias fotografías con cámara digital.

Realizando los levantamientos con este tipo de programas obtenemos una nube de puntos del edificio que levanta el modelo tridimensionalmente con medidas fiables. Si, además, estos puntos contienen la gama de colores que posee el edificio, se puede realizar el texturizado de las superficies. Por lo tanto, esto nos añade el gran valor de quedar representado el estado real en el que se encontraba el objeto a la hora de haber sido realizado el fotografiado y, como consecuencia, el levantamiento.

Los trabajos resultantes de este levantamiento son: vectorización de planos, ortoimágenes, modelo 3D del objeto y maquetación virtual, entre otros, en el campo de la arquitectura.

En el presente trabajo fin de máster, en el caso práctico que se realiza, se utiliza como objeto de comparación el edificio de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica de Cáceres de la Universidad de Extremadura

PALABRAS CLAVE

Levantamiento arquitectónico, Estación total, Escáner láser, Fotogrametría terrestre, *Structure from Motion*, 123D Catch, Agisoft PhotoScan, Pix4D, VisualSFM.



AGRADECIMIENTOS

A mi madre y hermanos por el apoyo incondicional y por su ayuda.

A mi Nana por aguantarme todos los días delante del ordenador y ser capaz de alentarme para conseguir acabar con ello.

A mi tutora, Aurora Cuartero, por saber encauzarme y guiarme hasta el final.

Gracias a todos, de corazón.





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
2. ANTECEDENTES	10
2.1. ESTADO DEL ARTE	10
3. METODOLOGÍA	18
3.1. MÉTODOS SIMPLES	18
3.2. MÉTODOS TOPOGRÁFICOS	18
3.3. MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS	22
3.4. MÉTODOS AVANZADOS: ESCÁNER LASER 3D	26
3.5. CONCLUSIONES DE LOS MÉTODOS	31
4. CASO PRÁCTICO	33
4.1. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO REALIZADO CON ESTACIÓN TOTAL	34
4.1.1. POLIGONAL	34
4.1.2. RADIACIÓN	38
4.1.3. PLANO DE PUNTOS RADIADOS	40
4.1.4. PLANO DE PUNTOS DE LA FACHADA PRINCIPAL	41
4.1.5. PROCESADO DE LOS DATOS Y REPRESENTACIÓN EN 3D CON AUTOCAD PARA TOMA DE MEDIDAS	42
4.2. TOMA DE MEDIDA DE REFERENCIA CON FLEXÓMETRO	46
4.3. LEVANTAMIENTOS ARQUITECTÓNICOS REALIZADO CON PROGRAMAS FOTOGRAMÉTRICOS	46
4.3.1. TRABAJO DE CAMPO	48
4.3.1.1. TOMA DE IMÁGENES	48
4.3.2. PROCESADO DE LAS IMÁGENES	50
4.3.2.1. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA "123D CATCH DE AUTODESK"	51
4.3.2.2. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA "PHOTOSCAN PROFESSIONAL DE AGISOFT"	56
4.3.2.3. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA "PIX4D"	63
4.3.2.4. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA "VISUAL SFM Y MESHLAB"	69
5. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MÉTRICA DE LOS MODELOS 3D	79
6. RESULTADOS	82
7. CONCLUSIONES	86



8. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	88
9. BIBLIOGRAFÍA	89
10. INDICE DE FIGURAS Y TABLAS	93
ANEXO I. Reseñas de las estaciones bases	95
ANEXO II. Toma de datos y cálculo de las coordenadas de la Poligonal	98
ANEXO III. Toma de datos y cálculo de las coordenadas de la Radiación	100
ANEXO IV. Modelos 3D	104

1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se pretende analizar los diferentes métodos para la realización de Levantamientos Arquitectónicos (Almagro A. , 2004) (Rodríguez M. Á., 2008) y de fachadas de edificios, centrándonos en los métodos fotogramétricos (Almagro A. , Simplified methods in Architectural Photogrammetry, 1991) y el análisis de la fiabilidad y precisión de los softwares libres existentes en la actualidad.

Las técnicas para el levantamiento Arquitectónico de edificios son múltiples actualmente (Rodríguez M. Á., 2008): desde los clásicos métodos de medición manual donde se realizan los primeros croquis y se mide con cinta métrica, pasando por los métodos topográficos donde los instrumentos topográficos de precisión emplean métodos de reiteración e intercesión, junto con los métodos fotogramétricos donde a partir de fotografías apoyadas en medición de puntos de control por métodos topográficos son rectificadas para medir sobre ellas, hasta los métodos más avanzados como son los escáneres láser (García-Gómez et al, 2011) para realizar directamente levantamientos en 3D.

Después de realizar una investigación de los antecedentes y el estado del arte y una explicación más profunda de los diferentes métodos, llevaremos a cabo un caso práctico de levantamiento eligiendo la aplicación de varios programas fotogramétricos. Explicaremos el proceso de obtención del modelo con cada software, de los cuales extraeremos unas medidas de comparación para analizar la fiabilidad de cada uno además del análisis de otros parámetros.

2. ANTECEDENTES

Definición de levantamiento arquitectónico

La palabra levantamiento es un término que pocos entienden tal y como los técnicos del ámbito de la arquitectura y de la ingeniería lo hacen. En la Real Academia Española de la lengua no está recogido con este sentido, solo arquitectos y topógrafos lo entienden así, aunque cada vez está más extendido entre profesionales ligados a este oficio, como arqueólogos e historiadores (A. Almagro, 2004).

En otros idiomas si tienen una palabra que define claramente esta actividad como puede ser *rilievo* en italiano, *relevé* en francés, *survey* en inglés o *bauforschungen* en alemán.

Así, para definir la palabra Levantamiento arquitectónico vamos a tomar palabras de D. Antonio Almagro Gorbea:

(...) se debe entender por levantamiento arquitectónico la forma primigenia de conocimiento y por lo tanto el conjunto de operaciones, de medidas y de análisis necesarios para comprender y documentar el bien arquitectónico en su configuración completa, referida incluso al contexto urbano y territorial, en sus características dimensionales y métricas, en su complejidad histórica, en sus características estructurales y constructivas, así como en las formales y funcionales (Almagro 2004).

Por tanto, podemos concretar que un levantamiento arquitectónico tiene como objetivo principal el conocimiento morfológico y constructivo del edificio o parte del edificio que nos interese, habiéndose documentado previamente con lo existente, si lo hubiese, y realizando todas las operaciones necesarias para documentar con fidelidad y el nivel de precisión que sea necesario en el trabajo a realizar.

2.1. ESTADO DEL ARTE

De entre las diferentes técnicas que vamos a analizar sobre levantamiento arquitectónico, nos centraremos en el método fotogramétrico. Por ello, en este apartado revisaremos la actualidad de la fotogrametría, nos familiarizaremos con los órganos nacionales e internacionales de regularización, revisaremos libros, artículos, revistas y trabajos para actualizar los conocimientos de dicha técnica.

La fotogrametría

A continuación, se realiza una breve revisión del concepto de fotogrametría. Para ello, se ha seleccionado una serie de definiciones extraídas de los Apuntes de la asignatura Iniciación a la Investigación Aplicada en Fotogrametría y Geodesia (Cuartero, 2012).

"... técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías...", (Bonneval, 1972).

"Fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado" (ISPRS, 2007).

"Fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y de modelos de energía radiante electromagnética y otros fenómenos" (ASPRS, 1934).

La fotogrametría de objeto cercano es un proceso por el cual permite reconstruir la posición, orientación, forma y tamaño de los objetos a partir de la toma de una serie fotografías de los objetos usados como modelo, llegando a obtener una imagen tridimensional de los mismos. Si se toman dos fotografías de un objeto, puede llegarse a identificar una serie de puntos comunes en ambas imágenes que mediante sofisticados algoritmos de cálculo nos llevaría a conocer los parámetros indicados anteriormente (orientación, posición, tamaño, color...) obteniendo nubes de puntos que pueden definir con mucha precisión su imagen tridimensional. También se define como una disciplina que crea modelos 3D a partir de imágenes 2D, para de esta manera obtener características geométricas de los objetos que representan, mediante el uso de relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva, y de la visión estereoscópica que posee de forma natural el ser humano.

Structure From Motion

Llegados a este punto, tenemos que hacer una pequeña revisión sobre las técnicas para obtener un objeto tridimensionalmente a partir de imágenes digitales. Entre estas técnicas nos encontramos con la fotogramétrica tradicional y con *Structure From Motion*, a partir de ahora SFM.

La fotogrametría es una técnica bastante antigua en la que se establecen puntos comunes entre las imágenes tomadas de forma controlada y con

cámaras calibradas con la finalidad de tomar mediciones entre estos puntos. En la actualidad se pueden extraer modelos 3D con cierta eficacia.

Por otro lado, no encontramos con *SFM*, desarrollado en la década de los 90, que está inspirada en la fotogrametría, pero viene del campo de la visión artificial. Esta técnica permite recrear modelos 3D a partir de un grupo de imágenes no estructuradas, ni cámaras calibradas, e incluso utilizar distintas cámaras (Westoby et al, 2012).

Actualmente estas dos técnicas se unen en diversos programas fotogramétricos que dan soporte a este tipo de tareas, simplifican el proceso de obtención del modelo (Pereira J. , 2012).

Scale-invariant feature transform (SIFT)

Característica invariante de la escala transformada, posible traducción a nuestro idioma, es un algoritmo usado en visión artificial para extraer características relevantes de las imágenes que posteriormente pueden usarse en reconocimiento de objetos, detección de movimientos, registro de imágenes entre otras. (Lowe, 2004)

SFM se basa en este algoritmo para detectar los puntos homólogos de las imágenes tomadas. El algoritmo fue publicado por primera vez por David Lowe en 1999 pero lo describió completamente y patentó en Estados Unidos en 2004.

Utilidad y herramienta de estas técnicas

Los campos de la arqueología, artes rupestres, levantamientos arquitectónicos y de fachadas, reproducciones de lugares y monumentos, cartografía, conservación de bienes culturales, documentación de piezas arqueológicas en museos y en general, todas las disciplinas de protección, documentación, digitalización o virtualización del patrimonio se están beneficiando de los trabajos realizados con programas fotogramétricos. Es una herramienta, muy asequible, de cierta simpleza en su uso y una fuente de documentación bastante relevante.

Algunos de los procesos fotogramétricos que se realizan con este tipo de programas son rectificación, restitución, ortoproyección y generación de modelos digitales de elevaciones (García León & Cuartero Sáez, 2002). Ampliando lo anterior, los programas actuales añaden la creación de nube de puntos, del mallado de éstas y la aplicación de texturas, por lo que recrean en 3D los objetos.

En la actualidad no hay gran oferta en el mercado de este tipo de herramientas computacionales. Pueden destacar la veterana Photomodeler de la empresa Eos Systems, Photoscan de la empresa rusa Agisoft y Pix4d de origen suizo. Todas ellas inspiradas en SFM.

Las alternativas de software libre (*open source*) o gratuitas también están muy limitadas.

“...por una parte tenemos la aplicación online desarrollada por Microsoft denominada Photosynth la cual, para poder descargar los trabajos realizados online, necesitamos una herramienta intermedia denominada SynthExport disponible sólo para las plataformas de Microsoft. En el terreno online tenemos otra herramienta denominada Hypr3D que nos permite crear modelos 3D a partir de fotografías y exportarlos a otros entornos. Otra alternativa es INSIGHT3D disponible para Windows y Linux, pero cuyo desarrollo se encuentra obsoleto, siendo muy difícil su instalación ya que no es compatible con las últimas librerías de OpenCV, presentando además una cierta inestabilidad. Como última opción también tenemos a nuestro alcance ARC3D una herramienta con una orientación hacia usos relativos a la digitalización 3D del patrimonio, que está disponible de forma a través de un cliente que acceder por servicios web a un servidor online, donde se realiza en todos los procesos, al igual que el resto de soluciones web hay que estar registrado previamente en la plataforma...” (Pereira J. , 2012).

También tenemos el software gratuito 123D catch de AutoDesk, dentro de los programas libres es uno de los más potentes y fáciles de usar, con una buena interfaz. Este realiza los procesos para crear el modelo virtual en un servidor propio después de subir las fotografías tomadas del objeto.

Otra alternativa libre son las herramientas tipo *Bundler*, que se fundamentan en procesos similares de SFM, pero su uso suele ser por línea de comandos, lo cual se hace más tedioso.

Organismos Nacionales e Internacionales

Los principales organismos internacionales que regulan los trabajos fotogramétricos son:

ISPRS. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.*

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección es una organización no gubernamental dedicada al desarrollo de la cooperación internacional para el avance de la fotogrametría y teledetección y sus aplicaciones (ISPRS, 2015).

ASPRS. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.*

Fundada en 1934, la ASPRS es una asociación científica que sirve a más de 7.000 miembros profesionales de todo el mundo. Promueve la aplicación responsable de la fotogrametría, teledetección, sistemas de información geográfica (GIS), y tecnologías de apoyo. La ASPRS ha incorporado oficialmente a "La Imagen y Sociedad de la Información Geoespacial," como parte de la identidad. Este lema representa a la Sociedad de la "Nueva Visión", ya que hace los cambios necesarios para una mejor posición de su enfoque para el futuro (ASPRS, 2012).

CIPA. Comité Internacional para la Documentación del Patrimonio Cultural. (*International Committee for Architectural Photogrammetry*).

El CIPA se creó como resultado de una resolución del Coloquio Internacional sobre la Aplicación de la fotogrametría a la Arquitectura, organizada en julio de 1968 por el Consejo Internacional de Monumentos y Lugares (ICOMOS). CIPA es una de las comisiones especializadas internacionales de ICOMOS, pero al mismo tiempo es también un comité de enlace entre ICOMOS e ISPRS, que patrocinan conjuntamente. Está en la actualidad compuesta por ocho miembros activos del comité. Sus objetivos son promover la fotogrametría arquitectónica, para contribuir a su desarrollo técnico, y para asegurar el enlace entre fotogrametristas y los que utilizan comisión o levantamientos fotogramétricos de edificios en la arquitectura. Para lograr estos objetivos, la Comisión trabaja en la recogida y la difusión de información sobre el tema de la fotogrametría arquitectónica, en la organización de reuniones internacionales y en el apoyo al estudio de las técnicas y actividades de formación (Carbonel & Dallas, 2003).

SECFT. La Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección.

Es una asociación al amparo de la Ley Orgánica 1/2002, de 22 de marzo, y sus normas complementarias, con personalidad jurídica y plena capacidad de obrar, careciendo de ánimo de lucro.

En el momento de su creación se tuvieron en cuenta las dos sociedades internacionales que existían en estos campos: la Asociación Cartográfica Internacional (ICA) y la ISPRS a las que representa en España, decidiéndose con acierto que su denominación recogiese precisamente los nombres de ambas para cubrir a nivel nacional los ámbitos de actuación que se contemplaban a nivel internacional (SECFT, 2016).

Revista MAPPING. *International journal of geomatics and earth sciences*.

MAPPING es una publicación técnico-científica especializada en la Geomática y Ciencias de la Tierra relacionadas a dicha disciplina. Con 23 años de historia, y fuerte impacto en Iberoamérica, esta publicación periódica es editada en España y abarca campos como Tecnologías de la Geoinformación,



Cartografía, Topografía, Teledetección, Fotogrametría, Patrimonio, Medio Ambiente y demás disciplinas y tecnologías vinculadas a la geomática. (Revista MAPPING, 2013).

Son varios los artículos y trabajos publicados en los que se realizan el análisis de las diferentes alternativas a los métodos tradicionales de levantamiento arquitectónico y en los que se determina la dificultad de la realización del método, la fiabilidad y precisión y su utilidad.

Dejando a un lado los métodos tradicionales, como son el uso de la estación total, de los que ya se han comprobado su fiabilidad, su precisión y la simplicidad de su elaboración, nos hemos centrado en recabar más información sobre los métodos alternativos como son los fotogramétricos y el escáner láser 3D. También, en muchos casos, se utilizan la combinación de varios métodos para realizar el levantamiento arquitectónico o de fachada. (García-León et al, 2014), (Souto Vidal et al, 2015)

El levantamiento de fachadas es un trabajo muy demandado en muchos campos como la planificación arquitectónica y el planeamiento. (Souto Vidal et al, 2015) La fotogrametría puede ser un método de gran precisión geométrica y la cual te permite visualizar la textura del objeto estudiado, añadiendo además la rapidez y la existencia de software libres. Todo esto convierte a esta técnica en una de las más asequibles actualmente (Martínez Rodríguez, Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes., 2014).

En la mayoría de trabajos realizados se complementan la utilización de toma de puntos de control con estación total y la utilización de la fotogrametría. (Souto Vidal et al, 2015), (Salcedo Galera & Calvo López, 2014) (García-León et al, 2014). Esto es necesario para determinar la calidad de las medidas que se pueden obtener del modelo 3D recreado con los softwares fotogramétricos además de su escalado para toma de medidas.

También se suelen introducir en la escena algún objeto de medidas conocido, como pueden ser los jalones o las miras métricas. Esto nos ayuda a escalar y tener una referencia dentro de la imagen.

Los resultados de análisis de precisión llevados a cabo en diferentes trabajos (Souto Vidal et al, 2015) (Martínez Rodríguez, Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes., 2014) (Salcedo Galera & Calvo López, 2014) (Rivas, 2013) presentan errores que oscilan entre 30 a 9 mm lo que puede limitar la aplicabilidad cuando se precisan escalas superiores a 1/100 pero que en los que se pueden utilizar para gran cantidad de trabajos. Aun así, estas

medidas se pueden afinar mucho más con programas fotogramétricos comerciales que dan mejores resultados.

Las conclusiones obtenidas en estos trabajos se asemejan a la mayoría de los realizados sobre levantamientos arquitectónicos de edificios a través de fotogrametría. Los autores coinciden en que es un sistema fiable, rápido y sencillo para obtener levantamientos tridimensionales precisos.

Fotogrametría VS Escáner Láser

De los métodos más actuales que tenemos a día de hoy, fotogrametría y escáner láser, comentamos lo siguiente:

Del método fotogramétrico destacamos la facilidad y automatización de los softwares fotogramétricos que permiten su utilización por usuarios sin alta especialización. Además, se obtiene documentación métrica con una textura fotorrealista de buena calidad, la cual es más fácilmente interpretable que los documentos cartográficos convencionales y pueden ser una potente herramienta en el ámbito arquitectónico y cultural.

El coste del equipo y la posibilidad de utilizar software gratuito aumenta el potencial de esta técnica. Sin embargo, estas herramientas muestran carencias en trabajos que requieran gran precisión, limitándolo a una serie de usos.

De igual forma la obtención de modelos tridimensionales en formato digital, abre nuevas puertas a la forma en que consideramos el registro de la información geoespacial. Este formato es estable y preciso, de fácil distribución y visualización por gran número de dispositivos móviles. Además, no debemos olvidar que estas réplicas no solo registran la información espacial, sino que también registran un momento determinado del tiempo, convirtiéndolas en una herramienta ideal para cuantificar el deterioro y evolución de los inmuebles.

Del método de escáner láser podemos decir que empieza a consolidarse como una alternativa muy a tener en cuenta conjuntamente con otras técnicas de levantamiento arquitectónico como la fotogrametría.

Los altos costes y la falta de autonomía son los contras de este método, pero la posibilidad de alquilar el instrumental ofrece flexibilidad para poder utilizar en cada caso el escáner que, por prestaciones, se considere más adecuado para un proyecto (con una buena planificación de los escaneos esta opción puede ser ciertamente económica).

Concluyendo sobre el uso de ambas técnicas observamos que son perfectamente válidas para documentar el patrimonio construido y necesitan

poco tiempo para la captura de datos en campo. Las desventajas son similares en ambas técnicas, les afecta las obstrucciones, la gran cantidad de datos deben de ser depurados y ninguna vectoriza de forma automática lo que facilitaría mucho los procesos de levantamiento.

La diferencia más destacable entre las dos es su facilidad de adquisición, donde el sistema fotogramétrico se lleva la palma. (Fernández et al, 2012)

Con un presupuesto de entre 1000 y 3000 € puedes hacerte con un equipo de levantamiento muy aceptable para la realización de los trabajos. Descomponiendo el equipo en cámara réflex digital (400 - 2000 €)¹, ordenador de sobremesa o portátil (500 - 3000 €)¹ entre los gastos más importantes. Es necesario tener en cuenta que los ordenadores deben de tener unas características mínimas de software y hardware para que los programas fotogramétricos funcionen sin problemas.

Los escáneres láser 3D tienen costes de entre 36.000 a 90.000 €² dependiendo de la gama y fabricante, además hay que añadir la compra de la licencia del software para manejar la nube de puntos recogidas en los escaneos. Normalmente cada casa tiene el suyo propio por lo que no hay uno general que sirva para todos. Los alquileres por día suelen estar entre 170 - 1200 € dependiendo como siempre del fabricante y del modelo.

En definitiva, vemos que los trabajos con este tipo de instrumental son bastante caros en comparación con los instrumentos necesarios para el sistema fotogramétrico.

1. Precios consultados en: www.mediemarkt.es/
2. Precios consultados en:
<http://www.cartesia.org/foro/viewtopic.php?t=28108&sid=8c3827e5e5446432801e0301ac20e3d5>
<http://www.sinluz.com/servicios/topografia/escaneado-3d-para-arquitectura/292-comparativa-entre-equipos-laser-3d>

3. METODOLOGÍA

Los levantamientos arquitectónicos se realizan para poder conocer las dimensiones y formas de un edificio o monumento en el ámbito de la arquitectura. Por ello, los diferentes métodos existentes podemos agruparlos según la complejidad de los instrumentos utilizados.

3.1. MÉTODOS SIMPLES

En primer lugar, tendremos los instrumentos más simples, la cinta métrica, la plomada y el nivel. Utilizando estos instrumentos distinguimos dos tipos de levantamientos simples: el directo y el diferido (Almagro A. , 2004).

El levantamiento directo es el que se realiza en el propio lugar y no requiere más elaboración posterior que pasarlo a limpio. Es muy utilizado sobre todo en arqueología.

El levantamiento diferido es el que se toman los datos necesarios en el lugar y después, en la oficina o estudio, se elaboran los dibujos. Es el utilizado en la mayoría de trabajos.

3.2. MÉTODOS TOPOGRÁFICOS

Cuando tenemos casos en los que no es posible acceder a los puntos de medición se hace preciso acudir a técnicas instrumentales que nos permiten la medición a distancia y sin tener accesibilidad, de cuantos puntos del edificio podamos observar desde la zona de visualización. Esta metodología se basa en la determinación de las direcciones y las distancias en que se encuentran los puntos a medir, desde puntos accesibles desde los que se realizan las observaciones.

En este sistema las herramientas utilizadas son varias, teodolito, estación total con prisma..., pero las que han solventado todos los problemas en la recogida de datos mediante esta técnica es la estación total con distanciómetro de rayo láser que permite saber a qué distancia está el punto del instrumento sin necesidad de llegar a él. Estos son ya muy sofisticados teniendo memoria interna para guardar los datos de los puntos medidos y su posterior volcado en el ordenador para ser tratados a través del programa adecuado de CAD, así se consigue precisión y rapidez en los levantamientos.

Los distintos métodos topográficos son los 3 en los que aumenta su precisión de menos a más:

Método de radiación

Basado en la medida de ángulos y distancias. Consiste en estacionar el instrumento topográfico, generalmente la estación total, en un punto aproximadamente central de los puntos que tenemos que levantar. Estos quedan definidos por sus coordenadas polares. Se utiliza en levantamientos en los que no es necesario el cambio de posición de la estación total.

Método de itinerario (poligonación)

Basado en la medida de ángulos y distancias. Es utilizado cuando el edificio a medir es muy extenso. Primero definiremos una serie de estaciones dispuestas en un recorrido de tal manera que desde cada una de ellas podamos ver la estación anterior y posterior. Este recorrido arranca y termina en la misma estación cuyas coordenadas estarán prefijadas, en el caso de la poligonal cerrada. También tenemos el caso de la poligonal abierta.

Método de intersección

Basados en la medida de ángulos, permite obtener coordenadas de uno o varios puntos apoyándonos en otros vértices con coordenadas determinadas en fases previas, la aplicación fundamental consiste en permitir la densificación de redes existentes.

Para resumir, la medición con teodolito o estación total, nos proporciona los resultados en coordenadas cartesianas y nos permite pasar la información a un sistema CAD y obtener finalmente documentos gráficos por medios de un plotter que nos dibujará con gran rapidez y precisión todos los puntos sobre el papel. Igualmente podremos continuar la realización de todo el dibujo del levantamiento mediante el propio CAD.

Errores comunes cometidos en mediciones topográficas

En cualquier medición siempre se va a generar algún grado de error, que es toda medida que no se ajusta o sea igual a la distancia real.

La causa de los errores puede agruparse en tres grupos:

Errores instrumentales. Toma de medidas erróneas (tanto ángulos como distancias), debido a la mala calibración de los aparatos o por desgaste de los componentes.

Errores personales. Son los errores asociados a limitaciones en los sentidos, especialmente de la pérdida de la agudeza visual. La mayoría de equipos

ópticos permite realizar ciertos ajustes para garantizar una buena visión, si el problema visual es muy acusado, se van a presentar errores por la imposibilidad de leer adecuadamente el instrumento.

Errores por factores atmosféricos. En este caso se tienen la lluvia, el viento y la más importante la temperatura.

Añadiendo más información, se puede decir que un error es negativo cuando la medida obtenida, bien sea de distancias o ángulos, está por debajo de lo real. Se dice que es positivo cuando la medida está por encima de lo real.

Otra forma de agrupar los errores es por la tipología, en lugar de la causa como se ha visto en el párrafo anterior:

Errores sistemáticos. Son aquellos que se repiten por igual a lo largo de todo el conjunto de mediciones. Estos están asociados a imperfecciones o a descalibración de los instrumentos.

Errores accidentales. Estos están asociados a los encargados de realizar las mediciones, sin embargo, tienen la condición que no se cometen por negligencia de los operarios sino por causas que éstos no pueden eliminar de las mismas. Por esto a este tipo de errores se les denomina fortuitos. El más común es el que tiene que ver con la falta de agudeza visual, esto quiere decir que no se reconocen con claridad las separaciones de las cintas, por ejemplo, los milímetros dando como resultados errores de lectura.

Es importante definir dos conceptos asociados al concepto de error: Precisión y exactitud. Estos dos conceptos son universales, es decir, son válidos para cualquier método de medición que utilicemos y que pretendamos calcular su error. Por ello, en los demás métodos haremos referencia a este apartado cuando sean nombrados.

Precisión. La precisión representa la posibilidad de repetición entre varias medidas de la misma cantidad, es decir, está asociado a la posibilidad de contar con instrumentos bien calibrados que para varias medidas entreguen el mismo valor. Otra manera de describirla: es una indicación de la proximidad entre las observaciones a sus valores verdaderos. Cuanto más alejado está una observación de su verdadero valor, menos exacta es.

En medidas lineales, es decir de distancias, se puede expresar el grado de precisión con la relación:

$$\text{Precisión} = \frac{1}{K} = 1:K$$

Donde K, es la medida en la cual se comete un error de tipo unitario. Es decir, cuando se tiene una precisión de 1:5000, quiere decir que por cada 5000 metros se comete un error de 1 metro, obsérvese que se colocan las mismas unidades a cada lado, de esta forma podría leerse igualmente que por cada 5000 milímetros se comete un error de 1 milímetro.

Para la mayoría de los levantamientos topográficos, se han definido grados de precisión recomendados. Estos valores deben compararse con los valores obtenidos en campo, debiéndose conservar siempre que la precisión en campo sea mayor o igual que la precisión recomendada.

Cuando se trata de medidas angulares, se ha definido el error de cierre, en este caso angular, solo para poligonales cerradas, en este caso el error de cierre, impide que la figura cierre, es decir que al graficar los datos de campo no se puede generar una poligonal cerrada.

Tipo de levantamiento	Precisión lineal (1: K)	Precisión angular
Preliminar	1:1000	$1.5\sqrt{n}$
Común con buena precisión	1:3000	$1''\sqrt{n}$
Precisión alta para trabajo en ciudad	1:5000	$30''\sqrt{n}$
Máxima precisión	1:10000	$15''\sqrt{n}$

Tabla 1. Precisión recomendada para levantamientos topográficos.

Fuente: Pérez (1999: 281 - 282)

El error poligonal de cierre se define como la diferencia entre la suma de los ángulos internos de la poligonal medidos en campo y la suma teórica de los ángulos internos de la poligonal. La suma teórica de los ángulos internos de una poligonal cerrada viene dada por la siguiente expresión:

$$\Sigma \text{ teórica} = 200(n - 2)$$

Donde n, representa el número de lados de la poligonal. Por ejemplo, un triángulo, presenta tres lados, luego la suma de ángulos internos interna teórica es:

$$\Sigma \text{ teórica} = 180(n - 2) = 200(n - 2)$$

$$\Sigma \text{ teórica} = 180(3 - 2) = 200 (n - 2)$$

$$\Sigma \text{ teórica} = 180 = 200$$

Exactitud. Se puede definir exactitud, como el acercamiento al valor real de lo que se mide, bien sea distancia o ángulo. O de otra manera, la precisión se refiere a la proximidad entre las observaciones repetidas de un mismo fenómeno. Si las observaciones están próximas entre ellas (reunidas), entonces se dice que han sido obtenidas con mucha precisión.

Esto quiere decir que la precisión no implica exactitud, es decir un equipo mal calibrado puede dar la misma medida en varias repeticiones (precisión), aunque esta no se acerque al valor real (exactitud), (DATATECA, 2016).

Generalmente, se suele hablar únicamente de precisión, pero esta es una medida relativa de la calidad de los datos. Un dato puede ser muy preciso, pero no exacto: si las observaciones están agrupadas, pero entorno a un valor que es diferente al real. De forma que este dato puede no ser útil para algunos propósitos.

De la misma forma, un conjunto de observaciones puede ser exacto, pero no preciso; si están distribuidas alrededor del valor real, pero dispersas.

Por último, el caso óptimo, es aquel en el que las observaciones son precisas y exactas, si están agrupadas en un entorno reducido del valor real.



Figura 1. Concepto gráfico sobre exactitud y precisión. Fuente:
<https://instrumentacionelectronica.wordpress.com/tag/exactitud/>

3.3. MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS

Hoy día la fotografía es un campo de aplicación muy importante en la documentación arquitectónica.

La fotogrametría, como ya hemos explicado anteriormente, es un sistema de medición basado en el uso de fotografías. Se apoya en los mismos principios que los sistemas topográficos, es decir, determinar direcciones en el espacio y definir mediante ellas la posición de determinados elementos de un objeto o edificio.

Por lo tanto, podremos definirla como aquella técnica que permite medir objetos, edificios o la misma superficie terrestre, a partir de imágenes perspectivas obtenidas por procedimientos fotográficos. Se rige por principios geométricos y matemáticos por lo que es una técnica rigurosa y precisa.

Son muchas las aplicaciones que podemos encontrar en la fotogrametría terrestre, por citar algunas de ellas:

- Levantamientos en general
- Estructuras arquitectónicas
- Cuevas
- Estatuas
- Excavaciones
- Relieves
- Mosaicos
- Estudios de deformaciones

Técnicas de la fotogrametría

Los diferentes tipos de fotogrametrías que existen son:

La fotogrametría analógica, surge en la década de los 30 basada en aparatos de restitución y la responsable de la realización de la mayoría de cartografía mundial.

La fotogrametría analítica, aparece en 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre los aparatos restituidores analógicos y el surgimiento de la computación. En ella, la toma de información es analógica y el modelado geométrico es matemático.

La fotogrametría digital, desarrollada en los 80-90, se basa, como su nombre indica, en la utilización de imágenes digitales o numéricas. Una imagen digital es simplemente un mapa de píxeles, es decir, un mosaico de pequeños cuadrados, tal como se nos aparecen en el monitor del ordenador, que se almacena de forma digital, mediante número. Existen dos procedimientos para la obtención de imágenes digitales. Uno, el más rápido y sencillo, consiste en utilizar una cámara digital formando de esa manera la matriz numérica directamente. El otro sistema, algo más lento, consiste en obtener una imagen fotogramétrica normal y digitalizarla mediante un scanner.

Cámaras utilizadas en fotogrametría

El tipo y modelo de cámara fotográfica, la lente y su calibración, son factores que afectan de forma importante a la calidad de medida en fotogrametría, principalmente porque conforman el sistema de entrada de datos en el proceso fotogramétrico. La bibliografía recoge tres tipologías de cámaras diferentes: las métricas, las no métricas y las semimétricas. (Lerma García, 2002).

Las cámaras métricas permiten recrear la orientación interna de cada fotograma mediante el empleo de marcas fiduciales o sensores de estado sólido calibrados, es decir, garantizan la posición de los puntos principales sobre la imagen. Nos permite reconstruir la geometría al momento de la toma fotográfica eliminando, de esta forma, la fase de calibración.

Cámaras no métricas (cámaras digitales convencionales) se caracterizan por tener una geometría interna desconocida, por lo que se hace necesaria la determinación de los parámetros de calibración (orientación interna) simultáneamente con el trabajo. Las ventajas respecto a las cámaras métricas son su tamaño y peso reducido, la capacidad de utilizar objetivos intercambiables, facilidad de compra y menor precio.

Por último, algunos autores han empleado cámaras semimétricas. Se trata de una conversión de una cámara no métrica a métrica mediante, generalmente, la incorporación de una placa de Roseau, es decir, una placa de vidrio que tiene grabada una retícula calibrada de cruces que se impresionan sobre la fotografía y que permiten controlar y corregir las deformaciones de la imagen que se producen por alteraciones dimensionales en su soporte. A pesar de que la geometría interna de las cámaras comerciales convencionales no métricas es generalmente inestable, sobre todo de las lentes (R Wackrow, 2008), el desarrollo de la informática en los últimos años y la aparición de software de calibración ha supuesto la sustitución de las cámaras métricas y semimétricas

Fotogrametría digital

La fotogrametría digital se basa, como su nombre indica, en la utilización de imágenes digitales o numéricas. Una imagen digital es simplemente un mapa de píxeles, es decir, un mosaico de pequeños cuadrados, tal como se nos aparecen en el monitor del ordenador, que se almacena de forma digital, mediante número.

El procedimiento para la obtención de imágenes digitales es rápido y sencillo. Consiste en utilizar una cámara digital formando de esa manera la matriz numérica directamente.

Errores cometidos en mediciones fotogramétricas

Como ya se comentó en el punto 3.2., exactamente en los errores comunes en el método topográfico, los aspectos del dato según la fuente son: Exactitud, precisión y, en este apartado añadimos, fiabilidad. La calidad de los datos y de los resultados que con ellos se obtienen se mide según éstos tres parámetros.

Uno de los aspectos no desarrollados en el apartado anterior es la **fiabilidad**, concepto que también es aplicable a cualquier método de medición. La fiabilidad se puede medir mediante dos aspectos, el primero es, hasta qué punto un pequeño error (grosero) en las observaciones puede ser detectado con una probabilidad determinada, y segundo, el efecto que este error puede tener en los resultados. El primero se conoce como fiabilidad interna, y al segundo como fiabilidad externa.

Continuando con el análisis de los errores de medición, se puede dar una estimación de la precisión utilizando medidas estadísticas de la dispersión. Las más utilizadas son la varianza o su raíz cuadrada y la desviación estándar.

Media,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Varianza,

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}.$$

Desviación estándar es **la raíz cuadrada de la varianza**.

Otras medidas de la precisión se obtienen utilizando otros estadísticos que mencionamos a continuación:

Peso: cuanto mayor es la precisión, menor es la varianza. El peso se define como la cantidad que es inversamente proporcional a la varianza, para variables independientes e incorreladas. La nombramos, pero no será utilizada.

Precisión relativa: es un índice de las medidas de la precisión, generalmente la desviación estándar, en relación a la cantidad medida o estimada. Por ejemplo, si una distancia "s" ha sido medida con una desviación estándar entonces, la precisión relativa es: el cociente de la desviación estándar σ_s partida la distancia s.

$$\text{Precisión relativa} = \sigma_s / s$$

Error medio cuadrático: se aplica cuando se dispone de los valores reales, de forma que pueden compararse con las observaciones.

$$EMC = \frac{\Sigma(X_o - X_v)^2}{n}$$

Donde,

x_o es el valor observado

x_v es el valor verdadero

n es el número de observaciones

Estos índices de la calidad de los datos de pueden aplicar de igual forma para dar una indicación de la calidad de MDT.

La precisión admitida según algunos estudios revisados (García-León et al, 2014) (Ortiz Ortiz et al, 2010) (Souto Vidal et al, 2015), ya que no hay normativa que regule los levantamientos ni los estudios de este tipo hechos con fotogrametría, pueden ser admitidos tolerancias de milímetros. Para unos de los trabajos revisados (Souto Vidal et al, 2015) con fotografías realizadas a distancias de 10 y 20 m los errores medios dados están entorno a los 20 mm, precisión que puede limitar la aplicabilidad cuando se precisan escalas superiores a 1:100. Estos errores se dan con algunos softwares libres que se pueden utilizar descargando su programa de Internet de forma gratuita. En otros casos y con software mucho más precisos (García-León et al, 2014) se pueden alcanzar tolerancias por debajo de los milímetros, de esta forma se pueden realizar trabajos con precisiones en las medidas más que suficientes para realizar planos a escalas mayores de 1:100.

3.4. MÉTODOS AVANZADOS: ESCÁNER LASER 3D

Sobre el año 2000 empezaron a utilizarse las estaciones totales con medida directa de distancia, gracias al láser eran capaces de medir distancias sin necesidad de emplear prisma reflectante. Más adelante empezaron a incorporar servomotores, cosa que dio lugar a las estaciones totales robotizadas, y más adelante al láser escáner, que como el resto de instrumental topográfico de uso corriente en la actualidad se beneficia de las últimas mejoras en la electrónica de la medida de distancias, tanto en precisión como en velocidad.

Mecánica del láser escáner

El láser escáner consta de dos componentes básicos:

- Un dispositivo de medida de distancias, el láser.
- Un mecanismo de barrido, es decir, un sistema motorizado de espejos que desvía el láser procedente del distanciómetro en las direcciones verticales y horizontales.

Provisto de este equipamiento, el escáner es capaz de medir la distancia de una gran cantidad de puntos, obteniendo al mismo tiempo datos referidos a los ángulos y al valor de la reflectancia de las distintas superficies impactadas con el láser. Con los valores angulares y la distancia registrados, se podrán calcular las coordenadas tridimensionales - x , y , z - de cada uno de esos puntos.

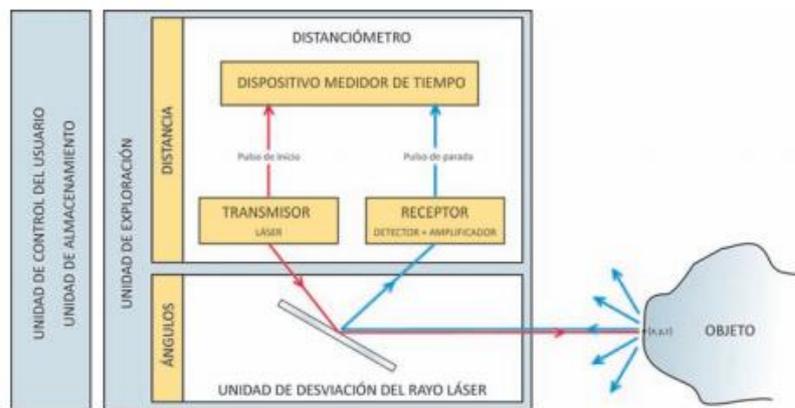


Figura 2. Esquema básico del funcionamiento de un láser-escáner. Fuente: García et al. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios.

Los equipos existentes de escáner láser tienen diversas características. Aquí diferenciamos si van montados sobre plataforma móvil o no, por ello, podemos diferenciar, primeramente, podemos hablar de **unidades dinámicas** (LiDAR, Mobile Mapping, etc.). En segundo lugar, podemos hablar de **unidades estáticas**. Las unidades estáticas son las utilizadas habitualmente en arquitectura y que a su vez se clasifican (según el sistema de medición de distancias) en escáneres basados en la medida del tiempo y escáneres basados en la medida de una triangulación (García et al, 2011).

La nube de puntos

La nube de puntos es el producto del trabajo realizado con el escáner láser, y su definición no es otra que un conjunto de puntos en un sistema de coordenadas tridimensional.

Otros enunciados que entran en más detalle especifican que las nubes de puntos están compuestas por “miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z) , que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrado, aunque como tal conjunto puntos sin procesado posterior, son un modelo muy simplificado que opera sólo visualmente, pues se compone únicamente de entidades singulares de tipo de punto” (Mañana et al, 2008).

Un modelo de nube de puntos no es más que una copia virtual del edificio, compuesto por puntos cuya captura ha sido realizada de forma altamente automatizada. De este modelo, la exactitud y la calidad con la que se realice está limitada por los errores inherentes al instrumental de medida y a los métodos de observación, además de la buena o mala distribución de las tomas. Para poder conseguir un registro lo más fiable posible será necesario atender a dos cuestiones clave: la resolución y la reflectividad.

La **resolución**: con ello nos referimos al nivel de detalle del trabajo. Para ello, tenemos que tener en cuenta la finalidad del trabajo y el nivel de detalle que necesitamos. También que a mayor detalle más tiempo de escaneo, mayor tamaño de los ficheros y mayor volumen de datos a manejar. A esto debemos sumar que debemos saber la precisión máxima que puede ofrecer el instrumental que vamos a utilizar.

La **reflectividad**: cuando el láser impacta en la superficie de un objeto, una parte de la energía del haz de luz es absorbida por el material que lo compone, y otra parte es reflejada al medio original. Ésta última es la que tiene que detectar el escáner para calcular la distancia. Cuanto mayor sea la intensidad de la señal de retorno, más precisa será la distancia medida. De la reflectividad dependen las características del material (rugosidad y color) y las condiciones geométricas de la observación, ya que en distancias largas y ángulos escorados aumenta el ruido de la señal. La geometría perfecta se consigue cuando colocamos la dirección del haz del láser perfectamente perpendicular a la superficie.

Modelo 3D. Errores del sistema

Una vez obtenida la nube de puntos la procesaremos y depuraremos para tener un resultado fiable de la geometría del objeto de estudio y así poder elaborar productos derivados de éste. Una buena georreferenciación de los escaneos es fundamental para componer el modelo final.

En este apartado hablaremos sobre los errores instrumentales y el depurado de las nubes de puntos.

Por ello, comenzamos diciendo que la precisión de los instrumentos es finita y muy difícil de determinar, ni siquiera las mismas empresas suministradoras de los equipos láser son capaces de facilitar datos seguros.

La precisión de un instrumento está asociada a la apreciación (la unidad de magnitud mínima que puede detectar) y la exactitud a la calidad de la calibración.

También existen errores que no dependen del mecanismo del instrumento de detección remota, es decir, agentes externos como pueden ser las condiciones ambientales y las características del objeto que se mide. Las fuentes de error pueden descomponerse en dos grupos:

Erros debidos al diámetro del láser. El láser no es infinitamente delgado por lo que al incidir en una arista puede reflejarse en dos planos diferentes devolviendo dos distancias diferentes. En ambientes de mucha humedad o polvo, el láser puede reflejarse incluso en partículas en suspensión.

Errores debidos a la reflexión de la señal. La medida de distancia depende de la calidad de la señal reflejada, que depende de varios factores:

- **Las condiciones atmosféricas.** Cuando la temperatura y la presión están en condiciones extremas puede variar la velocidad del pulso láser.
- **Los ángulos de incidencia.** El ángulo de incidencia que mejor refleja el pulso láser es el perpendicular a la superficie escaneada.
- **El nivel de reflectividad de los materiales.** Los materiales claros reflejan mejor la señal que los oscuros.

Todos estos errores son sistemáticos, pero también pueden considerarse accidentales ya que combinados entre ellos no se repiten en una magnitud conocida. Pero en cualquier caso estamos obligados a eliminar o corregir los puntos con errores más evidentes. Para ello existen programas *ad hoc* que se sirven de algoritmos para examinar cada punto del escaneo y comprobar si cumplen con las condiciones de calidad establecidas.

Por otra parte, también es necesario hablar sobre la **georreferenciación y propagación de errores.**

Al documentar por completo un edificio casi siempre son necesarios varios posicionamientos del escáner para registrar todas las partes del inmueble. Por ello, si las especificaciones de nuestro escáner nos dicen que tiene un cierto error, en cada posicionamiento se irían sumando, pero normalmente estos errores suelen producirse tanto por exceso como por defecto por lo que al final tienden a compensarse.

Cada escaneo que realizamos tiene un sistema de coordenadas relativo, por lo que cada uno de ellos debe de contar con referencias comunes que permitan encajar unas nubes de puntos con otras y conocer las coordenadas de estas referencias para poder orientar el levantamiento al sistema de coordenadas absoluto.

La propagación de errores debido a la georreferenciación tiene que ser analizada para ver las causas de las incertidumbres que intervienen:

- Primero, cuantas mediciones han sido necesarias para alcanzar la magnitud final.
- Segundo, con qué desviaciones se ha realizado cada una (según el método o los instrumentos empleados).
- Tercero, cuál es el sentido de transmisión de los errores (longitudinal o perpendicular).

Casi se puede asegurar que las precisiones milimétricas de las que se habla en el campo del escáner láser son inalcanzables en la mayoría de los trabajos.

El modelo resultante de la georreferenciación

La información que recoge el láser escáner se compone de simples valores numéricos que son los que definen las características de cada punto medido (los valores de posición x , y , z , los valores de intensidad y , en su caso, los valores RGB). El software es el que luego lee y traduce esos valores generando a partir de ellos la representación gráfica que observamos en la pantalla.

Gestión de los archivos de nube de puntos

Primeramente, en el procesado se realizan las fases de importación de la nube, filtrado de puntos y unión de los escaneos (que se realizarán con el software que proporciona el fabricante del escáner. A continuación, en función del tipo de análisis que se pretenda, será preciso que los escaneos tengan una mayor o menor resolución, lo que repercutirá directamente en el tamaño del fichero.

Productos

Todos los productos que es posible extraer de un modelo de nube de puntos, plantas, secciones, vistas, etc. hacen que la información geométrica referente a un edificio sea más comprensible y manejable, pero a la vez menos exactas

debido a que los procesos para obtenerlos implican varias transformaciones de los datos.

A continuación, se comenta brevemente la diferencia de levantar un edificio con estación total o con escáner láser.

- En el primer caso, los datos originales son sólo aquellos referentes a la x , y , z , de los puntos que se han medido con el equipo, estación total, mientras que las polilíneas que conforman el modelo vectorial no son otra cosa que interpolaciones que no tienen por qué responder a la realidad salvo en los puntos extremos.
- En el segundo caso, en los levantamientos realizados con alta definición, mediante escáner láser, es posible obtener productos sin delinear, que respetan el dato original solo con diseccionar el modelo de nube de puntos. Que una serie de puntos alineados parezcan una línea continua es cuestión de escala.

3.5. CONCLUSIONES DE LOS MÉTODOS

Después de analizar los distintos métodos que existen hoy día para el levantamiento arquitectónico, podemos decir que tenemos un amplio abanico (métodos simples, estación total, fotogrametría, escáner láser) y que en la mayoría de trabajos son utilizados de forma conjunta. De todos ellos, podemos elegir el que cumpla los requisitos que necesitamos para nuestro trabajo.

Como requisitos podemos diferenciar una serie de aspectos como pueden ser: el nivel de detalle requerido en el trabajo, la dificultad de la morfología del objeto, rapidez del levantamiento, presupuesto disponible, medios disponibles.

De la variedad de métodos que tenemos en la actualidad, la realidad de nuestra sociedad es que la mayor parte de técnicos y expertos relacionados con la conservación del patrimonio cultural siguen empleando las técnicas de corte tradicional. (Martínez Rodríguez, Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes., 2014). Esto es debido a la sencillez de su uso y coste, pero implica la pérdida de información en la transferencia de datos del elemento real al modelo y su precisión puede ser insuficiente (Yilmaz et al., 2008). Por otra parte, los métodos topográficos, están limitados cuando el objeto de estudio presenta formas irregulares no asimilables a formas geométricas sencillas.

La obtención de documentación 3D con programas fotogramétricos tiene muchas ventajas con respecto a los métodos tradicionales. Tienen mayor nivel divulgativo o de archivo, salvaguarda el patrimonio histórico y cultural permitiendo el trabajo distribuido y ahorra costes de desplazamiento para el estudio y planificación de las intervenciones (Martínez Rodríguez, 2014).

A diferencia de los modelos teóricos o idealizados obtenidos mediante métodos tradicionales, los métodos fotogramétricos o de escáner láser 3D reproducen la morfología real del objeto con todas sus irregularidades. Además, obtener modelos digitales permite generar productos derivados como restitutiones 2D o 3D muy precisas, que son muy útiles a la hora de acometer obras de rehabilitación o restauración en edificios históricos que en ocasiones carecen incluso de planos arquitectónicos originales (Martínez Rodríguez, 2014).

A día de hoy, en el caso de levantamientos arquitectónicos del patrimonio el escáner láser sigue dominando fuertemente debido a su alta captación de datos, su precisión relativamente elevada y la alta densidad de datos espaciales. Aunque hay que tener presente que para la documentación de elementos de grandes dimensiones se utiliza al uso combinado de levantamientos topográficos de precisión y técnicas fotogramétricas junto al láser escáner 3D (García-León et al, 2014).

Hay que tener en cuenta que el fuerte desarrollo que están teniendo los programas fotogramétricos en los últimos años y el nivel de precisión que están obteniendo junto con la velocidad de adquisición de datos y su bajo coste (Fernández et al, 2012), éstos pueden desbancar a láser escáner 3D en un futuro próximo.

Tras realizar esta revisión de trabajos y métodos sobre levantamientos arquitectónicos, el presente trabajo fin de Máster se centrará en evaluar una de las metodologías con más visión de futuro, la fotogrametría terrestre o de objeto cercano.

El siguiente punto desarrolla un caso práctico sobre unos de los edificios de la Escuela Politécnica de Cáceres.

4. CASO PRÁCTICO

COMPARACIÓN DE SOFTWARES FOTOGRAMÉTRICOS APOYADOS EN PUNTOS TOMADOS CON ESTACIÓN TOTAL Y FLEXÓMETRO

Tras analizar los diferentes métodos de levantamiento arquitectónico y habernos decantado por el levantamiento fotogramétrico como el más interesante y potencial hoy día, vamos a realizar un estudio de comparación y de fiabilidad de cuatro softwares fotogramétricos más conocidos en la actualidad para llevar a cabo dicho trabajo.

El objeto arquitectónico seleccionado para realizar el levantamiento es el edificio de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica de Cáceres de la universidad de Extremadura.



Figura 3. Fachada principal del edificio de Telecomunicaciones de Politécnica de la UNEX.

En una primera parte del caso práctico vamos a realizar un levantamiento de fachada con estación total para obtener las medidas que tomaremos como reales del edificio.

También disponemos de la medida tomada con flexómetro de la puerta principal.

Después realizaremos los levantamientos con los distintos softwares fotogramétricos explicando los pasos dados.

Tras realizar los modelos haremos un estudio y revisión de los datos obtenidos.

Por último, discutiremos los resultados y sacaremos unas conclusiones del trabajo llevado a cabo.

4.1. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO REALIZADO CON ESTACIÓN TOTAL

En esta parte del TFM se va a explicar la realización del levantamiento de la fachada principal y partes colindantes del edificio de telecomunicaciones de la Escuela Politécnica de Cáceres con estación total para obtener medidas reales con precisión milimétrica para su posterior comparación con los diferentes softwares fotogramétricos seleccionados en el trabajo. No es necesario el levantamiento completo del edificio por carecer de relevancia para la finalidad del estudio.

Para realizar el levantamiento hemos tenido que estacionar en tres puntos, bases topográficas, diferentes para poder obtener las medidas necesarias de la fachada que nos interesan para el trabajo.

De esta manera, hemos hecho las correcciones de error pertinentes para realizar un levantamiento fiable con dimensiones precisas para su posterior comparación.

Por lo tanto, las coordenadas obtenidas han sido tanto planimétricas como altimétricas, por lo que tenemos coordenadas tridimensionales de todos los puntos.

En esta parte del proyecto, hay que decir, que nos apoyamos en un trabajo realizado por alumnos de segundo curso del grado de Ingeniería de Edificación de la Escuela Politécnica de Cáceres. De ello se han extraído los datos de campo y se han depurado de manera que sean fiables para nuestro interés. Las reseñas de las bases topográficas se pueden ver en el Anexo I del presente trabajo.

4.1.1. POLIGONAL

Material empleado:

1. Estación total.
2. Trípode.
3. Prisma.
4. Metro.

Metodología

Poligonales: las poligonales o itinerario, es una sucesión encadenada de líneas, unidas mediante vértices, de los cuales se pretende obtener las coordenadas planimétricas (X, Y), las altimétricas (H), y en la mayoría de los casos ambas.

Lo primero que realizamos es la selección de las bases de la poligonal, las cuales fueron tres, distribuidas para visualizar los puntos que nos interesan del edificio. Una de ellas tiene coordenadas absolutas conocidas, pero que obviaremos en nuestro trabajo por carecer de interés y dificultar un poco los cálculos y su manejo.

Coordenadas absolutas del punto BT 1000, que corresponde con el punto llamado E_A de coordenadas en el sistema de referencia propio (0,0,0) m, para posibles trabajos posteriores:



Figura 4. Base topográfica BT 1000.

Desde A hay que visar al prisma situado en un punto, también de coordenadas absolutas conocidas BT 1001 ($X= 728564,210\text{m}$, $Y= 4373269,808\text{m}$, $Z= 423,690\text{m}$). Después visaremos a las bases B y C con ayuda del prisma, subiéndolo o bajándolo si fuera necesario, al visar a una base anotamos el ángulo horizontal y vertical y la distancia reducida en Círculo Directo y anotamos lo mismo en Círculo Inverso (Regla de Bessel). También es necesario apuntar la altura de la estación total i (en metros) y la altura que el prisma tenía en cada base m (en metros).

Repetir este proceso estacionando en la base B y en la C.

Memoria de cálculos

Para el cálculo de la poligonal se ha hecho el promedio de los ángulos horizontales, verticales y las distancias:

La distancia total de la poligonal es:

- A-B: 26,251 m

- B-C: 56,872 m

- C-A: 39,892 m

Longitud total = 123,015 m

El error total máximo de una poligonal es el mayor de los dos: error transversal o error longitudinal.

Error transversal

$$e_t = \frac{L}{n} \frac{e_{a(lh)}}{r} \sqrt{2} \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}} = \frac{123,015}{3} \frac{21,55}{636620} \sqrt{2} \sqrt{\frac{3(3+1)(2 \times 3+1)}{6}} = 0,0073 \text{ m} = 7,3 \text{ mm}$$

- Error de verticalidad y de lectura.

$$e_v = \frac{s}{12} = \frac{40}{12} = 3,33^{cc} \quad e_l = a = 10^{cc}$$

- Error de dirección.

$$e_d = \left(\frac{ee + ec}{D} \right) \times r = \left(\frac{0,025}{1000} \right) \times 636620 = 15,92^{cc}$$

- Error de puntería.

$$e_p = \frac{10''}{A} \left(1 + \frac{4A}{100} \right) = \frac{10''}{30} \left(1 + \frac{4 \times 30}{100} \right) = 0'73'' = 2,25^{cc}$$

- Error angular.

$$e_a = \sqrt{e_v^2 + e_l^2 + e_d^2 + e_p^2} = \sqrt{10,28^2 + 10^2 + 15,92^2 + 2,25^2} = 21,55^{cc}$$

Error longitudinal

$$e_L = \frac{ED}{\sqrt{2}} \sqrt{n} = \frac{12,143}{\sqrt{2}} \sqrt{3} = 14,872 \text{ mm}$$

- Error máximo de la distancia.

$$ED = \sqrt{ed^2 + ee^2 + es^2 + ej^2} = \sqrt{5,24^2 + 2^2 + 10^2 + 4^2} = 12,143 \text{ mm}$$

- Error de distancia a estación total.

$$e_d = (5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm} \times 0,08) = 5,24 \text{ mm}$$

- Error de estación, de señal y de inclinación del jalón.

$$e_e = 2 \text{ mm} \quad e_s = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm} \quad e_j = 4 \text{ mm}$$

TOLERANCIA DEL CIERRE ACIMUTAL

$$T_a \leq e_{a(lh)} \sqrt{2} \sqrt{n} = 21,52 \sqrt{2} \sqrt{3} = 52,713^{cc}$$

TOLERANCIA EN DISTANCIAS

$$T_D \leq e_D \sqrt{2} = 12,143 \sqrt{2} = 17,173 \text{ mm}$$

Error de cierre planimétrico

$$e_{\text{cierre}} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} = \sqrt{0,006^2 + 0,003^2} = 0,0067 \text{ m} = 6,7 \text{ mm} \leq 14,872 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el error máximo de la poligonal es el error longitudinal, es decir, 14,872 mm. Si el error está dentro de tolerancia, que en este caso es así, se compensa.

Cálculo de la poligonal

Lo primero de todo es calcular los valores promedios de Lh, Lv y Dr.

A continuación, se ha calculado el azimut y su error y como dicho error está dentro de tolerancia se ha compensado.

Se calculan las coordenadas planimétricas parciales se han calculado los incrementos de X e Y mediante las siguientes formulas:

$$\Delta X_{AB} = Dr_A^B \sin \theta_A^B \qquad \Delta Y_{AB} = Dr_A^B \cos \theta_A^B$$

Una vez calculado los incrementos, calculamos las coordenadas absolutas de cada vértice sumando los incrementos de coordenadas a vértice:

$$X_B = X_A + \Delta X_A^B \qquad Y_B = Y_A + \Delta Y_A^B$$

Para el cálculo de las coordenadas altimétricas primero se calcula los desniveles con la siguiente fórmula:

$$\Delta Z_{AB} = t + i - m$$

Y se calcula las coordenadas absolutas de cada vértice sumando los incrementos de coordenadas a vértice:

$$Z_B = Z_A + \Delta Z_A^B \qquad Z_C = Z_B + \Delta Z_B^C$$

En nuestro proyecto vamos a tomar la base A con las coordenadas (0, 0, 0) y las demás estarán representadas en torno a ella. Sabiendo que sus coordenadas absolutas son X=728624.380 m, Y=4373254.473 m, Z=423.780 m, (Figura 4).

El sistema de coordenadas se orientó tomando otro punto de sistema de coordenadas absolutas Punto 2, X= 728564.210 m, Y= 4373269.808 m, Z= 423,690 m.

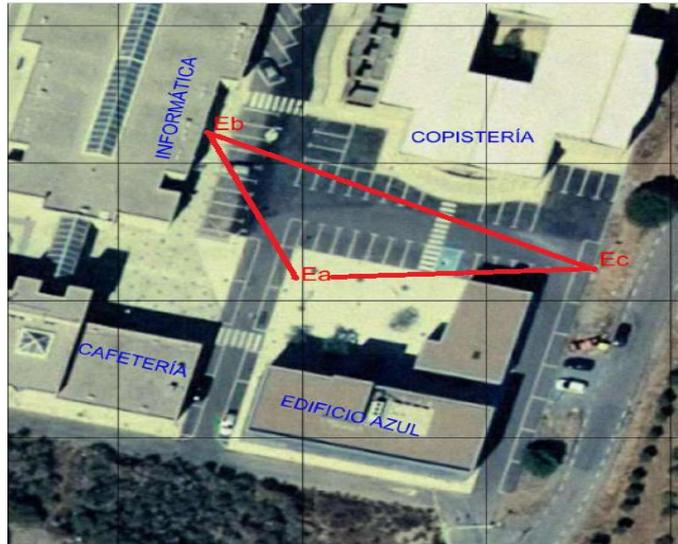


Figura 5. Fotografía aérea con situación de las bases topográficas empleadas en la toma de datos por topografía.

La toma de datos y los cálculos de las coordenadas de la poligonal se pueden consultar sus reseñas con más detalle en el ANEXO II.

4.1.2. RADIACIÓN

Material empleado.

1. Estación total
2. Trípode
3. Prisma
4. Metro

Metodología

Radiación: Es un método topográfico directo que permite determinar las coordenadas (X, Y, Z) desde un punto fijo, "Polo de radiación".

Para hacer esta parte del trabajo con estación total hay que seguir un método muy similar al seguido en el apartado de poligonal.

Hay que estacionar en las bases y visar los puntos necesarios para dibujar la planta del edificio que nos interesa y también hay que radiar los puntos de la fachada principal que son objeto de las medidas de comparación con los métodos fotogramétricos.

Para coger los puntos estacionamos en la base A, visamos a los puntos de interés y anotamos los ángulos horizontales y verticales y la distancia reducida en Círculo Directo. También hay que apuntar la altura de la estación total y la altura del prisma, si se ha utilizado.

Realizaremos el mismo procedimiento estacionando en las otras dos bases, B y C.

Memoria de cálculos

La toma de datos y el cálculo de este apartado se pueden consultar en el ANEXO III.

Cálculo de la radiación

Cálculo de errores a priori:

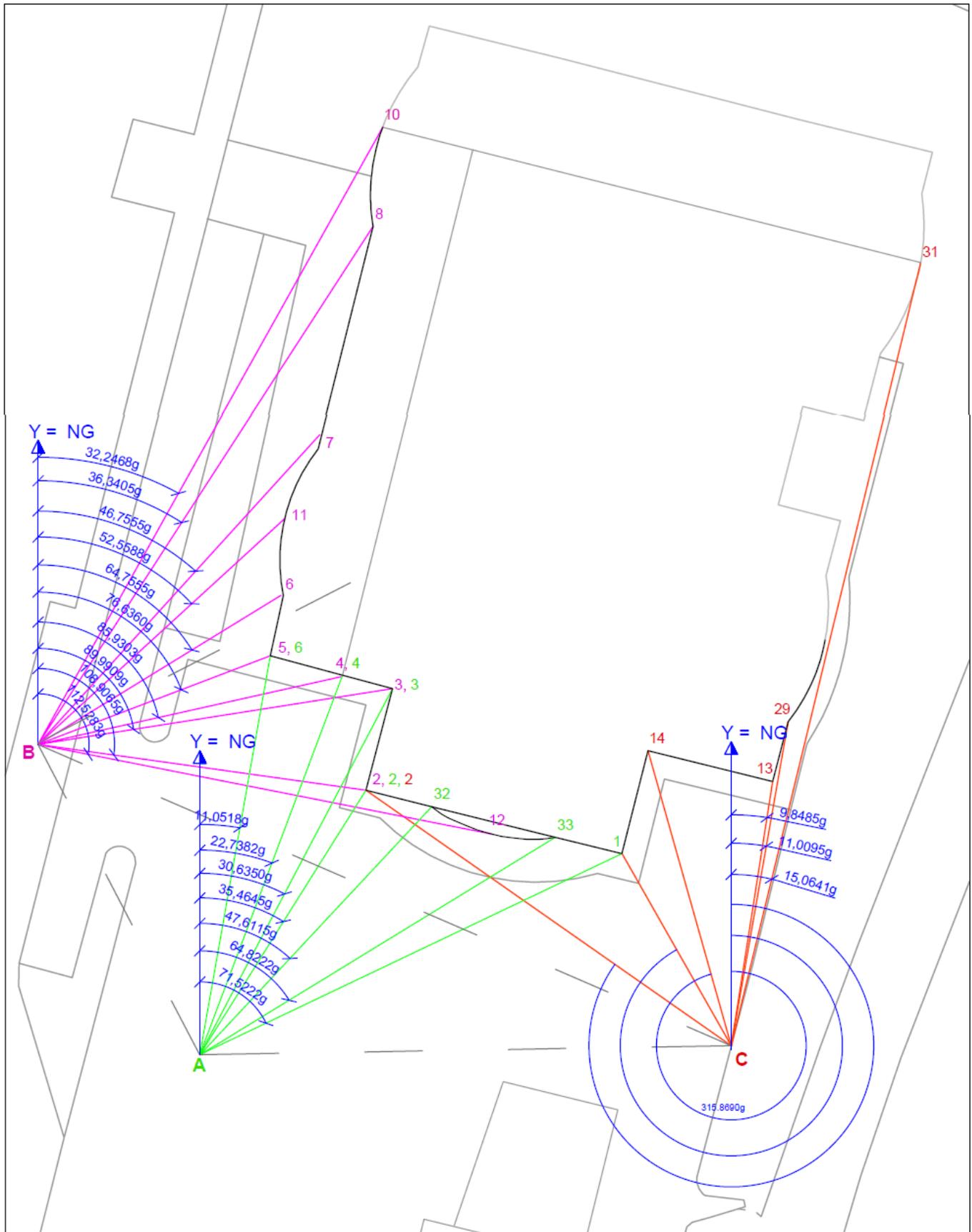
El error total máximo de una radiación es el mayor de los dos: error transversal o error longitudinal.

$$e_t = \frac{e_a(Lh)}{r} D = \frac{21,55}{636620} 123,015 = 0.004164 \text{ m} = 4,164 \text{ mm}$$

$$e_L = \sqrt{e_d^2 + e_e^2 + e_s^2 + e_j^2} = \sqrt{5,24^2 + 2^2 + 10^2 + 4^2} = 12,143 \text{ mm}$$

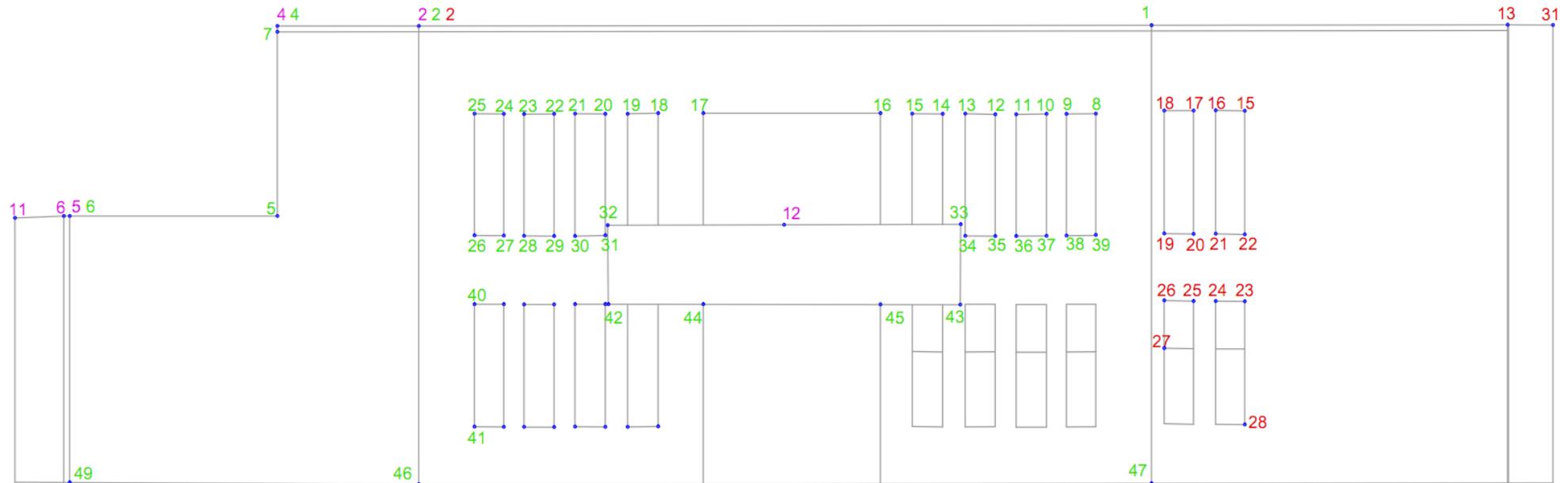
Por lo tanto, el error máximo de la radiación es el error longitudinal, es decir, 12,143 mm.

4.1.3. PLANO DE PUNTOS RADIADOS



ESCALA 1:400

4.1.4. PLANO DE PUNTOS DE LA FACHADA PRINCIPAL



ESCALA 1:150

Puntos radiados desde A

Puntos radiados desde B

Puntos radiados desde C



4.1.5. PROCESADO DE LOS DATOS Y REPRESENTACIÓN EN 3D CON AUTOCAD PARA TOMA DE MEDIDAS

Después de realizar el levantamiento y de calcular los datos tomados de cada punto con la estación total, se ha procedido a realizar un plano en 3 dimensiones con AutoCAD. Gracias a esto tendremos los puntos visualizados y en los que uniremos con líneas gracias a las herramientas de dicho programa. También podremos acotar las dimensiones que no son de interés con precisión milimétrica para proceder a la comparación con las medidas que obtendremos de los softwares fotogramétricos.

El procedimiento que se ha realizado ha sido el siguiente:

Primero, después de haber obtenido todas las coordenadas en Excel, las hemos unificado en mismo archivo, que hemos depurado primero con Microsoft Word para poner la separación entre coordenadas con punto y coma.

Después de realizar esto lo hemos exportado como archivo con formato .txt y lo hemos guardado con todas las coordenadas de los puntos, ejemplo de este paso se muestra en la Figura 6.

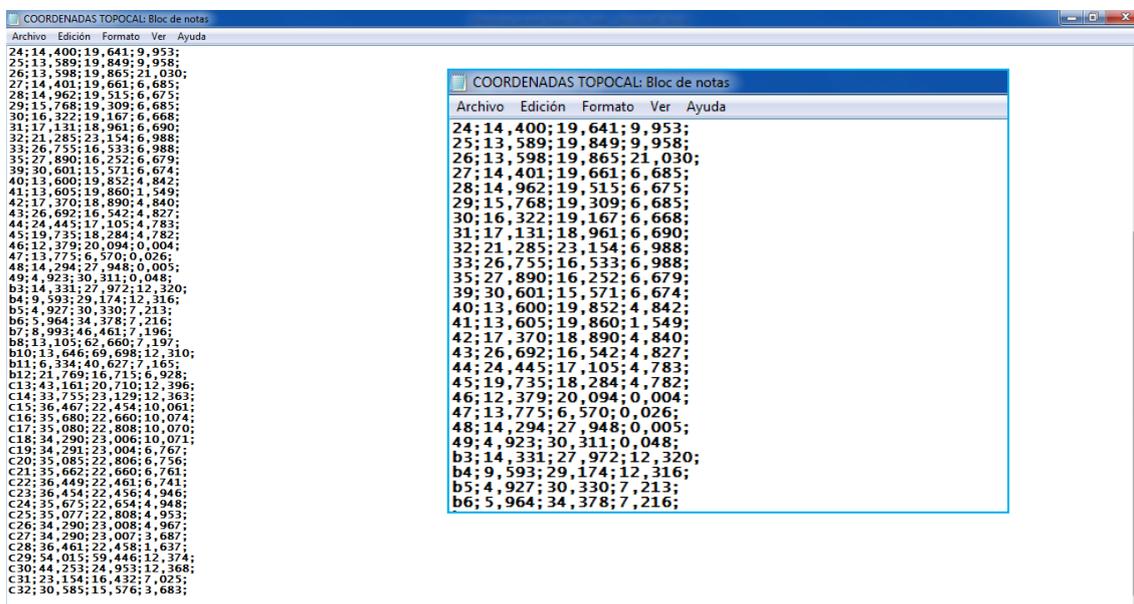


Figura 6. Coordenadas de los puntos en un archivo de bloc de notas.

A continuación, hemos utilizado el programa Topocal, un software libre, que nos ayuda dibujar los puntos en un espacio virtual. Este programa lo he utilizado más bien para exportar los datos como .dxf para tratar mejor con AutoCAD, ya que este programa está un poco limitado en la faceta de dibujo

asistido. Hemos importado los puntos en formato .txt separado con punto y coma como se puede ver en la Figura 7.

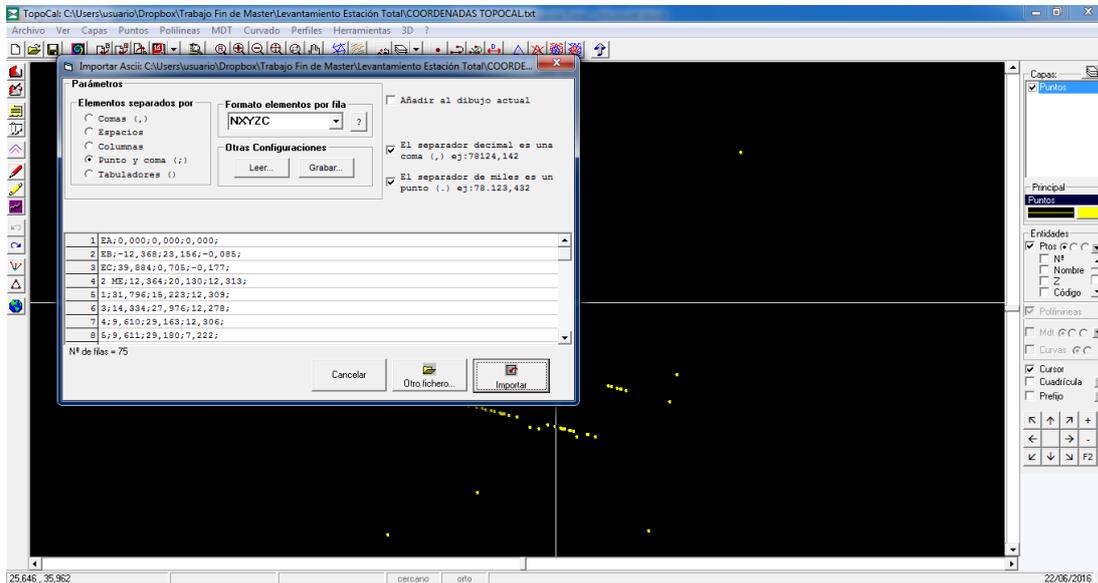


Figura 7. Coordenadas de los puntos exportadas a Topocal.

En la Figura 8 se muestra una imagen de las coordenadas de los puntos representadas en TOPOCAL.

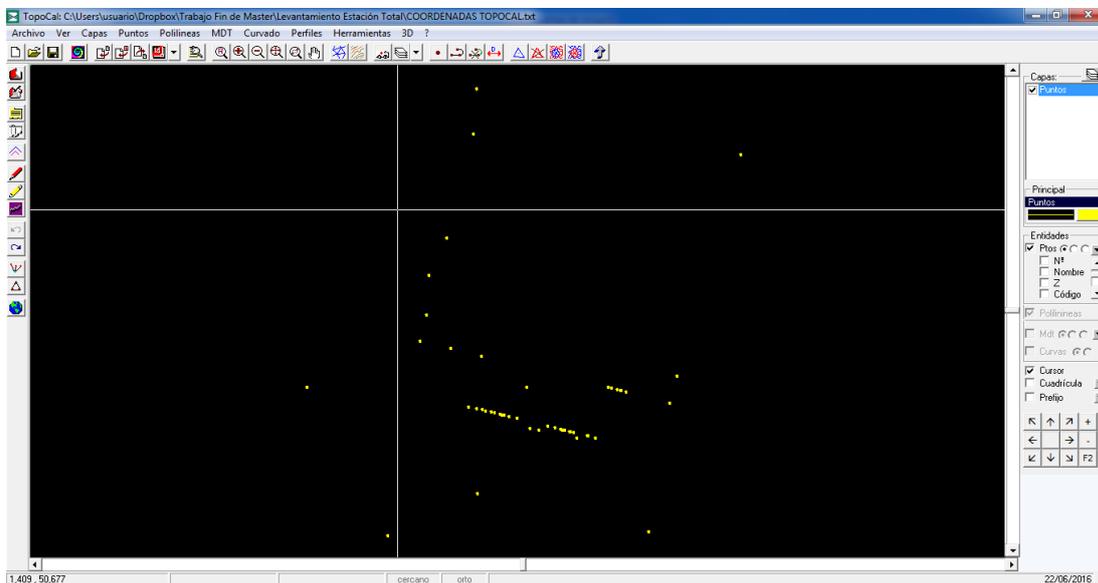


Figura 8. Vista de los puntos en Topocal.

Este programa tiene la opción de exportar los datos como .dxf, así se hizo y se abrió con el programa AutoCAD. El programa tiene la capacidad de visualizar los puntos en 3D como se presenta en la Figura 9.

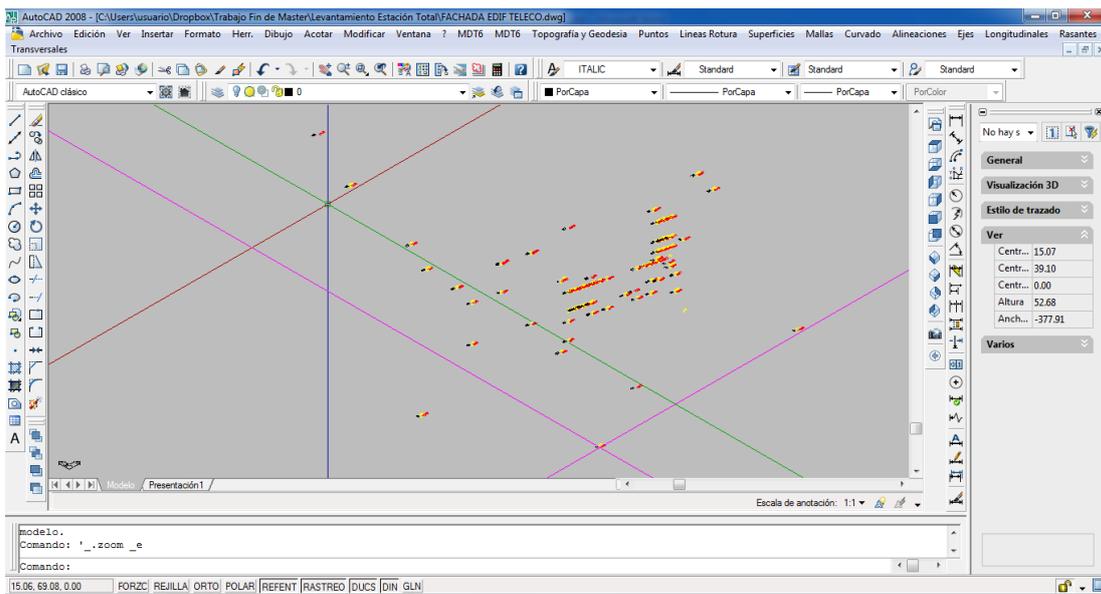


Figura 9. Vista de los puntos en 3D con el programa AutoCAD.

Después de familiarizarnos con la nube de puntos comenzamos a unirlos de manera que fuera cogiendo forma la silueta del edificio. Los resultados de este dibujo, que está escalado y del que se pueden tomar medidas exactas con precisión milimétrica lo observamos en la Figura 10.

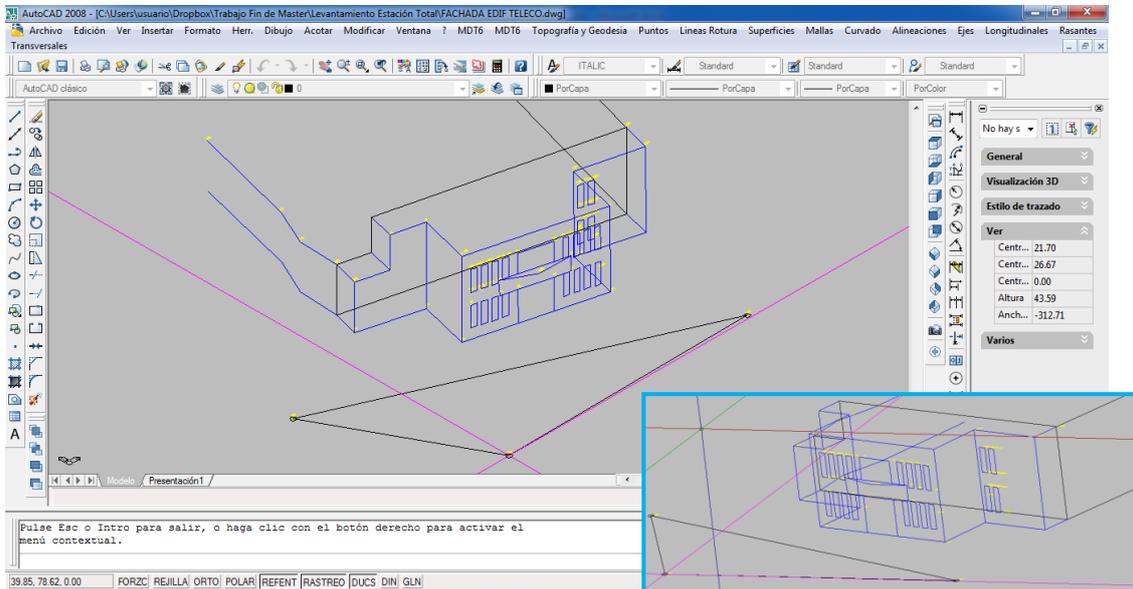


Figura 10. Vista en 3D del edificio delineado.

A continuación, vamos a representar el plano de alzado de la fachada con las cotas, Figura 11, que serán objeto de comparación con las medidas obtenidas con los softwares libres fotogramétricos.

Plano de alzado de la fachada principal del edificio de Telecomunicaciones.

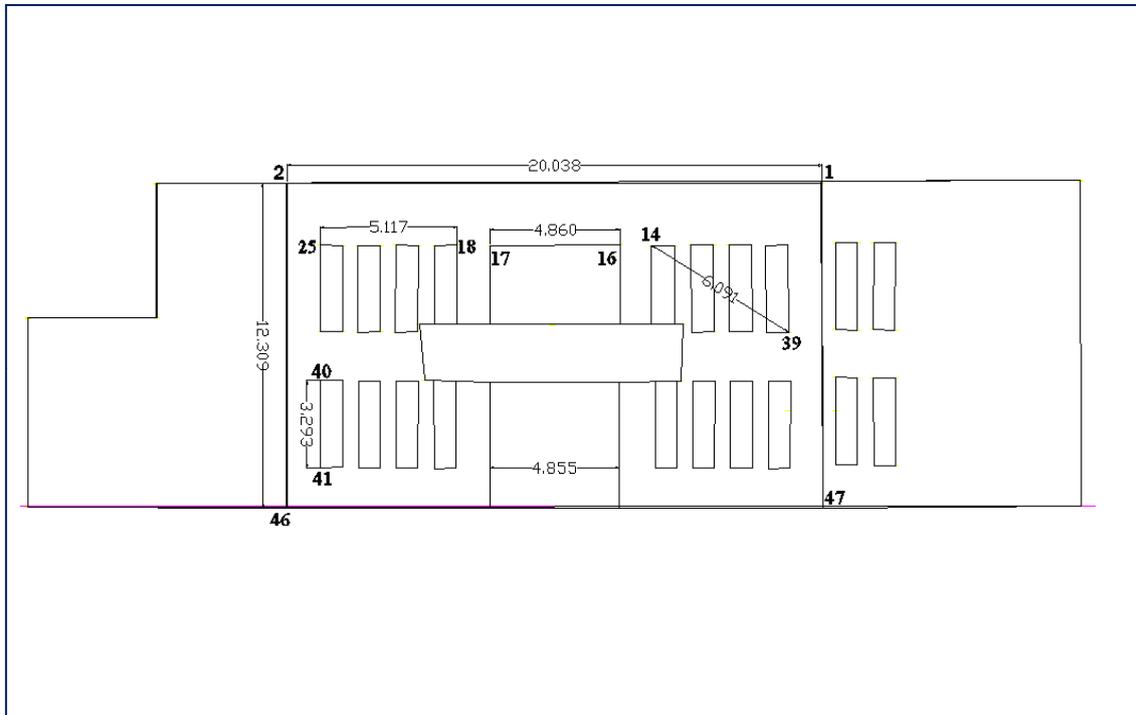


Figura 11. Plano fachada principal con mediciones.

Medidas entre los puntos:

2-1	20.038 m
46-2	12.309 m
25-18	05.117 m
40-41	03.293 m
17-16	04.860 m
14-39	06.091 m

Tabla 2. Medidas obtenidas con la Estación Total.

- Entrada ppal. = 4.855 m

En la Tabla 2 tenemos las medidas seleccionadas de la fachada con precisión de milímetros. Ahora realizaremos los levantamientos con los diferentes softwares libres de fotogrametría seleccionados para este trabajo.

4.2. TOMA DE MEDIDA DE REFERENCIA CON FLEXÓMETRO

Gracias a mi tutora del TFM obtuve la medida de la entrada principal del edificio tomada con flexómetro. Se midió a la altura del suelo y a un metro sobre éste. La medida obtenida fue:

Ancho puerta principal = 4.820 m

4.3. LEVANTAMIENTOS ARQUITECTÓNICOS REALIZADO CON PROGRAMAS FOTOGRAMÉTRICOS

El levantamiento va a ser realizado con programas fotogramétricos disponibles en internet. Son fáciles de adquirir, algunos tienen una versión de prueba gratuita y otros son completamente gratuitos. Algunos poseen la versión profesional que permiten funciones más avanzadas pero que requieren un pago para su adquisición. Los softwares seleccionados, son los siguientes:

- 123D Catch de Autodesk. Empresa EEUU. También se encarga del prestigioso software Autocad que además es líder en diseños 3D, publicó en 2012 esta aplicación para dispositivos iOS, Android y ordenador.



<http://www.123dapp.com/catch>

- PhotoScan de Agisoft. Empresa Rusa. Fundada en 2006 como una compañía de investigación innovadora con enfoque en la tecnología de visión por ordenador. Esta empresa ha adquirido experiencia en algoritmos de procesamiento de imágenes, con las técnicas de fotogrametría digital, para el desarrollo de herramientas aplicadas.



<http://www.agisoft.com/>

- Pix4D. Empresa suiza. La compañía desarrolladora de este programa fue fundada en 2011 en Lausana, Suiza y actualmente son el mayor proveedor de software de procesamiento de imágenes para drones en la

industria, además de convertirse en un referente. Poseen oficinas en Lausana, San Francisco y Shanghai (Ricardo, 2015).



<https://pix4d.com/>

- Visual SFM. Inventor es el ingeniero Changchang Wu, estudiante de la universidad de North Carolina. EEUU. Este software tiene su origen en la universidad de Seattle, cuyo y es una herramienta que nos permite realizar modelos 3D a partir de imágenes en 2D.



<http://ccwu.me/vsfm/>

Todos estos programas trabajaban a través del sistema *SFM* y algunos los combinan con las bases de la fotogrametría tradicional. ...

En general, vamos a dividir los trabajos de levantamientos fotogramétricos en dos partes, al igual que los trabajos topográficos, una será la sesión fotográfica o trabajo de campo y la otra, la creación del modelo con el programa que es el procesado fotogramétrico.



4.3.1. TRABAJO DE CAMPO

4.3.1.1. TOMA DE IMÁGENES

La toma de imágenes será común a todos los programas utilizados en el trabajo, con ello partimos con unas mismas imágenes, es decir, un mismo trabajo de campo para dejar a los programas comparados mostrar sus cualidades a la hora de hacer el levantamiento tridimensional del edificio.

Vamos a tener una serie de consideraciones a la hora de tomar las fotografías del objeto, en este caso parte del edificio de telecomunicaciones, ya que estos softwares utilizan la combinación de imágenes del mismo elemento (SFM). Estas son:

- Tener buena iluminación y homogénea, es decir, condiciones de luz constantes. Lo óptimo es realizar la sesión de fotografiado en días nublados y a primeras horas de la mañana para evitar sombras en las fachadas del edificio. Estas pueden disminuir la calidad del modelo, ya que el movimiento del sol hace que las posiciones de las sombras también varíen en las imágenes dificultando su orientación (AGISOFT, s.f.).
- Usar la cámara sin flash y no alterar el zoom en ningún caso.
- Realizar un recorrido continuo alrededor del objeto y tomando las imágenes con solape, es decir, que haya partes comunes entre las imágenes correlativas.
- Deben evitarse objetos que se interpongan entre la cámara y el objeto. En este caso, un par de coches entorpecieron el modelado de una parte del edificio pero que no intercedían en la zona de toma de las medidas comparativas.
- Al guardar las fotos en la carpeta se debe verificar que todas estén rotadas en la misma posición. Así serán reconocidas mejor por el programa.

Vamos a nombrar unas recomendaciones para la toma de imágenes. Éstas fueron presentadas por primera vez por Peter Whadausl y Cliff Ogleby en 1994, la Regla 3x3 es una manera práctica de tomar imágenes para futuras aplicaciones métricas usando la fotogrametría. Comité Internacional para la documentación del Patrimonio Cultural (CIPA 3X3 Rules, 2014).

Son reglas sencillas para la toma de fotografía con cámaras no métricas.

3 reglas geométricas.

- Dotar de información de control.
- Recubrimiento fotográfico múltiple en rededor.
- Tomar par estereoscópico para restitución estereoscópica.

3 reglas fotográficas.

- La geometría interna debe mantenerse constante (no emplear zoom)
- Elegir una iluminación homogénea.
- Elegir la cámara más estable y de mayor formato disponible.

3 reglas de organización.

- Hacer croquis apropiados.
- Rellenar unos formularios adecuados.
- Realizar la comprobación final.

A continuación, se muestra en la Figura 12 cuál es la forma apropiada de planificación del proceso de toma de imágenes.

FACHADAS (Incorrecto)	FACHADAS (Correcto)
INTERIOR (Incorrecto)	INTERIOR (Correcto)
OBJETO AISLADO (Incorrecto)	OBJETO AISLADO (Correcto)

Figura 12. Esquema de toma de imágenes de objetos cercanos.

Fuente: http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/Image%20Capture%20Tips%20-%20Equipment%20and%20Shooting%20Scenarios.pdf

La toma de fotografías se realizó con dos cámaras:

- Cámara réflex digital, marca OLYMPUS, modelo E 330 y objetivo OLYMPUS digital, 14-45mm, 1:3.5-5.6. El sensor de imagen cuenta con una resolución máxima de 7.94 megapíxeles.



Figura 13. Cámara Réflex Olympus.

- Cámara integrada en el móvil Huawei P8 Lite de 13,5 megapíxeles, 4160x3120 píxeles con autofocus.



Figura 14. Cámara de Smartphone Huawei P8 Lite.

Las fotografías que se han utilizado para hacer los modelados han sido las de la cámara digital réflex, por dar mejores resultados. Se hicieron reconstrucciones del modelo con fotografías tomadas con ambas cámaras y los resultados se vieron claramente favorecidos con la utilización de ésta. El grupo de lentes que monta la cámara réflex es obviamente mucho mejor que la cámara del Smartphone siendo así los resultados también mejores.

4.3.2. PROCESADO DE LAS IMÁGENES

Flujo de trabajo de los programas fotogramétricos basados en SFM.



En general, el proceso de obtención del modelo 3D con los programas fotogramétricos que se basan en *SFM* y en el algoritmo SIFT, explicados en el estado del arte, tienen la siguiente secuencia (Pereira Uzal, 2016):

1. Se añaden las fotografías realizadas al objeto.
2. Se alinean y emparejan las fotografías.
3. Reconstrucción de la nube de puntos discreta.
4. Reconstrucción de la nube de puntos densa.
5. Escalar y Georreferenciar.
6. Texturizar. *
7. Exportar nube de puntos. *
 - Estos dos últimos pasos son opcionales y no necesariamente hay que ejecutarlos para poder comparar los modelos.

Han sido necesarios tres ordenadores, todos ellos portátiles con diferentes hardware y software para poder ejecutar y trabajar con los programas fotogramétricos.

HP ProBook 4520s (Personal)

- Procesador Intel(R) Celeron® P4500 @ 1.87 GHz.
- Memoria instalada (RAM) de 3.00 GB (2.86 GB utilizables)
- Intel(R) HD Graphics 3000
- Sistema operativo Windows 7 Home Premium de 32 bits.

ASUS (Facilitado)

- Procesador CPU: Intel(R) Core(TM) i3-2350M CPU @ 2.30GHz
- Memoria instalada (RAM) de RAM: 6GB
- Intel(R) HD Graphics 3000
- Sistema operativo Windows 7, 64-bit

MOUNTAIN ONYX 17 (Facilitado)

- Procesador CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz
- Memoria instalada (RAM) de 16GB
- HD Graphics 530 NVIDIA GeForce GTX
- Sistema operativo Windows 7 Professional, 64-bit

4.3.2.1. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA "123D CATCH DE AUTODESK"

El software fotogramétrico utilizado en este caso fue 123D Catch de Autodesk, su versión original fue llamada Proyecto Photofly y fue lanzado en 2011. Es un programa gratuito y muy fácil de manejar. Su funcionamiento está basado en *SFM*, el cual determina de forma automática la orientación interna de la cámara, por lo que no es necesario realizar la calibración de la cámara. Esta

orientación se realiza en el servidor propio del programa (la nube), una vez subidas las fotografías, por ello la rapidez de la obtención del modelo depende del volumen de datos y de la velocidad de conexión a Internet (Souto Vidal et al, 2015).

CREACIÓN DEL MODELO

Una vez realizada la secuencia fotográfica, descargamos de forma gratuita de su página web el programa y lo instalamos. (<http://www.123dapp.com/catch>)

Los pasos dados para obtener el modelo fueron los siguientes:

Iniciamos el programa y en la primera pantalla que nos muestra seleccionamos la pestaña “Create a New Capture”, ver Figura 15. Posteriormente, pedirá que te registre como usuario. Esta vez se realizó con cuenta de la red social Facebook.

Una vez realizado esto, seleccionamos las fotografías, 29 en este caso, y pulsamos en Create Project. Rellenamos una serie de información muy escueta que nos pide y le damos a “Create”, Figura 15.

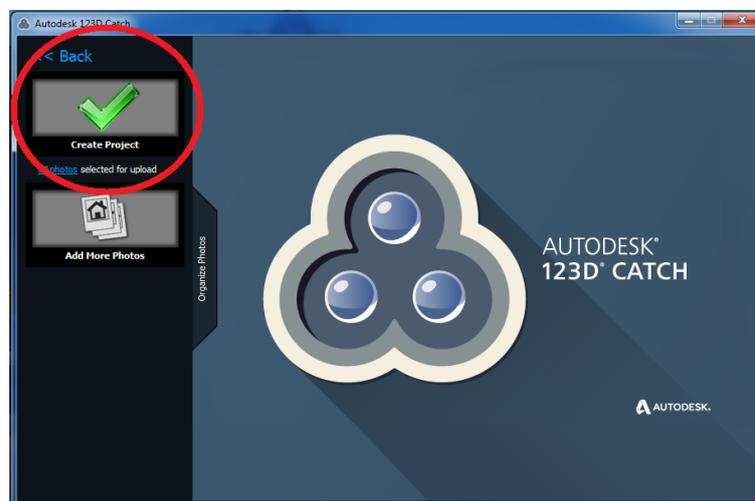


Figura 15. Pantalla principal 123D Catch.

Lo que hace en este momento es subir las fotografías a la nube, las procesa y nos devuelve el modelo para que podamos visualizarlo en el programa, Figura 16.

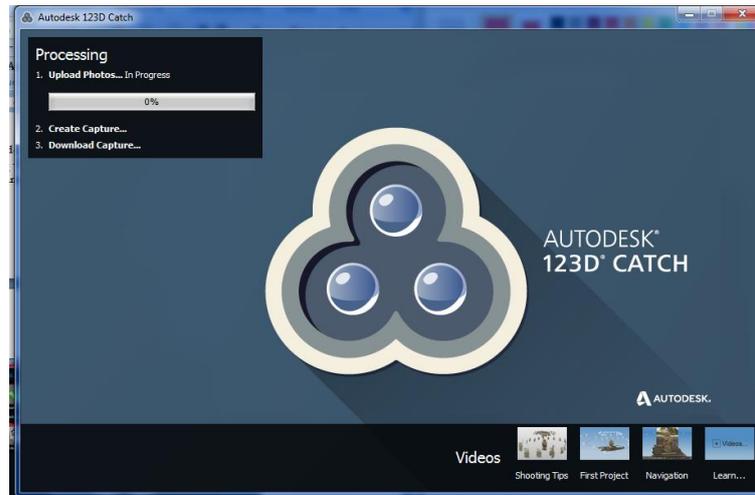


Figura 16. Procesado de imágenes en 123d Catch.

Una vez finalizado el proceso, tenemos el modelo en 3D como observamos en la Figura 17, el cual tendremos que afinarlo, depurarlo y escalarlo en esta secuencia. El programa fue capaz de orientar 29 de 29 imágenes (100%).



Figura 17. Visión 3D del edificio procesado con 123D Catch.

Para refinar el modelo y hacer que el resultado sea más preciso, el programa tiene una opción que es chequear los puntos homólogos en cada imagen manualmente. Esto es lo que vamos a realizar en este paso para obtener un modelo de más calidad. Hay que identificar un mínimo de 4 puntos en cada imagen para ayudar a que el programa regenere de nuevo el modelo con calidad, Figura 18.

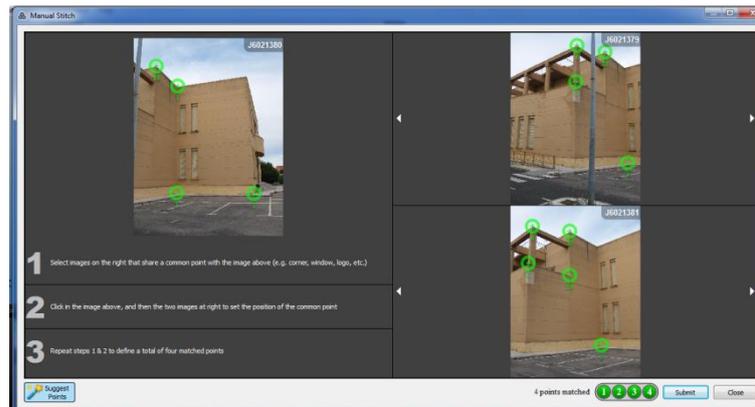


Figura 18. Chequeo manual de puntos homólogos en 123D Catch.

Hecho esto con cada fotografía volvemos a subir el modelo al servidor del programa para que nos regenere con más fidelidad para, ahora sí, depurarlo, de manera que nos quede la parte del modelo que nos interese y escalarlo con una medida obtenida del levantamiento con estación total.

Lo primero lo realizaremos con dos herramientas que se llaman “*Rectangular Selection*” y “*Lasso Selection*”, con las cuales iremos eliminando los trozos de malla que no nos interesen, como se observa en la Figura 19.

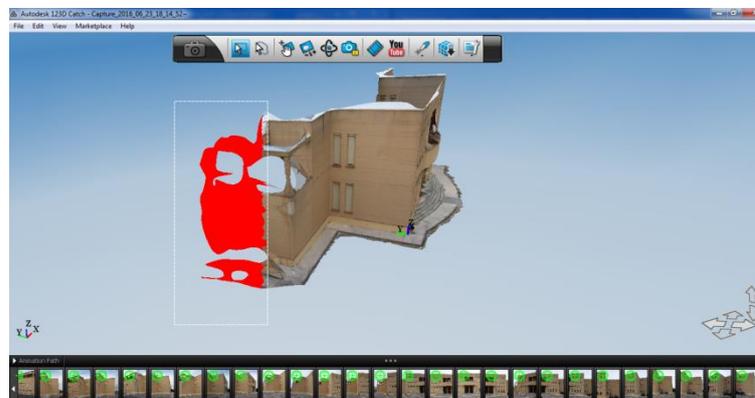


Figura 19. Eliminación de puntos no relevantes en 123D Catch.

Por último, escalaremos el modelo con una herramienta que se llama “*Define Reference Distance*”, primero hay que definir con dos puntos del modelo la distancia a escalar, utilizar la herramienta y damos el valor a la distancia entre esos dos puntos seleccionados, quedando así escalado el objeto tridimensional.

En todos los levantamientos utilizaremos como medida de referencia el ancho de la entrada principal del edificio, obtenida mediante flexómetro, y cuyo valor es de 4.82 metros.

Después de esto se acotaron las distancias comparativas de la fachada, quedando el modelo como se muestra en la Figura 20.

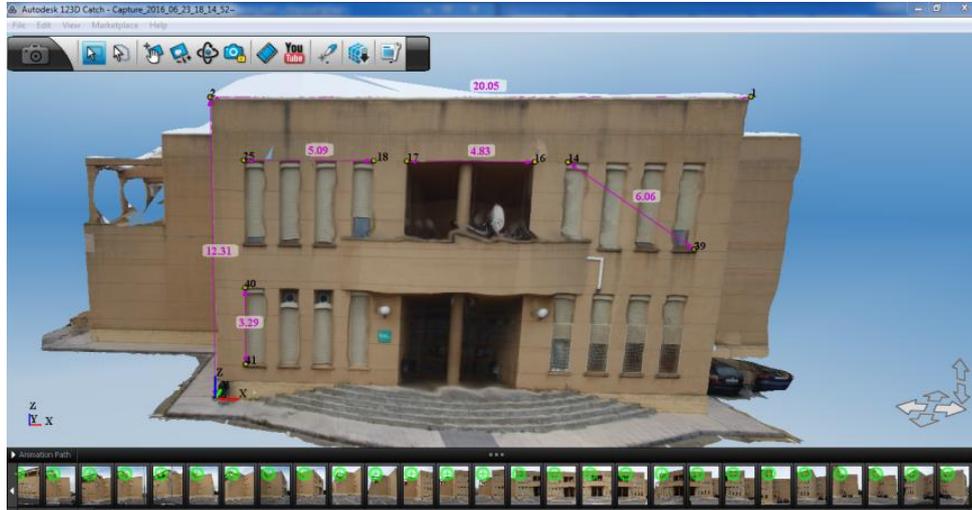


Figura 20. Medida de los puntos objeto de estudio con 123D Catch.

Las dimensiones, se tomaron con la herramienta “Create Distance Measure”.

Las medidas entre los puntos es la que se muestra en la Tabla 1:

2-1	20.00 m
46-2	12.28 m
25-18	05.07 m
40-41	03.28 m
17-16	04.82 m
14-39	06.04 m

Tabla 3. Medidas obtenidas con 123D Catch.

Como podemos observar en la Tabla 1, la precisión del programa es centimétrica a diferencia de la estación total que nos dio valores milimétricos.

Tenemos la opción de exportar el modelo con los puntos tomados a formato .dwg, que posteriormente podemos abrir con un programa CAD, este caso DraftSight y volver a tomar medidas. Ver Figura 21.

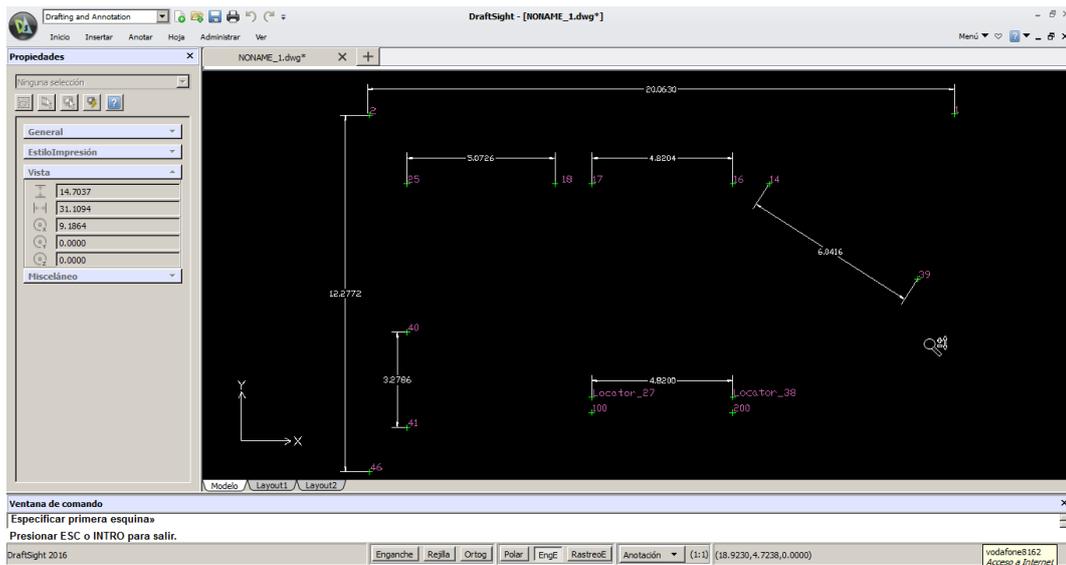


Figura 21. Medida de las distancias con DraftSight.

De esta manera tenemos más precisión en los valores de las medidas como se muestra en la Tabla 2:

2-1	20.0005 m
46-2	12.2772 m
25-18	05.0726 m
40-41	03.2786 m
17-16	04.8204 m
14-39	06.0416 m

Tabla 4. Medidas obtenidas con AutoCAD tras ser importadas desde 123D Catch.

4.3.2.2. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA "PHOTOSCAN PROFESSIONAL DE AGISOFT"

Agisoft PhotoScan es un programa que permite crear fácilmente modelos 3D de formas complejas con textura de alta definición a partir de múltiples imágenes, que pueden ser tomadas incluso con diferentes cámaras.

Principales características PhotoScan:

- Triangulación fotogramétrica
- La generación de nubes de puntos (escaso / denso)

- Generación de modelos poligonales (normal / textura)
- Ajuste del sistema de coordenadas

Estas son las más importantes entre muchas otras disponibles en la versión profesional.

El objetivo del programa es virtualizar modelos 3D de objetos fotografiados con cámara digital. Este objeto se consigue con tres pasos de procesamiento:

1. **Definición de los términos y parámetros de orientación externa e interna de las cámaras.** En esta etapa PhotoScan encuentra puntos comunes de las fotos y define todos los parámetros de las cámaras: la posición, la orientación, geometría interna (distancia focal, los parámetros de distorsión, etc.). Los resultados de esta fase son puntos comunes de nubes dispersas en modelos 3D y los datos sobre la posición y orientación de la cámara.
2. **Restauración de la geometría del objeto.** En la segunda etapa PhotoScan construye un modelo tridimensional poligonal, que describe la forma del objeto. Aquí PhotoScan permite editar el modelo para eliminar zonas de no interés, optimizar el modelo, crear marcas de puntos para poder medir la distancia entre ambos.
3. **Texturizado del objeto.** La última etapa incluye texturizado y / o construcción de ortofotos.

CREACIÓN DEL MODELO

Como se presenta en la Figura 22, al abrir el programa nos encontramos con esta pantalla inicial con la que podemos empezar a trabajar:

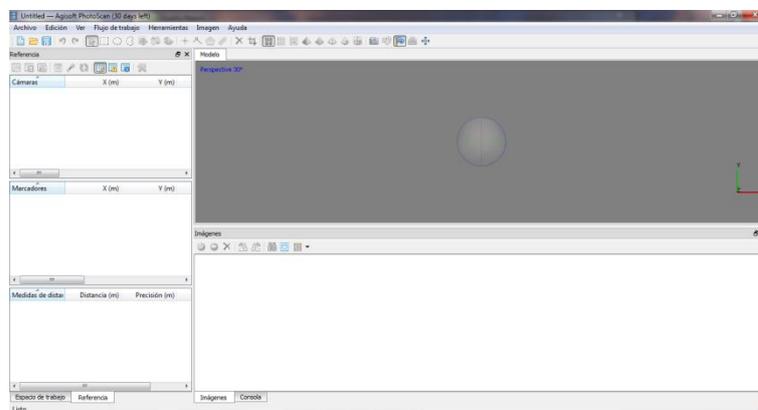


Figura 22. Pantalla principal de PhotoScan.

Todos los pasos que se van a realizar son metódicos y consecutivos, y todos parten de la pestaña de la barra superior de herramientas llamada "flujo de trabajo".

Lo primero que vamos a realizar es añadir las fotografías al trabajo clicando la pestaña "flujo de trabajo" y después "añadir fotos", ver Figura 23.

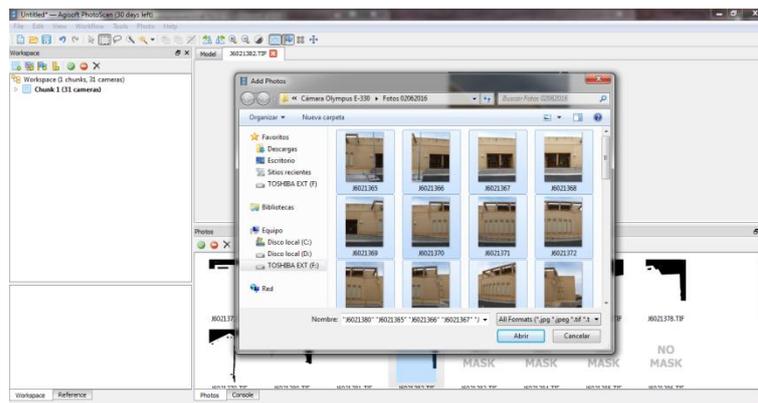


Figura 23. Selección fotografías para procesar con PhotoScan.

Una vez añadidas las imágenes, 29 en este caso, vamos a editarlas para que le sea más fácil al programa recrear el modelo. Lo único que haremos será restar de la foto el cielo visible en la imagen con la herramienta "varita mágica" que posee el programa, ver Figura 24.

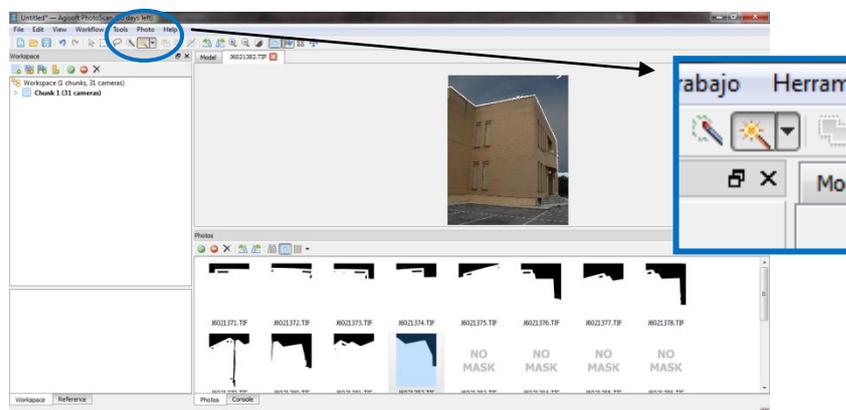


Figura 24. Selección del cielo para restar de la imagen con PhotoScan.

Ahora, se orientan las fotos y se crea una primera nube de puntos inicial del modelo. El programa fue capaz de orientar las 30 imágenes (100%). La ventana en la que seleccionar los parámetros de orientación se pueden ver en la figura 25.

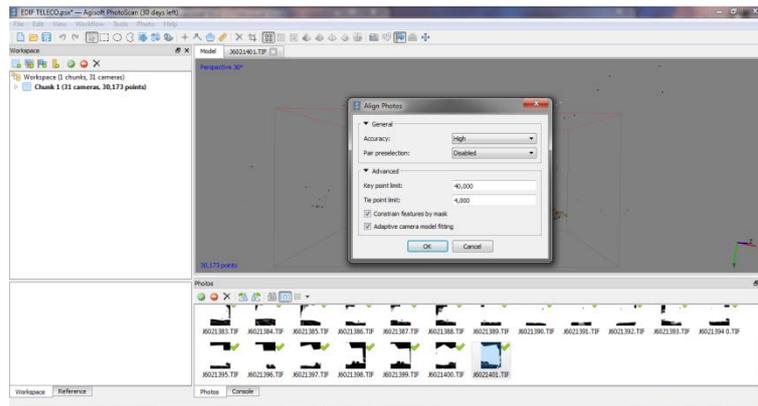


Figura 25. Ventana de parámetros para orientación de imágenes con PhotoScan.

Los resultados de este paso se observan en la Figura 26.

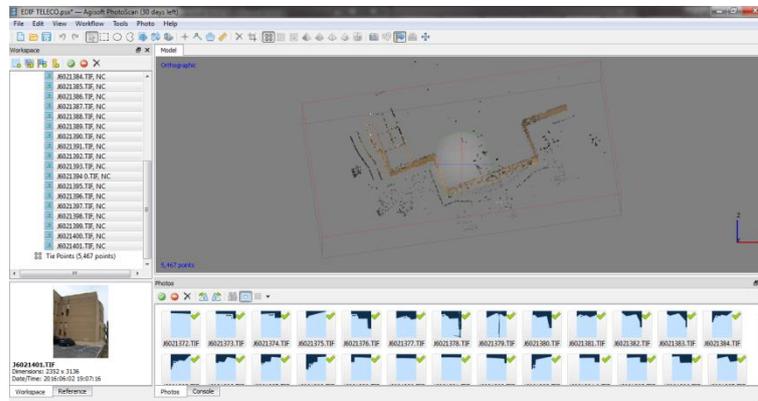


Figura 26. Resultado edificio 3D con PhotoScan.

El siguiente paso es "crear nube de puntos densas", ver en Figura 27.

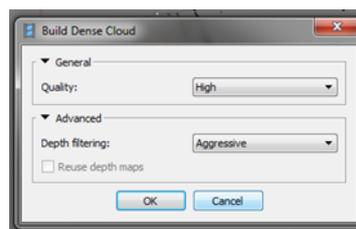


Figura 27. Creación de nube de punto densa con PhotoScan.

En la Figura 28 se obtienen los siguientes resultados, en los que el modelo ya tiene una geometría bastante realista del edificio.

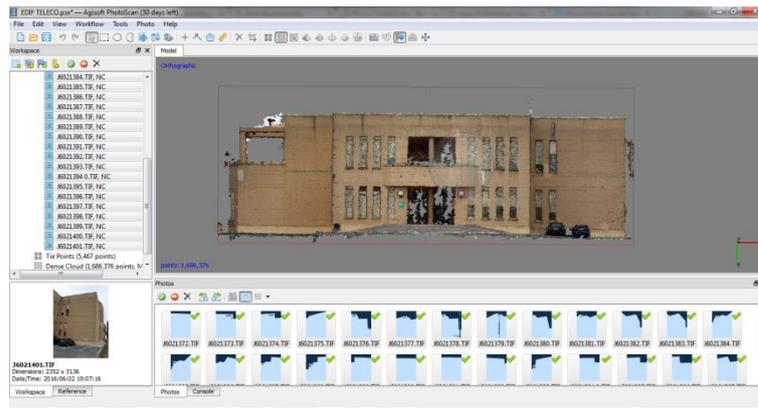


Figura 28. Resultados nube de puntos densa con PhotoScan.

A continuación, depuramos el modelo eliminando puntos que no son necesarios, ver Figura 29.

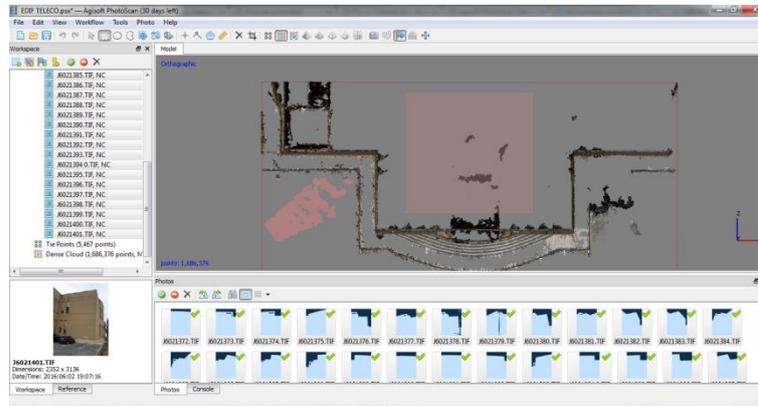


Figura 29. Depuración del modelo con PhotoScan.

Los siguientes pasos son "Crear malla..." (Figura 30) y "Crear texturas..." (Figura 31) del modelo, uno a continuación del otro en el mismo orden dicho anteriormente.

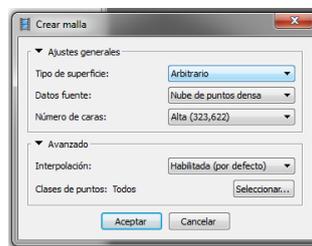


Figura 30. Crear malla con PhotoScan.

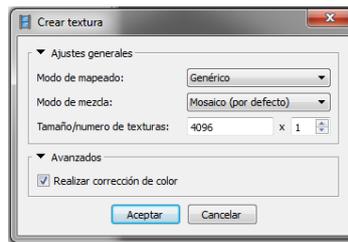


Figura 31. Crear textura con PhotoScan.

Los resultados de estos dos procesos Se muestran en la Figura 32 y 33.

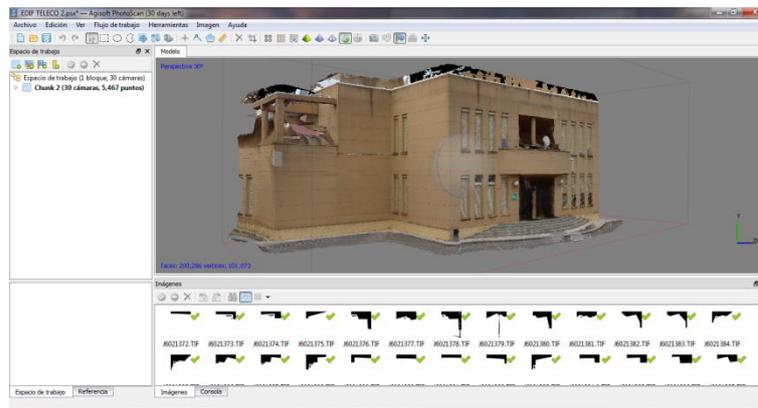


Figura 32. Resultado tras mallar y texturizar el modelo con PhotoScan.

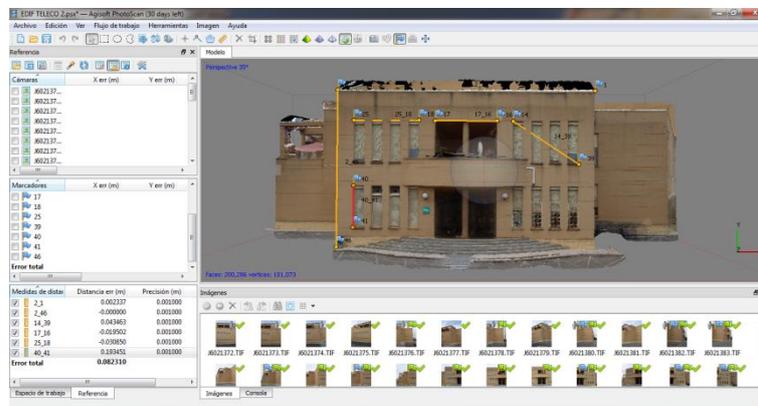


Figura 33. Modelo con medida tomadas en PhotoScan.

Este programa nos da la opción de poder importar puntos dentro de nuestro modelo ya escalado y referenciado según nuestro sistema de coordenadas. Por lo que hemos introducido todos los puntos que obtuvimos con la estación total.

En las siguientes Figuras, 34 y 35, vemos desde un plano de la planta del edificio y otra desde el alzado de la fachada principal.

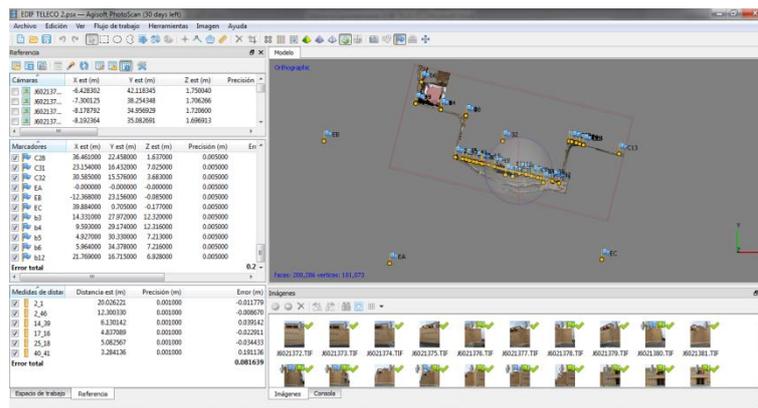


Figura 34. Vista superior del modelo con PhotoScan.

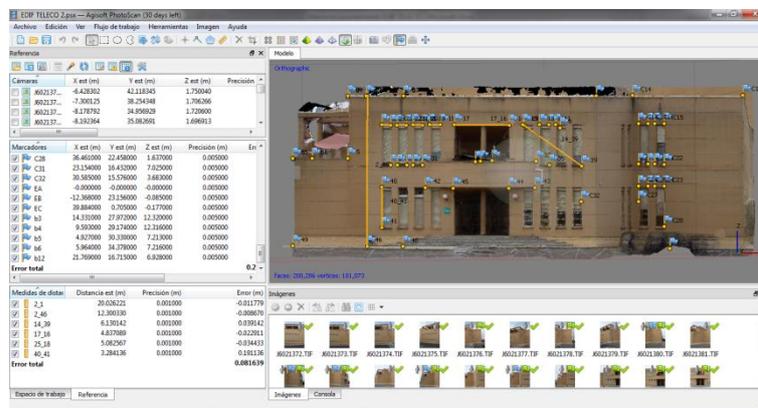


Figura 35. Vista de alzado del resultado final con PhotoScan.

Ya realizado el modelado completo de la parte del edificio objeto de estudio realizamos las mediciones de comparación.

En la Tabla 3 se presentan las medidas entre los puntos para controlar los resultados de calidad geométrica del modelo generado.

2-1	20.026 m
46-2	12.300 m
25-18	05.083 m
40-41	03.328 m
17-16	04.837 m
14-39	06.130 m

Tabla 5. Medidas obtenidas con PhotoScan.

4.3.2.3. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA “PIX4D”

El software Pix4D es un procesador de imágenes que realiza mapeados y modelados en 2D y 3D a partir de fotografías tomadas desde el aire mediante drones o desde la Tierra mediante cámara digital.

El software se encarga de procesar automáticamente las imágenes obtenidas por cualquier tipo de cámara digital, usando una tecnología basada puramente en contenido gráfico. El procesado se puede utilizar además en una gran variedad de programas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

CREACIÓN DEL MODELO

Abrimos el programa, damos nombre al proyecto y ponemos la ubicación donde queremos que se guarden los datos de éste. Ver Figura 36.

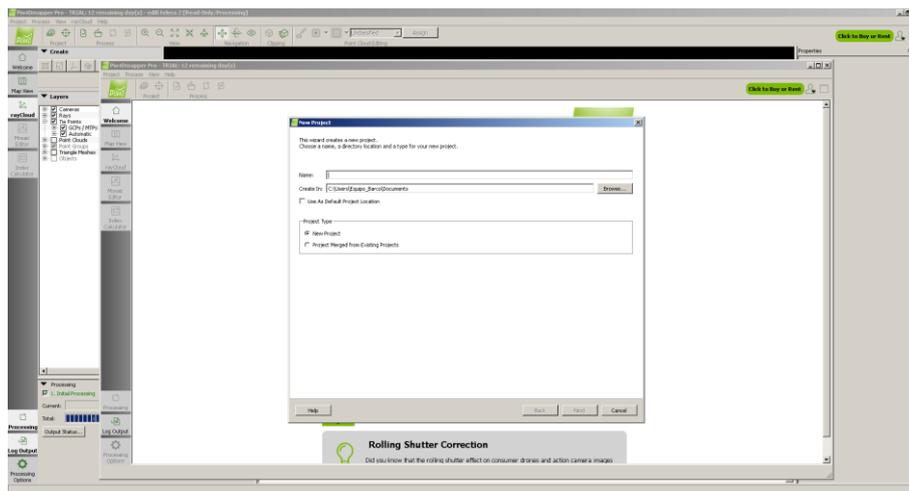


Figura 36. Pantalla principal programa fotogramétrico Pix4D.

El siguiente paso es seleccionar las fotografías con las que queremos hacer el levantamiento fotogramétrico. Como en los casos anteriores, seleccionamos 29 fotos del levantamiento realizado con la cámara digital Olympus. Ver figura 37.

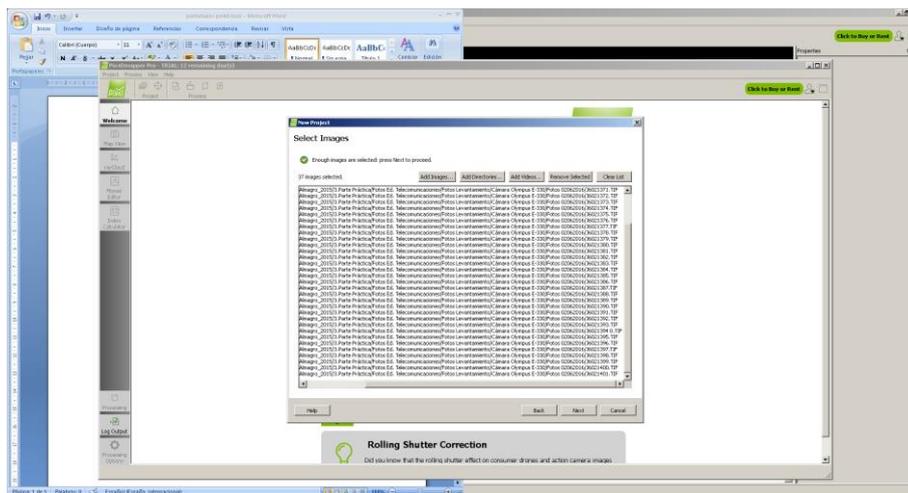


Figura 37. Selección de fotografías en Pix4D.

Nota: el programa detecta, y por ello emerge una pequeña ventana de información, que más del 80 % de las fotografías tienen las mismas coordenadas, por lo que pueden ser borradas por defecto, pero solo hay que aceptar los pasos para continuar con el proceso. Esto es debido a que las imágenes tomadas son terrestres por lo que prácticamente tienen coordenadas muy cercanas o simplemente carecen de esta información. Esto lo utiliza Pix4D en caso de tomas aéreas. Ver Figura 38.

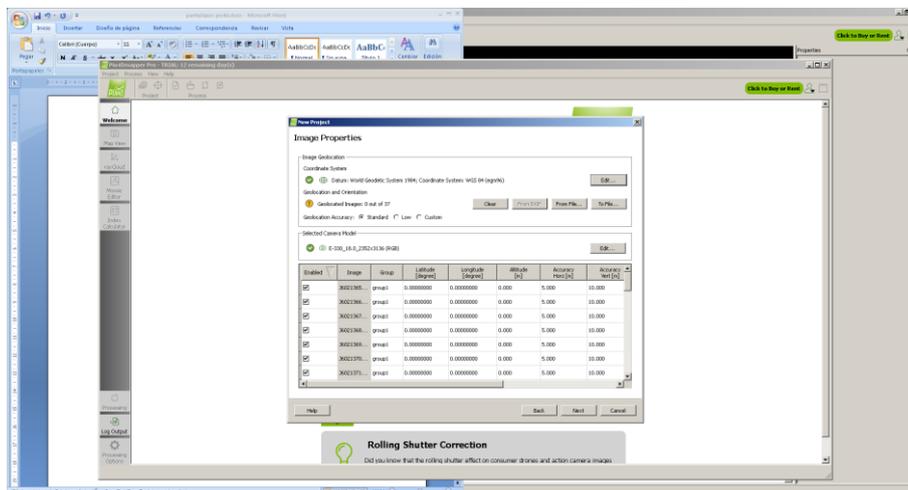


Figura 38. Imágenes cargadas por el programa Pix4D.

El paso que continúa es poner el sistemas de referencia del proyecto, en este caso no es nesario poner un sistemas de referencia conocido por lo que será un sistemas de referencia arbitrario con coordenas en metros. Ver Figura 39.

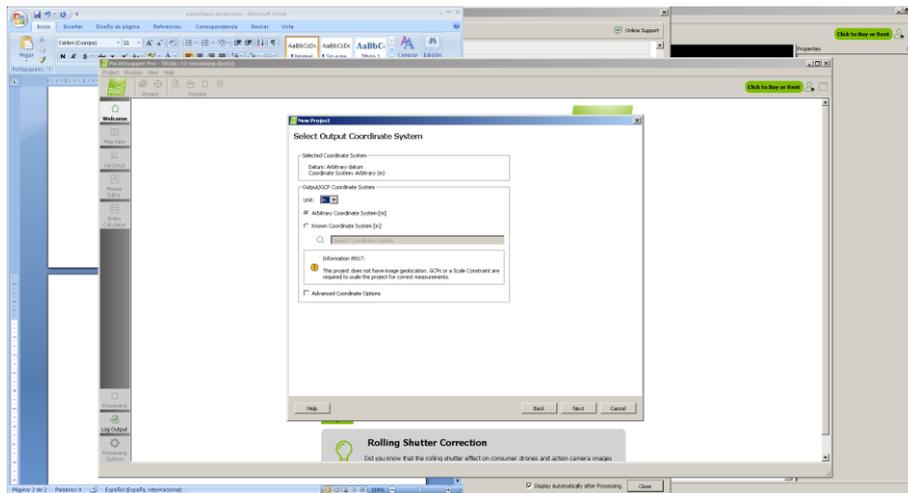


Figura 39. Selección de sistema de referencias arbitrario y unidades en metros en Pix4D.

En este paso el programa te da elegir unas opciones de procesado del modelo según las imágenes tomadas. En nuestro caso, al ser un edificio y no una extensión de terreno, seleccionamos "3D models". Ver Figura 40.

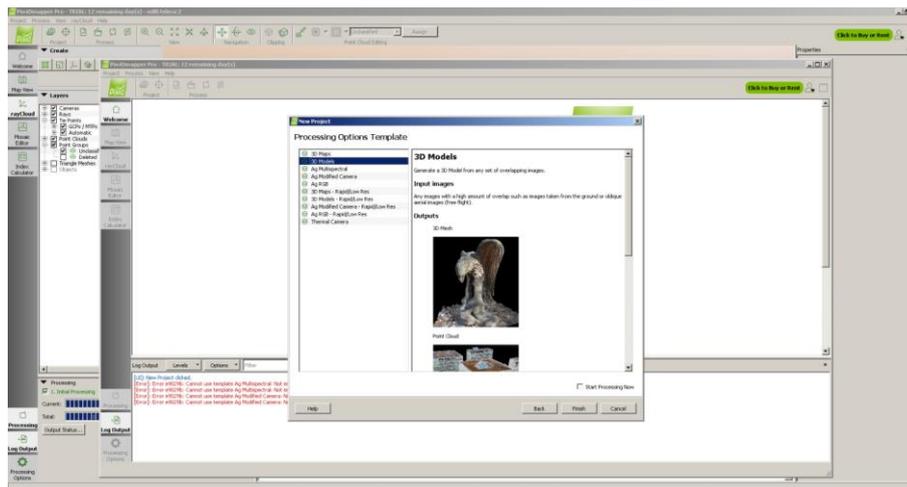


Figura 40. Selección de opción de procesado "3D models" con Pix4D.

Ahora ya están cargadas las imágenes, un total de 29, y creado el proyecto, por lo que continuaremos con el siguiente paso del proceso. Para proceder al modelado el programa realiza 3 fases o pasos. Ver Figura 41:

- Paso 1 es un proceso inicial para obtener la configuración de las imágenes.
- Paso 2 ejecuta la densificación de los puntos.
- Paso 3 es la realización del modelo digital de superficies pero que en este caso no se realiza por no ser toma de imágenes aéreas.

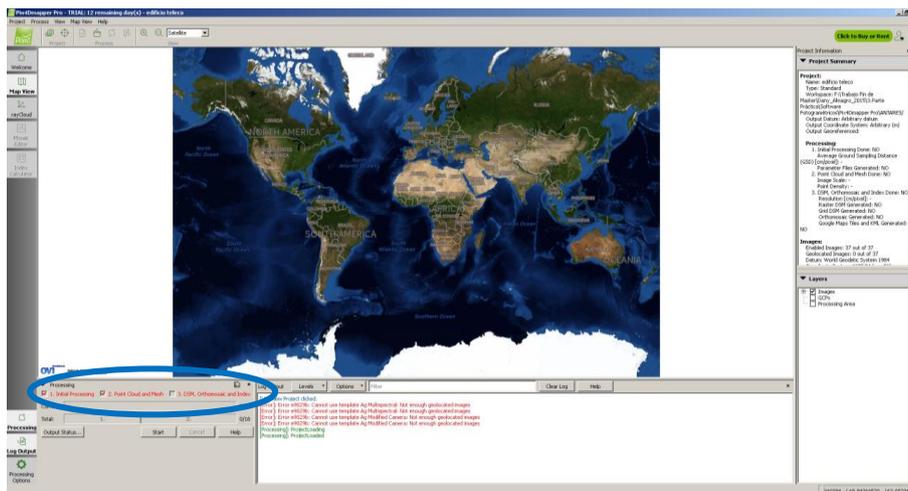


Figura 41. Indicación de los pasos que ejecuta Pix4D.

Tenemos la opción, al igual que PhotoScan, de importar los puntos tomados con la estación total (“Select GPCs Files”) que nos servirán de control. Estos datos están guardados en un bloc de notas, con extensión del archivo .txt, éstos son los puntos con coordenadas X, Y, Z separadas con punto y coma (;). En este paso, como podemos ver en la Figura 42, importamos dichos puntos.

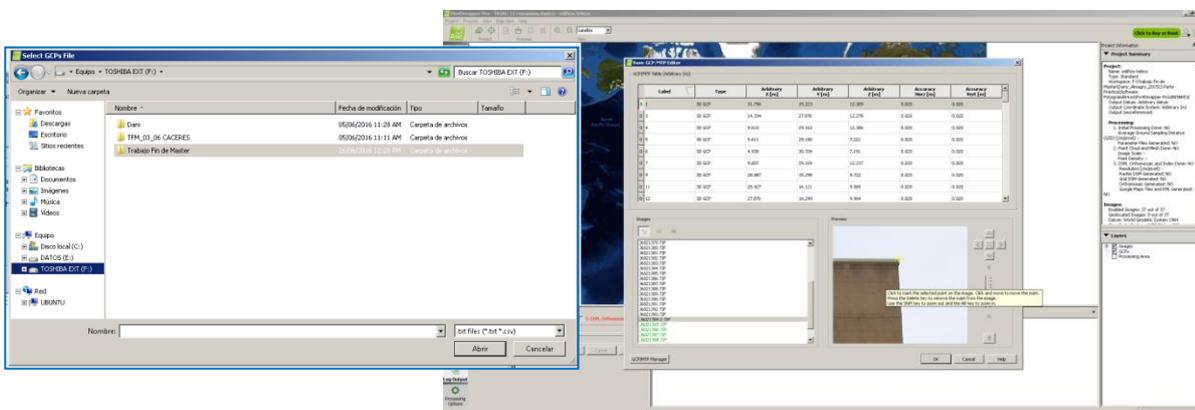


Figura 42. Importación de coordenadas de puntos con Pix4D.

Después de este paso, procedemos a realizar la nube de puntos clicando “start” y dejamos que el programa ejecute los procesos necesarios para realizar el modelado. Ver Figura 43.



Figura 43. Procesado de las imágenes con Pix4D.

Observamos en la Figura 44 la nube de puntos y la posición de las cámaras al igual que en los otros programas. El programa fue capaz de calibrar un total de 28 imágenes de 29.

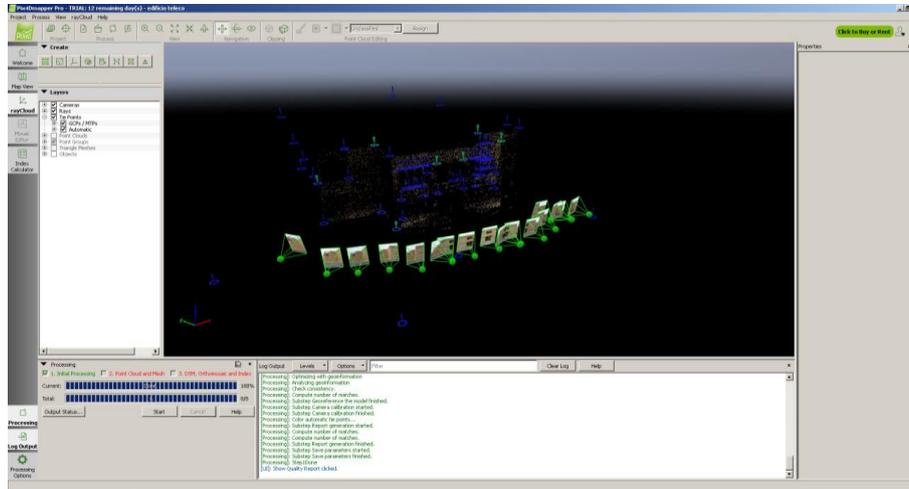


Figura 44. Nube de puntos generado con Pix4D.

Visualizamos en la Figura 45 la nube de puntos densa y como queda el modelo finalmente con este programa.

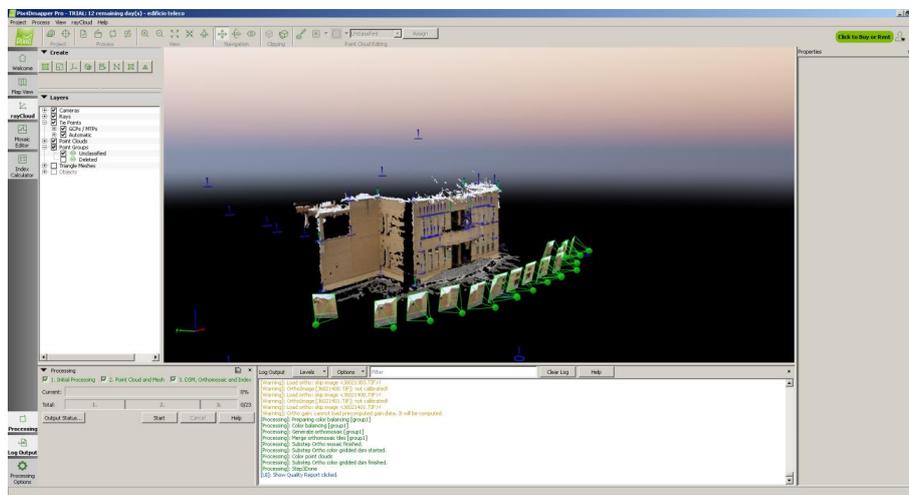


Figura 45. Visualización de la nube de puntos densa con Pix4D.

Lo último que vamos a realizar con este programa y que es el objeto del levantamiento es escalarlo y tomar las medidas de comparación.

Primero lo escalamos con la medida tomada del ancho de la puerta principal (4,82 m). Es un proceso muy parecido a los anteriores programas. Ver Figura 46.

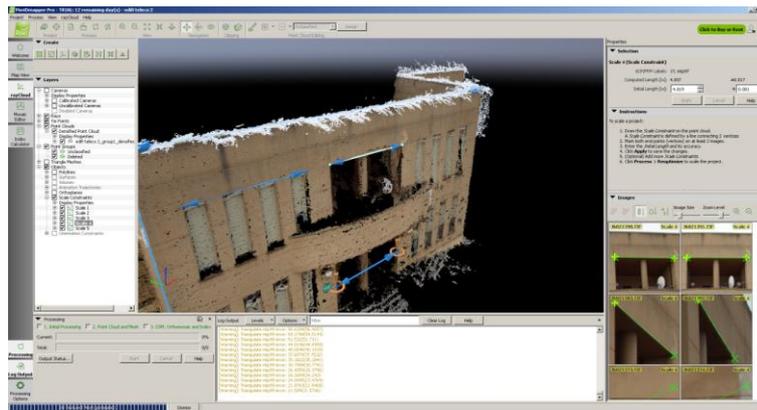


Figura 46. Toma de medidas con Pix4D.

Después vamos creando puntos en el modelo para luego unir los con líneas que nos muestran las medidas y que nos sirven para realizar la comparación. Ver Figura 47.

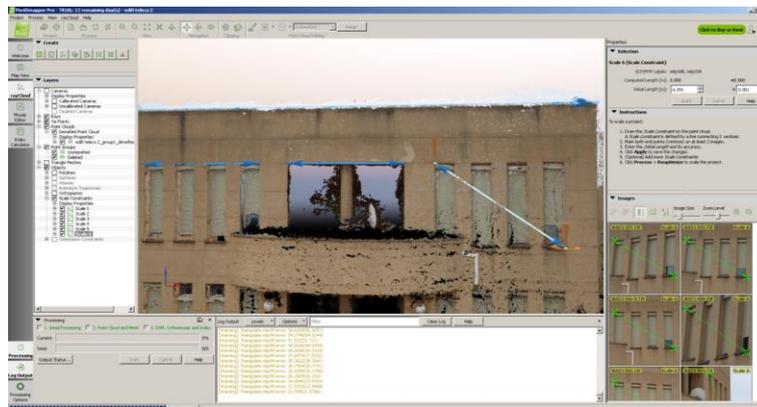


Figura 47. Toma de medidas con Pix4D con más detalle.

Los resultados finales se muestran en la Figura 48, tras finalizar el proceso de levantamiento con el software Pix 4D.

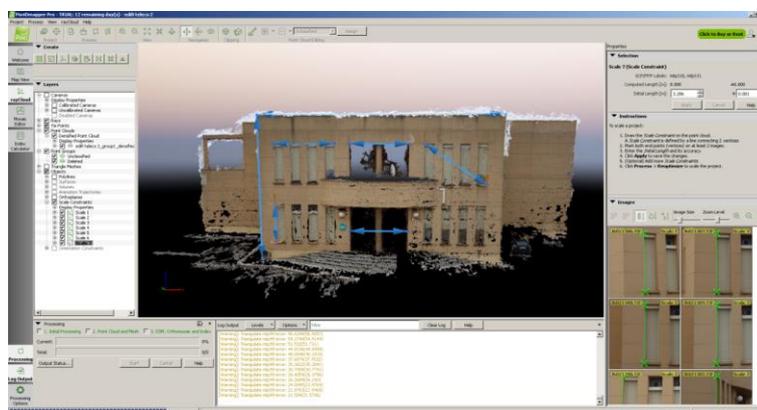


Figura 48. Resultado final del modelo con Pix4D.

Medidas entre los puntos con Pix4D:

2-1	20.064 m
46-2	12.317 m
25-18	05.117 m
40-41	03.286 m
17-16	04.819 m
14-39	06.091 m

Tabla 6. Medidas obtenidas del modelo con Pix4D.

4.3.2.4. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO CON EL PROGRAMA “VISUAL SFM Y MESH LAB”

Al igual que los programas analizados anteriormente, el objetivo de éste es crear una nube de puntos en 3D, con la ayuda de diversas herramientas. Estas nubes de puntos formadas por simples puntos descritos por unas coordenadas espaciales XYZ y unos valores RGB que serán los encargados de restituir la textura original a través de lo que se conoce como nube de puntos densa. Con este programa no es necesario establecer puntos de referencia entre las imágenes ni calibrar la cámara, lo que agiliza el proceso y nos permite trabajar con gran cantidad de imágenes. Este programa no incorpora una herramienta de medición como las anteriores por lo que tendremos que exportar el modelo para trabajar con otro programa de manipulación de nube de puntos. En este caso utilizaremos el software libre MESH LAB.

El proceso de funcionamiento de VisualSFM, como el de muchas herramientas de SFM se fundamenta en los siguientes pasos:

1. SIFT (*Scale-invariant feature transform*): algoritmo de detección de puntos clave o coincidentes entre las múltiples imágenes.
2. *Bundle Adjustment*: Crea la nube de puntos dispersa a partir de los puntos clave detectados en el paso anterior. En este paso se puede intuir la forma de nuestro modelo y disponer de la posición de las cámaras.
3. *Multi-View Stereo*: Será el proceso encargado de generar la nube de puntos densa a partir de todos los datos anteriores. De este proceso se encargan las herramientas CMVS y PMVS2 de Yasutaka Furukawa, ingeniero de Google Maps.

CREACIÓN DEL MODELO

En el proceso de instalación del programa hay que descargar el ejecutable desde la web de Changchang y adicionalmente descargar las herramientas PMVS y CMVS de Yasutaka, ya compilados, para ello podemos acudir a la web de Pierre Moulon, elegir el tipo de sistema y descargar cmvs.exe, genOption.exe, pmvs2.exe y pthread.dll que hay que ubicar simplemente junto al ejecutable de VisualSFM.exe. (Pereira J. , 2012)

Ejecutamos el programa y nos encontramos con la interfaz inicial. Ver Figura 49.

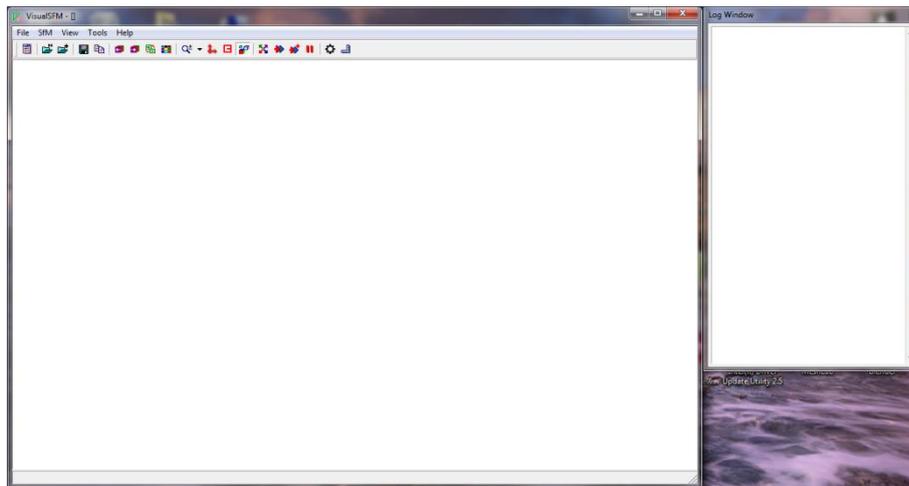


Figura 49. Pantalla principal del programa fotogramétrico VisualSFM.

Cargamos el grupo de imágenes tomadas. Antes de realizar este paso se cambiaron el formato de las imágenes realizadas con la cámara digital Olympus, el formato de éstas era .tiff y VisualSFM solo abre imágenes tipo .jpg, .ppom, .pgm. Con el programa de Windows, "Paint" se puede hacer fácilmente.

Clicamos en *File > Open + Multi Images*. Y cargamos un total de 29 imágenes. Ver Figura 50.

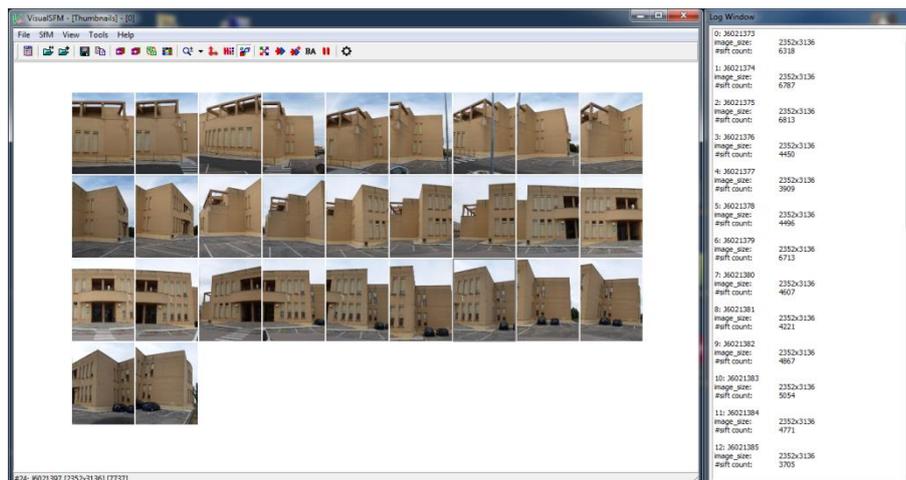


Figura 50. Carga de imágenes con VisualSFM.

Una vez cargadas las imágenes el programa tiene que buscar las coincidencias entre ellas para orientar el modelo, esto se hace con el botón simbolizado con las cuatro flechas opuestas.

En este paso el programa fue capaz de orientar 22 de 29 imágenes por lo que no fue 100% efectivo.

Cuando este proceso finaliza, usamos el botón contiguo formado por dos puntas flecha (roja y azul) para crear la nube de puntos. Ver Figura 51.

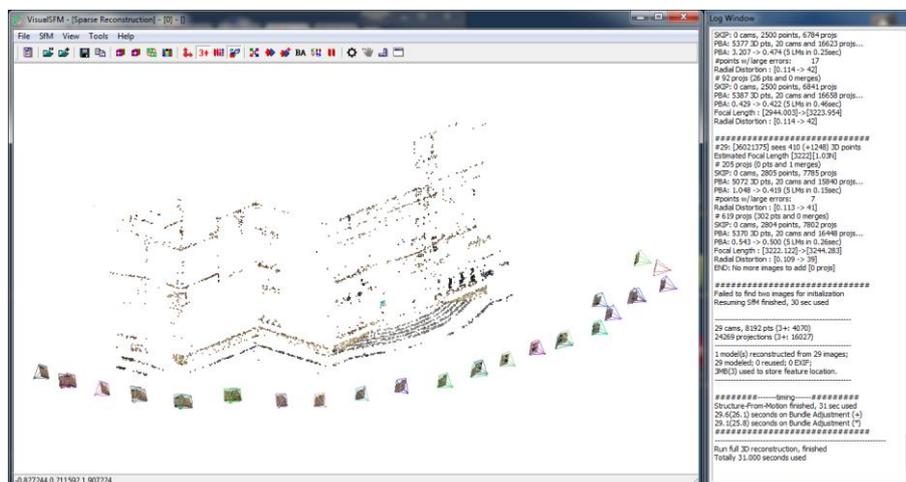


Figura 51. Nube de puntos creado con VisualSFM.

Finalmente, con el botón simbolizado por las siglas CMSVS, reconstruimos la textura. En este punto se nos indica la ruta para guardar el proyecto.

Cuando el proceso anterior ha finalizado, puede llevar algunos minutos, para ver el resultado final vamos al menú View y activamos Dense 3D Points. Ver Figura 52.

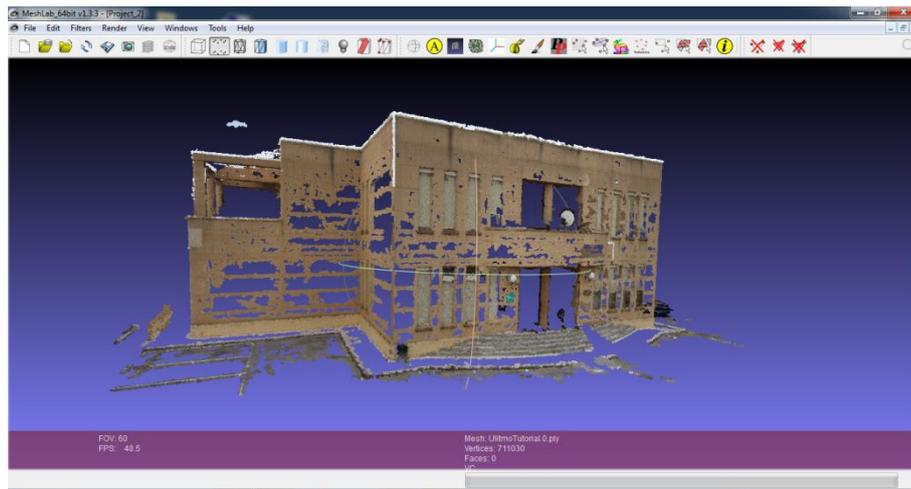


Figura 53. Visualización de la nube de puntos densa de VSFM con MeshLab.

En la Figura 54 se puede observar cómo se realiza el depurado de la nube de puntos que no son de interés.

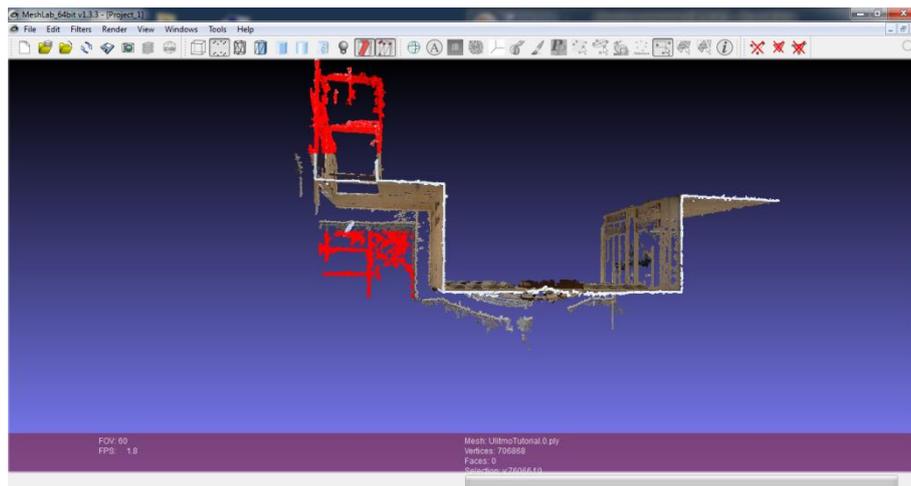


Figura 54. Depurado de la nube de puntos con MeshLab.

Una vez depurada la nube de puntos podemos observar el resultado en la Figura 55.

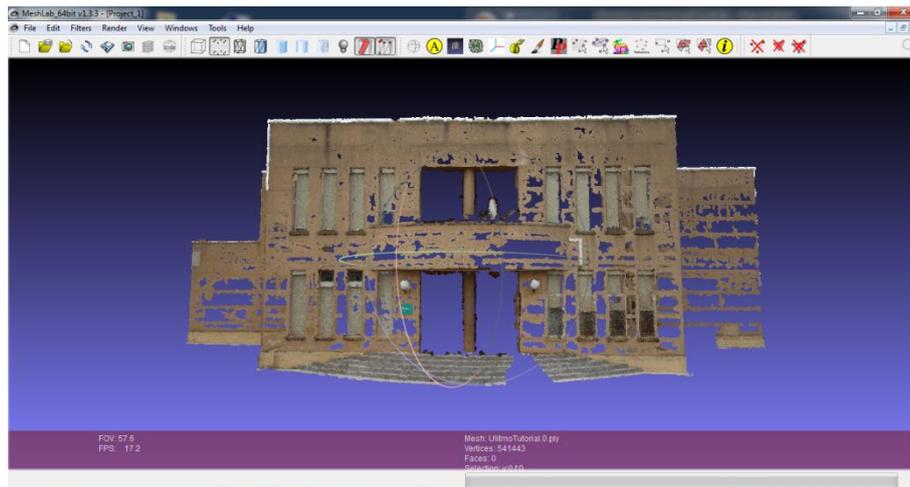


Figura 55. Visualización del modelo depurado con MeshLab.

Para construir la malla con la nube de puntos vamos a realizar los siguientes pasos.

Primero clicamos en *>Filters>Normal, Curvatures and Orientation>Compute Normals for Point Set*. Dejamos los parámetros por defecto y pulsamos Apply. Con esta función le decimos al programa la cantidad de puntos vecinos tiene que reconocer para recrear la malla.

Después *>Filters>Remesing, Simplification and Reconstruction>Surface Reconstruction: Poisson*. Dejamos los parámetros por defecto y creamos la malla. Ver Figura 56 y 57.

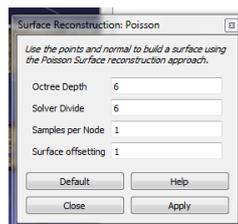


Figura 56. Opciones de mallado con MeshLab.

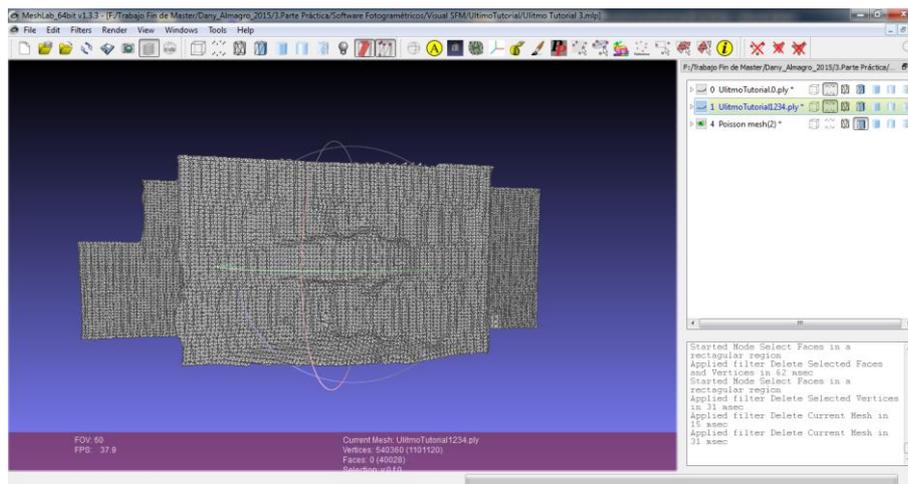


Figura 57. Visualización de la malla creada con MeshLab.

Tras crear la malla también podemos exportar los colores de cada punto a la malla para hacer el texturizado, este paso es opcional. Ahora ya tenemos el modelo en 3D, con mucha menos calidad que los otros programas analizados. Ver Figura 58.

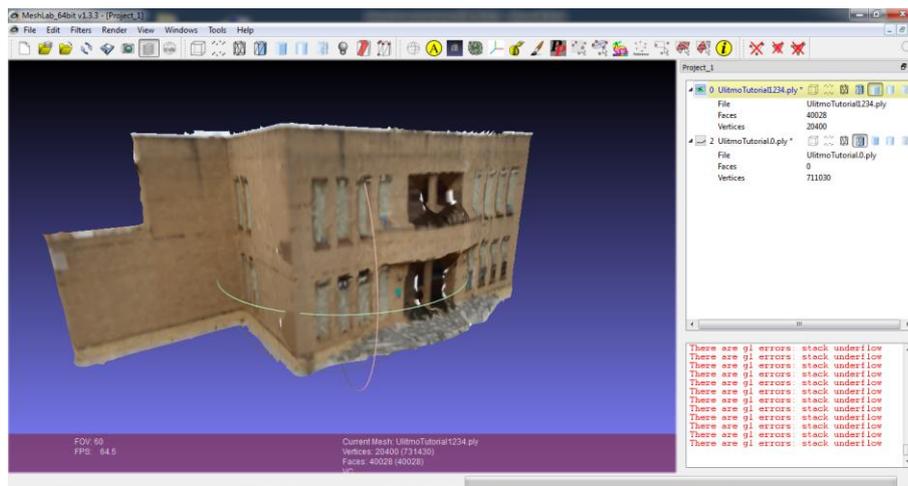


Figura 58. Texturizado del modelo con MeshLab.

Tenemos creado el modelo.

Para escalar el modelo hacemos clic en *>Filters>Normals, Curvatures and Orientation>Transform: Scale*. Primero hemos utilizado la herramienta Measuring Tool y hemos medido el ancho de la puerta principal dando una distancia de 0.64598, en la realidad tiene una medida de 4,82 m como sabemos. Por lo que el factor de escala se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Facto de escala} = \frac{4.82}{0.64598} = 7.462$$

Este valor lo añadimos a la función y ya tenemos el modelo escalado.

De nuevo con la herramienta “Measuring Tool”, ver Figura 59 y 60, vamos tomando las medidas de comparación en el modelo. No se pueden tomar medidas de los mismos puntos exactamente con esta herramienta por lo que se toman 3/4 veces y se hace la media para obtener el valor de comparación.

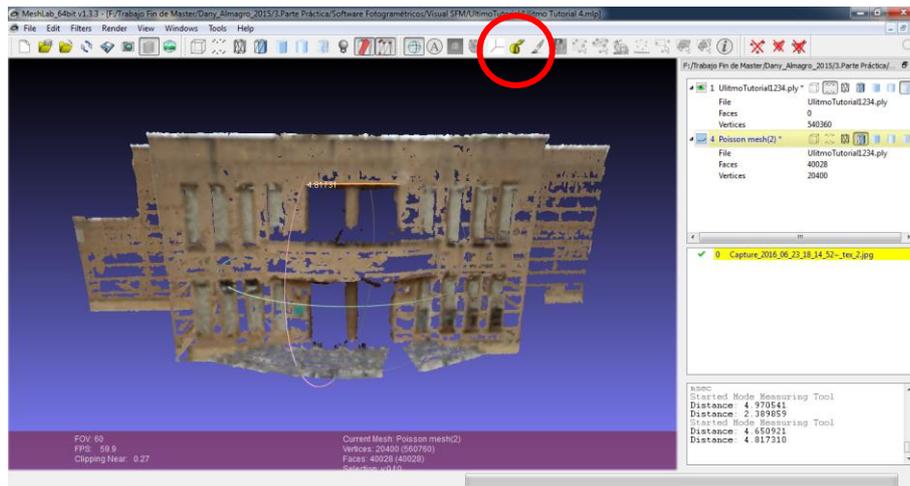


Figura 59. Medición de los puntos con MeshLab.

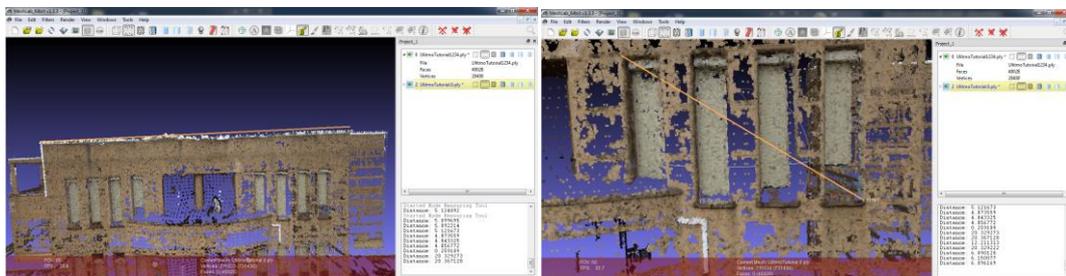


Figura 60. Visualización más cercana de las medidas tomadas con MeshLab.

Medidas entre los puntos:

2-1	20,3185/20,3293/20,3671/20,3292	Media = 20,3360 m
46-2	12,265/12,4156/12,4714/12,4062	Media = 12,3896 m
25-18	5,1249/5,0999/ 5,1217	Media = 05,1155 m
40-41	3,3141/ 3,2978/ 3,28061	Media = 03,2975 m
17-16	4,8197/ 4,8736/ 4,8433/ 4,8567	Media = 04,8483 m
14-39	6,0901/ 6,1501/ 6,0962/ 6,1137	Media = 06,1125 m

Tabla 7. Medidas obtenidas con MeshLab aplicando la media de los valores.

Para contrastar las mediciones por el método anterior, recurrimos a otra opción que es obtener las coordenadas de los puntos con la herramienta “Pick Point” de MeshLab, exportarlas a Topocal con un archivo .txt y de ahí exportarlas de nuevo como archivo .dxf para trabajar con AutoCAD y tomar las medidas. Esta operación la hicimos con anterioridad en el proyecto para representar los puntos tomados con la estación total. Ver Figura 61.

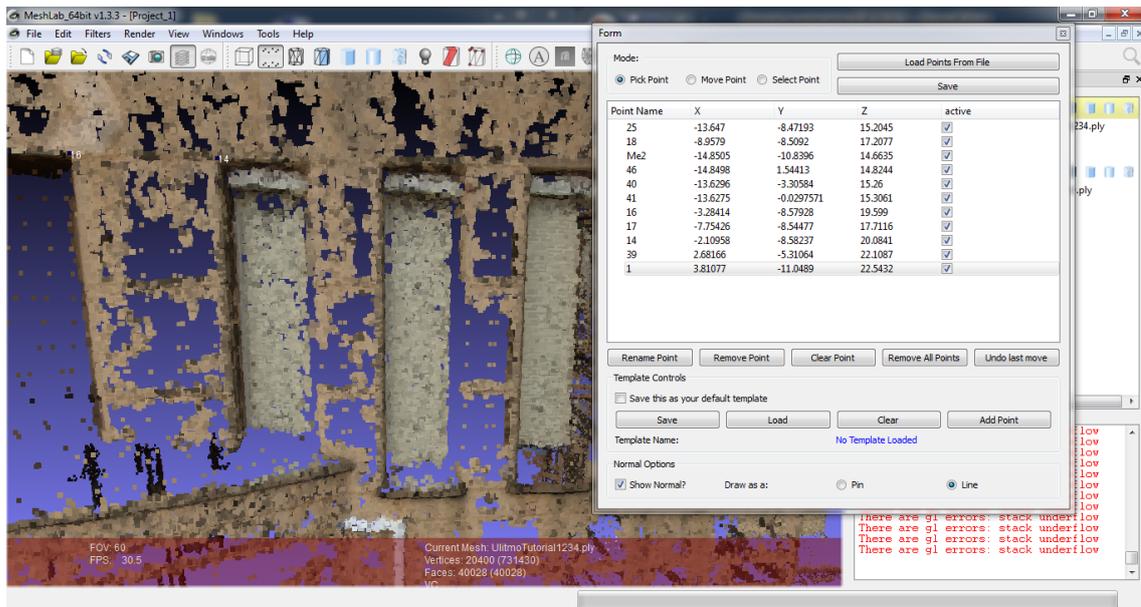


Figura 61. Coordenadas de los puntos tomados con MeshLab.

En la Figura 62 podemos ver las coordenadas en el sistema de referencia que posee el modelo en MeshLab.

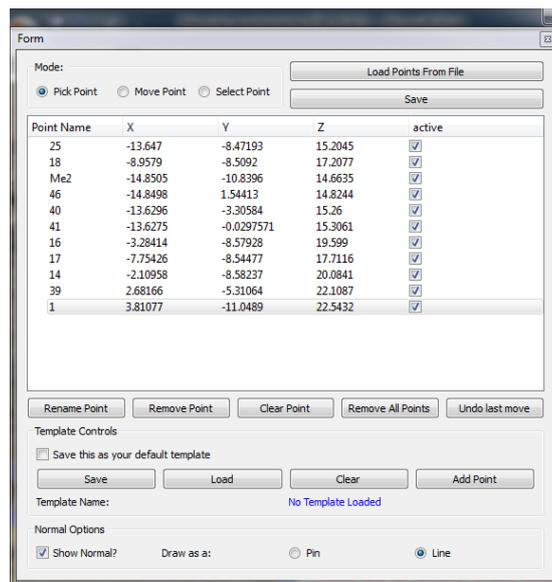


Figura 62. Coordenadas de los puntos con MeshLab.

Después de realizar el procedimiento anteriormente descrito de exportación de los puntos con sus coordenadas nos quedan los valores de las medidas de comparación. Ver Figura 63.

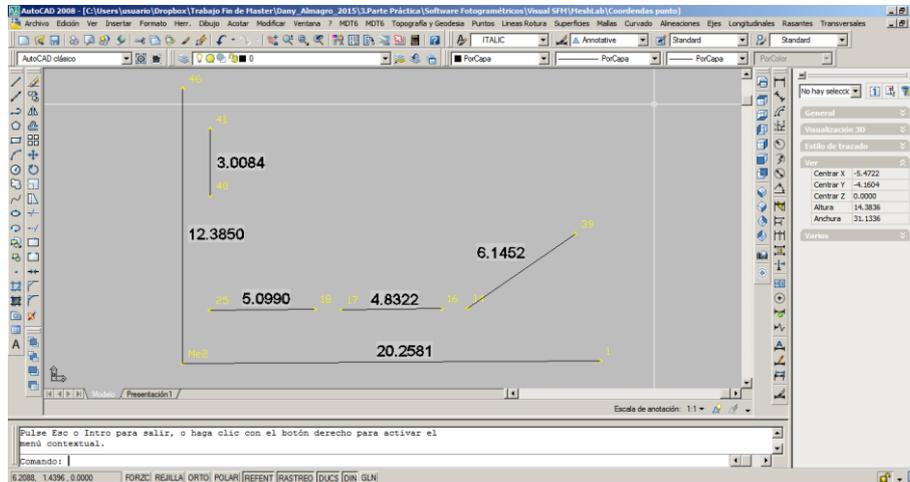


Figura 63. Toma de medidas entre los puntos anteriores con AutoCAD.

Medidas entre los puntos:

2-1	20.2581 m
46-2	12.3850 m
25-18	05.0990 m
40-41	03.0084 m
17-16	04.8322 m
14-39	06.1452 m

Tabla 8. Medidas del modelo realizado con VisualSFM y MeshLab obtenidas en AutoCAD.

5. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MÉTRICA DE LOS MODELOS 3D

Conocer en qué medida las dimensiones del modelo tridimensional recreado se asimilan a la realidad y cómo se desvían es muy importante. Como consecuencia, debe analizarse la precisión y exactitud de estos modelos.

En la actualidad, revisando la bibliografía, no hay definido un procedimiento estándar o normas para determinar dicha calidad, aunque ya hay algunos intentos por estandarizarlos en los diferentes campos en los que interviene la fotogrametría (Martínez et al, 2013).

A pesar de no encontrar un procedimiento estandarizado, unificando los sistemas encontrados en la mayoría de trabajos (Martínez Rodríguez, 2014) podemos diferenciar tres operaciones básicas: obtención de puntos de contraste reales (TCP, “*true check points*”), obtención de los puntos de contraste fotogramétricos (PCP, “*photogrammetric check points*”) y el cálculo de la calidad de medida (MQ, “*metric quality*”) de la técnica fotogramétrica evaluada.

En este trabajo se ha escogido el método de evaluación MQ, es decir, calidad de medida, tomando 6 medidas de referencia en los 4 modelos generados.

Como anteriormente se explicó en el análisis de errores de los métodos de levantamiento arquitectónico, es importante conocer los conceptos relacionados con la calidad métrica de un modelo: **exactitud y precisión**. La exactitud nos informa de lo cerca que el resultado de una medición está del valor verdadero. Por otro lado, la precisión de un instrumento o método de medición está asociada a la sensibilidad o menor variación de la magnitud que se pueda detectar, es decir, a la dispersión del conjunto de los valores obtenidos de mediciones repetidas. Cuanto menor es la dispersión, mayor es la precisión.

Los diferentes autores (Martínez et al, 2013) (García-León et al, 2014) (Souto Vidal et al, 2015) (Salcedo Galera & Calvo López, 2014) toman diferentes índices estadísticos para proporcionar información de la exactitud y la precisión del modelo. Por ello, realizando la diferencia entre las medidas obtenidas en el modelo y las medidas reales del objeto nos dan como resultados unos errores en la medición. Para analizar estos errores los estadísticos tomados en esta práctica son los siguientes:

- Para la estimación de la exactitud:
 - Error Máximo: Máximo valor de los errores obtenidos. Valor positivo.

- Error Mínimo: Mínimo valor de los errores obtenidos. Valor negativo.
- Media: Media aritmética, también llamada promedio o simplemente media, muestra el valor central de los errores obtenidos.
- Media error valor absoluto: Media aritmética de los errores en valor absoluto.
- Error cuadrático medio. RMSE: medida de la diferencia entre los valores pronosticados por un modelo y los valores observados de la realidad.

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum (X_o - X_v)^2}{n}}$$

Donde,

x_o es el valor observado

x_v es el valor verdadero

n es el número de observaciones

- Para la estimación de la precisión:
 - Desviación estándar o típica: Es una medida de dispersión que nos da idea de cuánto tienden a alejarse los valores puntuales del promedio en una distribución.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \text{ donde } \bar{x} \text{ es el promedio de los valores.}$$

- Desviación típica absoluto. Desviación típica tomando los errores en valor absoluto.

Los errores absolutos se utilizan cuando interesa conocer la magnitud de los errores y no su signo y, por otra parte, permiten hacer afirmaciones de probabilidad sin necesidad de asumir una distribución simétrica (Hohle & Hohle, 2009).

Se pueden encontrar algunas clasificaciones de la exactitud de los métodos fotogramétricos en función del error absoluto (Carbonell, 1989). Aquí se distinguen 3 grupos: muy precisos (exactitud de 1 mm o menor), precisos (rango de exactitud en torno a 1 o 2 mm) y métodos fotogramétricos sencillos y rápidos (métodos con simpleza y bajo coste del equipo requerido; errores máximos de 5 cm son aceptables).

Por otra parte, el error relativo nos permite estimar la exactitud referida al tamaño del objeto.



$$\text{Error Relativo} = 1 : \frac{D}{E}$$

donde, D es el valor tomado como real del objeto estudiado y E el valor de la medida en el modelo.

Para finalizar, en función a la MQ (Metric Quality) es posible realizar análisis comparativos de diferentes técnicas fotogramétricas empleadas (Martínez Rodríguez, 2014). Por lo tanto, en los trabajos se suelen comparar técnicas que difieren en la cámara fotográfica empleada, en el número de puntos de control empleado, en el número de fotografías realizadas, en la técnica de calibración empleada o, como es el caso de éste trabajo fin de máster, en el software utilizado.

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los cálculos estadísticos realizados a partir de los datos obtenidos de los levantamientos hechos anteriormente los mostramos en las siguientes tablas. Las medidas están en metros.

Distancias	Estación Total
2-1	20,038 m
46-2	12,309 m
25-18	5,117 m
40-41	3,293 m
17-16	4,860 m
14-39	6,091 m

Tabla 9. Medidas comparativas de la estación total.

Distancias	123D Catch	PhotoScan	Pix4d	VisualSFM	VisualSFM2
2-1	20,053	20,026	20,064	20,336	20,258
46-2	12,310	12,300	12,317	12,390	12,385
25-18	5,086	5,083	5,117	5,116	5,099
40-41	3,287	3,328	3,286	3,298	3,008
17-16	4,833	4,837	4,819	4,848	4,832
14-39	6,058	6,130	6,091	6,113	6,145

Tabla 10. Medidas obtenidas de los levantamientos fotogramétricos. Medidas en metros.

Distancias	123D Catch	PhotoScan	Pix4d	VisualSFM	VisualSFM2
2-1	0,015	-0,012	0,026	0,298	0,220
46-2	0,001	-0,009	0,008	0,081	0,076
25-18	-0,031	-0,034	0,000	-0,002	-0,018
40-41	-0,006	0,035	-0,007	0,004	-0,285
17-16	-0,027	-0,023	-0,041	-0,012	-0,028
14-39	-0,033	0,039	0,000	0,021	0,054

Tabla 11. Diferencia entre las medidas de cada programa y la estación total.

	123D Catch	PhotoScan	Pix4D	VisualSFM	VisualSFM2
Error Máximo	0,015400	0,039000	0,026000	0,298000	0,220100
Error Mínimo	-0,033400	-0,034000	-0,041000	-0,012000	-0,284600
Media de error	-0,013483	-0,000667	-0,002333	0,065183	0,003317
Disv. Típica error	0,019897	0,030507	0,022079	0,118689	0,166845
Media error v. absoluto	0,018850	0,025333	0,013667	0,069683	0,113450
Desv. Típica error v. abs.	0,013699	0,012691	0,016428	0,115581	0,111379
RMSE	0,022621	0,027857	0,020290	0,126444	0,152344

Tabla 12. Análisis estadísticos de los errores cometidos por cada programa en la toma de medidas.

Distancias	123D Catch	PhotoScan	Pix4d	VisualSFM	VisualSFM2
2-1	0,077%	-0,060%	0,130%	1,487%	1,098%
46-2	0,006%	-0,073%	0,065%	0,655%	0,617%
25-18	-0,606%	-0,664%	0,000%	-0,029%	-0,352%
40-41	-0,173%	1,063%	-0,213%	0,137%	-8,643%
17-16	-0,553%	-0,473%	-0,844%	-0,247%	-0,572%
14-39	-0,548%	0,640%	0,000%	0,353%	0,890%
PROMEDIO	-0,300%	0,072%	-0,144%	0,393%	-1,160%

Tabla 13. Errores relativos en %.

Primeramente, vamos a desechar el segundo método por el que se obtuvieron las medidas con VisualSFM por tener dos valores que superan los 20 cm de error. De esta manera nos quedamos con el método 1 para evaluar los resultados.

Observando los resultados obtenidos en la Tabla 12 podemos decir que el valor superior del error máximo se produce con VisualSFM con casi 30 cm de error. El valor máximo del error mínimo, en cambio se produce en Pix4D con -0,041 m y el valor mínimo en este caso con VisualSFM con -0,012.

La media de error con menor magnitud (próximo a 0 es lo ideal) es la obtenida con PhotoScan seguida de Pix4D. VisualSFM queda de nuevo como la última con peores resultados. En cambio, al tener los errores en valor absoluto donde importa más la magnitud que la simetría de las mediciones, como explicamos anteriormente, Pix4D es el que muestra más exactitud, seguido de 123DCatch, después PhotoScan y por último VisualSFM (ver en Tabla 12).

Los valores resultantes de los errores cuadráticos medios (ver en Tabla 12) confirman lo anterior. Pix4D muestra con sus valores en los estadísticos de los errores una mayor exactitud al resto, seguido de 123DCatch. Por lo tanto, podemos clasificar según la exactitud los programas quedando en el siguiente orden: Pix4D, PhotoScan, 123DCatch y VisualSFM.

En términos de precisión, observando los valores en la desviación típica (ver en Tabla 12) y en ésta con los valores absolutos podemos decir que, en este caso, 123DCatch se muestra más precisa que los demás programas fotogramétricos como consecuencia de que sus valores no se alejan mucho del promedio de los errores de la medición. VisualSFM muestra una vez más los peores resultados.

Por último, para tener una idea de exactitud de los programas en función del tamaño del objeto, vemos que en los valores de los errores relativos PhotoScan

muestra una mayor exactitud (0,072%), seguida de Pix4D, a continuación, 123DCatch y, por último, VisualSFM (ver en Tabla 13).

Una vez analizado los resultados, podemos decir que el programa más exacto es Pix4d y el más preciso 123DCatch.

Los valores obtenidos en general (ver en Tabla 11), exceptuando 3 mediciones, no sobrepasan el error de los 4 cm. Así pues, llegamos a la conclusión de que son modelos con buena exactitud, pero que en trabajos que necesitasen precisiones por debajo del centímetro no podrían ser aceptados.

Podemos llegar a la conclusión, de que estos errores pueden verse mucho más reducidos realizando una mejor planificación de la toma de imágenes, es decir, haber tomado un mayor número de capturas, con mayor solapamiento, a diferentes alturas o a una altura mayor si hubiéramos utilizado un mástil dónde elevar la cámara.

En función de lo expuesto en el anterior párrafo se pueden desarrollar líneas de investigación futuras como se nombrará en su respectivo apartado.

En esta parte del TFM también se muestra la representación del edificio 3D con cada software, también se pueden ver con más detalle en el Anexo IV.

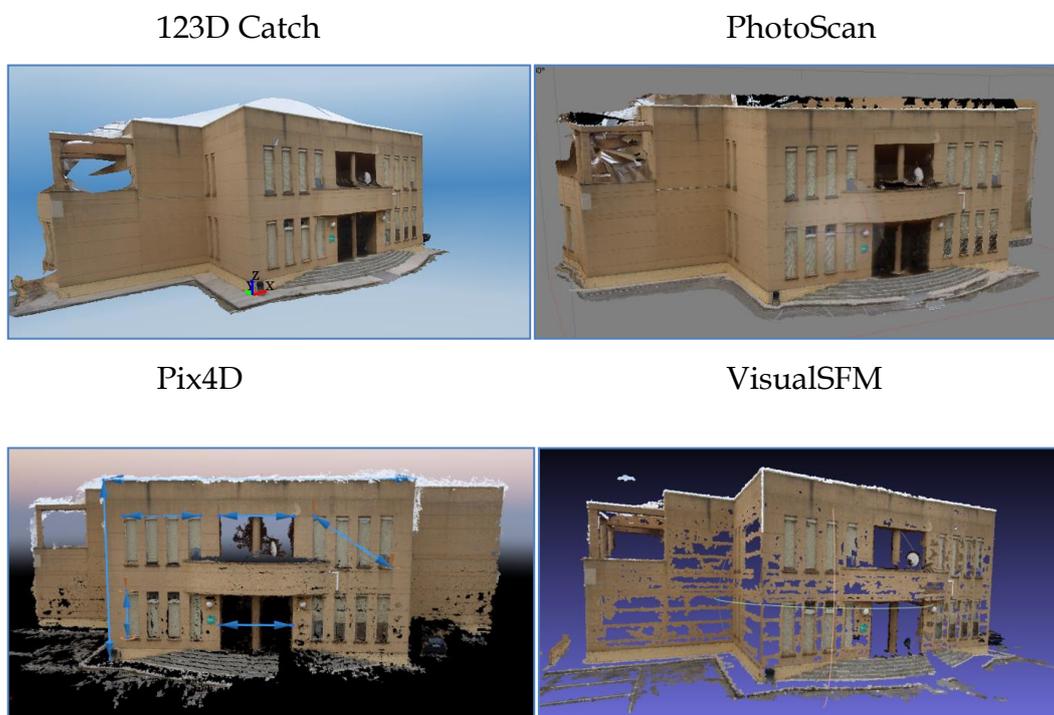


Figura 64. Comparación de los diferentes modelos.



Como podemos observar, 123DCatch y PhotoScan dan mejores resultados en la representación del modelo ya que ambos permiten realizar el mallado y texturizado con el propio programa. En cambio, Pix4D y VisualSFM finalizan el proceso del modelado en la nube de puntos densa, lo cual genera una recreación bastante conseguida del modelo y con una fiabilidad aceptable, pero muestran agujeros en la nube de puntos.

Tras la experiencia de utilizar los 4 programas, el programa PhotoScan es para mí el seleccionado como programa adecuado para realizar trabajos de levantamiento arquitectónico. Las mayores ventajas son la interfaz, los resultados generados y la información que nos facilita. En conclusión, es un programa fiable, con mayor cobertura y detalle que el resto.



7. CONCLUSIONES

Por una parte, tras analizar en profundidad los diferentes sistemas de levantamiento arquitectónico llegamos a la conclusión de que el método fotogramétrico tiene un gran potencial en la actualidad y puede llegar a ser el más indicado para la documentación del patrimonio cultural y arquitectónico si sigue con este desarrollo.

La fotogrametría es un método para análisis de objetos tridimensionales muy eficaz, rápido y claro. Con éste se recoge gran volumen de información en poco tiempo, con pocos medios y sin dañar físicamente al objeto.

Su uso en el estudio del Patrimonio es fundamental, ya que permite obtener documentación sobre el estado del objeto a analizar. La reconstrucción del mismo es de gran precisión y realismo, y con ellos se pueden generar planes de conservación o de restauración.

Durante el desarrollo de la práctica, en el trabajo de campo hay que resaltar que hay que realizar una buena planificación en la toma de imágenes con cámara, lo cual es fundamental para la efectividad de la reconstrucción del modelo. Por ello, debemos realizar una primera calibración de la cámara, determinar los parámetros de la toma fotográfica como son la distancia al objeto en las capturas, el enfoque, el tiempo de exposición, la distancia focal, el recorrido a seguir, las alturas de tomas, la hora del día por generación de sombras, el estudio de las limitaciones espaciales del entorno del elemento o el número de estaciones necesarias para garantizar que cada superficie aparezca en al menos tres fotografías. Todo ello evitará posibles errores en el procesado de las imágenes.

También es necesario tener en cuenta el volumen de datos a procesar y del software y hardware del que se dispone. La velocidad e incluso la efectividad de los programas fotogramétricos están íntimamente relacionados con la capacidad del equipo computacional del que disponemos. En este caso práctico tuvimos que cambiar 2 veces de computador para poder obtener datos fiables de uno de los programas (Pix4D).

El desarrollo de los programas fotogramétricos y la aparición de nuevos algoritmos dan mucho valor al método fotogramétrico frente a los métodos topográficos o el escáner láser, pero debemos, por otra, parte tener en cuenta que el uso combinado de ellos permite mejorar bastante los resultados.

La técnica de escáner láser 3D muestra modelos de gran exactitud y precisión con errores por debajo del mm. Éste es un método muy aceptable si se dispone



de los recursos necesarios para poder adquirir este tipo de instrumental, el cual requiere una inversión mayor a los 40.000 € como vimos en el apartado correspondiente.

Por ello, la fotogrametría como método rápido, de gran precisión y fiabilidad, que genera buenos resultados en el modelado y las dimensiones del objeto, y por su fácil adquisición, hace de éste uno de los más potenciales en la actualidad para realizar trabajos de levantamiento arquitectónico.

Por otra parte, podemos decir que casi cualquier trabajo puede ser resuelto por un usuario que tenga conocimientos de fotografía y sepa usar el software, aunque no tenga conocimientos previos de fotogrametría.

Por último, incidir en que este trabajo permite mostrar el potencial alcanzable con el método fotogramétrico en la elaboración de los modelos 3D digitales para obtener ortofotos y planos-



8. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Siguiendo con la misma línea de comparación de estos programas fotogramétricos, podríamos realizar la comparación teniendo en cuenta otra serie de parámetros como podrían ser:

- El número de fotografías realizadas sobre el inmueble.
- La utilización de diferentes cámaras digitales: Réflex, Smartphone, compactas...
- La altura de toma de las imágenes ayudándose de un mástil.

Este análisis podría ser un desarrollo de las líneas futuras de trabajo más interesantes para poder seguir comparando estos programas y así decantarse por el que mejores prestaciones dé.



9. BIBLIOGRAFÍA

- AGISOFT. (s.f.). *Useful Tips on Image Capture: How to Get an Image Dataset that Meets PhotoScan Requirements?* Obtenido de http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/Image%20Capture%20Tips%20-%20Equipment%20and%20Shooting%20Scenarios.pdf
- Almagro, A. (1991). Simplified methods in Architectural Photogrammetry. Delphi, Greece: XIV CIPA International Symposium. Obtenido de Almagro, A. (1991). "Simplified methods in Architectural Photogrammetry". XIV CIPA International Symposium, Delphi, Greece.
- Almagro, A. (2001). Simple Methods of Photogrammetry - Easy and Fast. Postdam, Germany: XVIII International Symposium of CIPA.
- Almagro, A. (2004). *Levantamientos Arquitectónicos*.
- ASPRS. (1934). *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*. Obtenido de www.asprs.org
- ASPRS. (2012). Obtenido de <https://www.asprs.org/>
- Bonneval, H. (1972).
- Carbonel, M., & Dallas, R. W. (10 de 04 de 2003). *ScienceDirect*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001866385900122>
- Carbonell, M. (1989). *Architectural photogrammetry, Karara HM, Non-topographic photogrammetry*. Falls Church, Virginia.
- CIPA. (s.f.). Obtenido de <http://cipa.icomos.org/text%20files/TURIN/485.pdf>
- CIPA 3X3 Rules. (08 de 12 de 2014). Obtenido de The International Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA): http://cipa.icomos.org/index.php?id=20&tx_ttnews%5Btt_news%5D=38&cHash=5cd6f8216e31d77658fc70ca84c7455d
- Cuartero, A. (Noviembre de 2012). Introducción a la fotogrametría. Universidad de Extremadura.
- DATATECA. (2016). *UNAD*. Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201620/MODULO%20TOPOGRAFIA/leccin_10_errores_comunes_en_topografa.html
- Engineering, D. o. (s.f.). *Department of Computer Science and Engineering*. (Indian Institute of Technology Delhi) Obtenido de <http://www.cse.iitd.ac.in/~mcs112609/Meshlab%20Tutorial.pdf>
- FAROG. (5 de 10 de 2012). *SCENECT 5.1 Tutorial MeshLab Create a mesh for 3D printing*. Recuperado el 04 de 07 de 2016, de YOUTUBE: <https://www.youtube.com/watch?v=u0Q1A1zA32U>
- Fernández, G., Fernández, José, S., Martines, García, & Marcos. (2012). Study of efficiency for heritage documentation from image and rangebased information. Case study: San Martín Church, Segovia. *Fabbrica della Conoscenza numero 16*.
- García León, J., & Cuartero Sáez, A. (2002). Tendencias y recopilación práctica de programas utilizados. *Mapping*, 26-32.
- García, I., Fernández, M., & Mesanza, A. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. *Arqueología de la arquitectura.*, 25-44.
- García-Gómez, I., Fernández de Gorostiza López de Viñaspre, M., & Mesanza Moraza, A. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. *Arqueología de la arquitectura*, (págs. 25-44). Madrid.



- García-León, Vázquez, Ros, García, & Moreno. (2014). Levantamiento tridimensional mediante fotogrametría y láser escáner del Palacio Nazarí de la Casa Dorda. *APEGA*, (págs. 216-225).
- Hohle, J., & Hohle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 398-406.
- ISPRS. (2007). *International Society for Photogrammetry and Remote Sense*. Obtenido de <http://www.isprs.org>: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-9730.2012.00693.x/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.isprs.org&purchase_site_license=LICENSE_DENIED
- ISPRS. (13 de 11 de 2015). *ISPRS*. Obtenido de <http://www.isprs.org/society/Default.aspx>
- Lerma García, J. L. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Valencia.
- Lowe, D. G. (14 de 05 de 2004). *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. Recuperado el 15 de 06 de 2016, de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Scale-invariant_feature_transform&oldid=82420854
- Mañana, P., Rodríguez, A., & Blanco, R. (2088). Una experiencia en la aplicación del láser escáner a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio. *Arqueología de la arquitectura*, 15-32.
- Martínez Rodríguez, S. (2014). Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes.
- Martínez Rodríguez, S. (2014). *Tesis Doctoral, EVALUACIÓN EN CAMPO DE UNA NUEVA TÉCNICA FOTOGAMÉTRICA DE RANGO CERCANO Y BAJO COSTE BASADA EN LA CORRELACIÓN AUTOMÁTICA DE IMÁGENES*. SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO : Universidad de Santiago de Compostela.
- Martínez Rodríguez, S. (2014). *Tesis Doctoral, evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes*. SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO: Universidad de Santiago de Compostela.
- Martínez, S., Ortiz, J., Gil, M. L., & Rego, M. T. (2013). Recording Complex Structures Using Close Range Photogrammetry: The Cathedral of Santiago De Compostela. *The Photogrammetric Record*. *The Photogrammetric Record*, 375–395.
- Ortiz Ortiz, J., GIL, M. L., Martínez, S., Rego, T., & Meijide, G. (2010). A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras. *JOURNAL OF ARCHAEOLOGICAL SCIENCE*, V.37, 3158.
- Pereira Uzal, J. M. (2016). *Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion*.
- Pereira, J. (20 de Diciembre de 2012). *Digital Heritage*. Recuperado el 04 de 07 de 2016, de <http://www.jpereira.net/apuntes-brevs/virtualizar-visualsfm-para-windows>



- Pereira, J. (8 de 10 de 2012). *Digital Heritage*. Recuperado el 04 de 07 de 2016, de <http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/introducicon-a-la-fotogrametria-parte-1>
- Pereira, J. (08 de 10 de 2012). *DIGITAL HERITAGE*. Obtenido de <http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/introducicon-a-la-fotogrametria-parte-1>
- R Wackrow, J. C. (2008). A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model. *The Photogrammetric Record* 23, 6-18.
- REIRA UZAL, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion ph investigación. (1).
Revista MAPPING. (2013). Obtenido de <http://www.mappinginteractivo.es/ojs/index.php/MAPPING/index>
- Ricardo. (29 de 10 de 2015). *Pix4D: ¿el mejor software de mapeado 3D?* Obtenido de <http://www.drones.openopin.com/pix4d-software-mapeado/>
- Rivas, I. L. (09 de 2013). PROYECTO FIN DE MÁSTER. TOMA DE DATOS FOTOGRAMÉTRICOS, RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL, REALIDAD AUMENTADA Y DIFUSIÓN EN LA RED DE LA IGLESIA NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN.
- Rodríguez, M. Á. (2008). Sobre la medición instrumental en el levantamiento arquitectónico. *XII Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*.
- Rodríguez, S. M. (2014). *Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes*. SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO .
- Salcedo Galera, M., & Calvo López, J. (2014). La cabecera de Santa María de Chinchilla. Levantamiento y análisis geométrico. *XII CONGRESO INTERNACIONAL DE EXPRESIÓN GRÁFICA APLICADA A LA EDIFICACIÓN*, (págs. 184-193). Madrid.
- SECFT. (2016). *Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección*. Obtenido de <http://www.secft.es/secft,1,1,quienes-somos.html#mas>
- Souto Vidal, M., Ortiz-Sanz, J., & Gil Docampo, M. (2015). Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito. *Informes de la construcción*.
Universidad Nacional. Abierta y a Distancia. (s.f.). Recuperado el 15 de 05 de 2016, de UNAD:
Http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201620/MODULO%20TOPOGRAFIA/1eccin_10_errores_comunes_en_topografa.html
- Westoby, M., Brasington, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*.



INDICE DE REFERENCIAS PARTE PRÁCTICA

Pix4D

<https://pix4d.com/>
Pix4D Introduction Guide. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202561499-Pix4D-Introduction-Guide#gsc.tab=0>
Reconstrucción 3D usando PIX4D Monumento "Norma Patricia".
<https://www.youtube.com/watch?v=QltTKhlxyBw>

PhotoScan

<http://softpcfull.com/agisoft-photoscan-professional-1-2-4-ml/>
<http://www.agisoft.com/index.php?id=32>
[http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%203D-model.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1%20-Tutorial%20(BL)%20-%203D-model.pdf)
[http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1%20-Tutorial%20\(IL\)%20-%20Building.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1%20-Tutorial%20(IL)%20-%20Building.pdf)

123D Catch

<http://ecobarriosgrancanaria.es/contenido/tutoriales/autodesk123d.pdf>
http://www.sacosta.org/ra/Autodesk_123D_Catch_2013.pdf

Visual SFM y MeshLab

<http://ccwu.me/vsfm/>
<http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/introduccion-a-la-fotogrametria-parte-1>
<http://www.jpereira.net/apuntes-breves/virtualizar-visualsfm-para-windows>
<https://www.youtube.com/watch?v=ZRTEMKS3Sw0>



10. INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Concepto gráfico sobre exactitud y precisión. Fuente: https://instrumentacionelectronicai.wordpress.com/tag/exactitud/	22
Figura 2. Esquema básico del funcionamiento de un láser-escáner. Fuente: García et al. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios.	27
Figura 3. Fachada principal del edificio de Telecomunicaciones de Politecnica de la UNEX.	33
Figura 4. Base topográfica BT 1000.	35
Figura 5. Fotografía aérea con situación de las bases topográficas empleadas en la toma de datos por topografía.	38
Figura 6. Coordenadas de los puntos en un archivo de bloc de notas.	42
Figura 7. Coordenadas de los puntos exportadas a Topocal.	43
Figura 8. Vista de los puntos en Topocal.	43
Figura 9. Vista de los puntos en 3D con el programa AutoCAD.d	44
Figura 10. Vista en 3D del edificio delineado.	44
Figura 11. Plano fachada principal con mediciones.	45
Figura 12. Esquema de toma de imágenes de objetos cercanos.	49
Figura 13. Cámara Réfles Olympus.	50
Figura 14. Cámara de Smartphone Huawei P8 Lite.	50
Figura 15. Pantalla principal 123D Catch.	52
Figura 16. Procesado de imágenes en 123d Catch.	53
Figura 17. Visión 3D del edificio procesado con 123D Catch.	53
Figura 18. Chequeo manual de puntos homólogos en 123D Catch.	54
Figura 19. Eliminación de puntos no relevantes en 123D Catch.	54
Figura 20. Medida de los puntos objeto de estudio con 123D Catch.	55
Figura 21. Medida de las distancias con DraftSight.	56
Figura 22. Pantalla principal de PhotoScan.	57
Figura 23. Selección fotografías para procesar con PhotoScan.	58
Figura 24. Selección del cielo para restar de la imagen con PhotoScan.	58
Figura 25. Ventana de parámetros para orientación de imágenes con PhotoScan.	59
Figura 26. Resultado edificio 3D con PhotoScan.	59
Figura 27. Creación de nube de punto densa con PhotoScan.	59
Figura 28. Resultados nube de puntos densa con PhotoScan.	60
Figura 29. Depuración del modelo con PhotoScan.	60
Figura 30. Crear malla con PhotoScan.	60
Figura 31. Crear textura con PhotoScan.	61
Figura 32. Resultado tras mallar y texturizar el modelo con PhotoScan.	61
Figura 33. Modelo con medida tomadas en PhotoScan.	61
Figura 34. Vista superior del modelo con PhotoScan.	62
Figura 35. Vista de alzado del resultado final con PhotoScan.	62
Figura 36. Pantalla principal programa fotogramétrico Pix4D.	63
Figura 37. Selección de fotografías en Pix4D.	63
Figura 38. Imágenes cargadas por el programa Pix4D.	63
Figura 39. Selección de sistema de referencias arbitrario y unidades en metros en Pix4D.	63
Figura 40. Selección de opción de procesado "3D models" con Pix4D.	63



Figura 41. Indicación de los pasos que ejecuta Pix4D. _____	63
Figura 42. Importación de coordenadas de puntos con Pix4D. _____	63
Figura 43. Procesado de las imágenes con Pix4D. _____	63
Figura 44. Nube de puntos generado con Pix4D. _____	63
Figura 45. Visualización de la nube de puntos densa con Pix4D. _____	63
Figura 46. Toma de medidas con Pix4D. _____	63
Figura 47. Toma de medidas con Pix4D con más detalle. _____	63
Figura 48. Resultado final del modelo con Pix4D. _____	63
Figura 49. Pantalla principal del programa fotogramétrico VisualSFM. _____	70
Figura 50. Carga de imágenes con VisualSFM. _____	71
Figura 51. Nube de puntos creado con VisualSFM. _____	71
Figura 52. Nube de puntos densa con VisualSFM. _____	72
Figura 53. Visualización de la nube de puntos densa de VSFM con MeshLab. _____	73
Figura 54. Depurado de la nube de puntos con MeshLab. _____	73
Figura 55. Visualización del modelo depurado con MeshLab. _____	74
Figura 56. Opciones de mallado con MeshLab. _____	74
Figura 57. Visualización de la malla creada con MeshLab. _____	75
Figura 58. Texturizado del modelo con MeshLab. _____	75
Figura 59. Medición de los puntos con MeshLab. _____	76
Figura 60. Visualización más cercana de las medidas tomadas con MeshLab. _____	76
Figura 61. Coordenadas de los puntos tomados con MeshLab. _____	77
Figura 62. Coordenadas de los puntos con MeshLab. _____	77
Figura 63. Toma de medidas entre los puntos anteriores con AutoCAD. _____	78
Figura 64. Comparación de los diferentes modelos. _____	84
Tabla 1. Precisión recomendada para levantamientos topográficos. _____	21
Tabla 2. Medidas obtenidas con la Estación Total. _____	45
Tabla 3. Medidas obtenidas con 123D Catch. _____	55
Tabla 4. Medidas obtenidas con AutoCAD tras ser importadas desde 123D Catch. _____	56
Tabla 5. Medidas obtenidas con PhotoScan. _____	62
Tabla 6. Medidas obtenidas del modelo con Pix4D. _____	69
Tabla 7. Medidas obtenidas con MeshLab aplicando la media de los valores. _____	76
Tabla 8. Medidas del modelo realizado con VisualSFM y MeshLab obtenidas en AutoCAD. _____	78
Tabla 9. Medidas comparativas con flexómetro y estación total. _____	82
Tabla 10. Medidas obtenidas de los levantamientos fotogramétricos. _____	82
Tabla 11. Diferencia entre las medidas de cada programa y la estación total. _____	82
Tabla 12. Análisis estadísticos de los errores cometidos por cada programa en la toma de medidas. _____	82
Tabla 13. Errores relativos en %. _____	83

ANEXO I. Reseñas de las estaciones bases

Reseña del vértice

A

Reseña literal

Vértice A, clavo de coordenadas absolutas situado en la explanada de baldosines que está en el edificio azul. Está junto a un banco y cuyas coordenadas del GPDd son: $x= 728624,380\text{m}$, $y= 4373254,473\text{m}$ y $z= 423,78\text{m}$. Este vértice es un clavo grande con un cruz central.

Reseña pequeña escala



Reseña gran escala (fotografías)



Reseña del vértice

B

Reseña literal

Vértice B, situado en la explanada de baldosines del pabellón de informática, en el lado que se encuentra junto al edificio de teleco. Este vértice es un clavo pequeño con arandela situado al lado de una tabadera de un registro de agua.

Reseña pequeña escala



Reseña gran escala (fotografías)



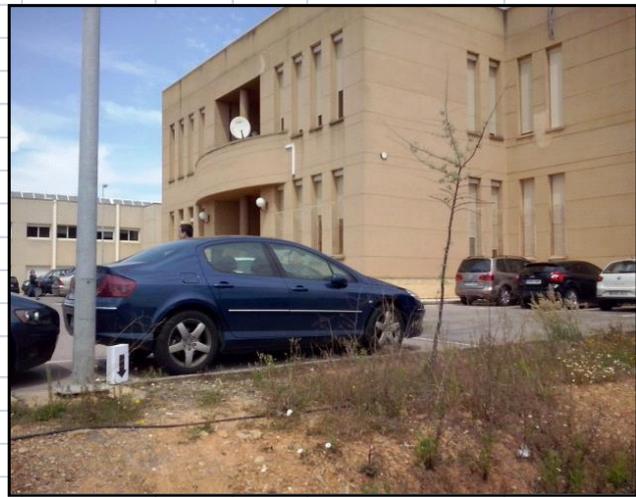
Reseña del vértice

C

Reseña literal

Vértice C, situado en el bordillo que delimita la escuela politécnica, entre el edificio azul y la carretera. Este clavo es un clavo pequeño con arandela que se sitúa junto a la farola de esa zona.

Reseña pequeña escala



Reseña gran escala (fotografías)





ANEXO II. Toma de datos y cálculo de las coordenadas de la Poligonal

POLIGONAL

Coordenadas de la primera base o punto de estación (Ea):

Punto A (1000):

X= 728624,380m

Y= 4373254,473 m

Z= 423,780 m

Punto 2 (1001):

X= 728564,210m

Y= 4373269,808m

Z= 423,690m

Acimut entre la estación Ea y E2 **115,8868 = 200 - arctg(Δx/Δy)**

Acimut entre la estación Ea y Et: **368,7555**

Estadillo de campo

Estación nº	Punto visado	CD			CI			m (m)
		LH	LV	Dh (m)	LH	LV	Dh (m)	
Ea i= 1,525 m	Eb	241,9012	99,9944	26,231	41,8818	300,0200	26,232	1,62
	Ec	372,0220	100,2872	39,893	172,0190	299,8100	39,895	1,62
Eb i= 1,520 m	Ea	231,9768	99,5398	26,269	31,9684	300,4640	26,271	1,62
	Ec	189,0216	100,1000	56,873	389,0318	299,8954	56,874	1,62
Ec i= 1,465 m	Ea	223,3772	99,3052	39,893	23,3758	300,7034	39,887	1,62
	Eb	250,3438	99,6184	56,871	50,3370	300,3828	56,869	1,62

1,525 1,52 1,465

Estadillo de cálculos angulares

Estación nº	Punto visado	LH promedio	LV promedio	Dh promedio	Σ desorient.	θ Acimut	θ Corrección	θ AzCompens	θ AzCompens Rad	V.Compens Rad
Ea	Eb	241,8915	100,0072	26,2315	126,8640	368,7555	0,0129	368,7684	5,7926	1,5709
	Ec	372,0205	100,0486	39,8940		98,8845		98,8974	1,5535	1,5716
Eb	Ea	231,9726	100,0019	26,2700	-63,2171	168,7555	0,0259	168,7814	2,6512	1,5708
	Ec	189,0267	99,9977	56,8735		125,8096		125,8355	1,9766	1,5708
Ec	Ea	223,3765	100,0043	39,8900	75,4692	298,8457	0,0388	298,8845	4,6949	1,5709
	Eb	250,3404	100,0006	56,8700		325,8096		325,8484	5,1184	1,5708
Error en acimut:						0,0388				
Tolerancia angular						0,0527				



Cálculo de coordenadas planimétricas

Estación nº	Punto visado	Incremento de coordenadas		Coordenadas absolutas		Corrección		Coordenadas finales		Punto
		ΔX	ΔY	X	Y	ΔX	ΔY	X	Y	
		Calculada	Calculada	Calculada	Calculada			Compensada	Compensada	
Ea	Ec	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Eb	-12,368	23,155	-12,368	23,155	0,000	0,001	-12,368	23,156	Eb
Eb	Ea	---	---	0,000	0,000	---	---	---	---	
	Ec	52,253	-22,452	39,885	0,703	-0,001	0,002	39,884	0,705	Ec
Ec	Eb	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Ea	-39,886	-0,699	-0,001	0,004	-0,001	0,004	0,000	0,000	Ea
<i>Error</i>				-0,0012	0,0042					
Tolerancia para cierre de coordenadas				0,0149						

Cálculo de coordenada altimétricas

Estación nº	Punto visado	Incremento de coordenadas	Coordenadas absolutas	Corrección	Coordenadas finales	Punto
		ΔZ	Z	ΔZ	Z	
		Calculada	Calculada		Compensada	
Ea	Ec	---	---	---	---	
	Eb	-0,098	-0,098	0,013	-0,085	Eb
Eb	Ea	---	0	---	---	
	Ec	-0,098	-0,196	0,019	-0,177	Ec
Ec	Eb	---	---	---	---	
	Ea	0,158	-0,038	0,038	0,000	Ea
<i>Error</i>			0,038			
Tolerancia para cierre en Z						



ANEXO III. Toma de datos y cálculo de las coordenadas de la Radiación

RADIACIÓN DESDE E. A.

Datos de la Estación Total								
Aumentos (A)		30X						
Sensibilidad (S)		40"						
Apreciación (a)		10 ^{cc}						
Estadillo de campo								
Estación	Punto visado	L.Horiz.	L.Vert.	Dist reducida (Dr)	Altura prisma (m)	Lh Orientada a NG (g)	Lh Orientada a NG (Rad)	Lv (Rad)
E1	Ref. Eb	52,9472	-	-	-	368,768	5,793	-
	1	155,7518	81,1698	35,252	0,000	71,573	1,124	1,275
Altura equipo: (i)	2	119,2650	72,8530	23,627	0,000	35,086	0,551	1,144
1,567	3	114,3222	79,0934	31,434	0,000	30,143	0,473	1,242
	4	104,4434	78,5820	30,706	0,000	20,265	0,318	1,234
	5	104,4338	88,4114	30,722	0,000	20,255	0,318	1,389
	6	94,4522	88,4770	30,733	0,000	10,273	0,161	1,390
	7	104,4370	78,7088	30,706	0,000	20,258	0,318	1,236
	8	154,2238	84,7104		0,000	70,045	1,100	1,331
	9	153,1734	84,4356	32,688	0,000	68,995	1,084	1,326
	10	152,4408	84,2608		0,000	68,262	1,072	1,324
	11	151,3374	83,9874	32,680	0,000	67,159	1,055	1,319
	12	150,5762	83,7900	32,261	0,000	66,397	1,043	1,316
	13	149,3790	83,5072	31,656	0,000	65,200	1,024	1,312
	14	148,4720	83,2942	31,222	0,000	64,293	1,010	1,308
	15	147,2046	82,9912	30,648	0,000	63,026	0,990	1,304
	16	145,3410	82,5286	29,844	0,000	61,162	0,961	1,296
	17	136,6070	80,7726	26,927	0,000	52,428	0,824	1,269
	18	134,0938	80,3002	26,270	0,000	49,915	0,784	1,261
	19	132,3164	80,0256	25,851	0,000	48,138	0,756	1,257
	20	130,9710	79,8112	25,553	0,000	46,792	0,735	1,254
	21	129,1076	79,5148	25,174	0,000	44,929	0,706	1,249
	22	127,7902	79,3410	24,918	0,000	43,611	0,685	1,246
	23	125,8046	79,0750	24,568	0,000	41,626	0,654	1,242
	24	124,4550	78,8872	24,354	0,000	40,276	0,633	1,239
	25	122,3954	78,6344	24,055	0,000	38,217	0,600	1,235
	26	122,3916	56,7154	24,073	0,000	38,213	0,600	0,891
	27	124,4238	86,8214	24,371	0,000	40,245	0,632	1,364
	28	125,8198	86,9612	24,591	0,000	41,641	0,654	1,366
	29	127,7740	87,1088	24,929	0,000	43,595	0,685	1,368
	30	129,0870	87,2738	25,175	0,000	44,908	0,705	1,371
	31	130,9538	87,4048	25,554	0,000	46,775	0,735	1,373
	32	131,5026	89,1340	31,451	0,000	47,324	0,743	1,400
	33	148,9420	89,1340	31,451	0,000	64,763	1,017	1,400
	34	149,3896	89,8454		0,000	65,211	1,024	1,411
	35	150,5892	90,0022	32,280	0,000	66,410	1,043	1,414
	36	151,3334	90,1564		0,000	67,155	1,055	1,416
	37	152,4334	90,3178		0,000	68,255	1,072	1,419
	38	153,1295	90,4370		0,000	68,951	1,083	1,421
	39	154,2136	90,6004	34,335	0,000	70,035	1,100	1,423
	40	122,4158	91,3900	24,064	0,000	38,237	0,601	1,436
	41	122,4164	100,0475	24,073	0,000	38,238	0,601	1,572
	42	131,5114	91,9230	25,662	0,000	47,333	0,743	1,444
	43	148,8592	93,4136	31,402	0,000	64,680	1,016	1,467
	44	145,3102	93,1638	29,835	0,000	61,131	0,960	1,463
	45	136,6072	92,4276	26,903	0,000	52,428	0,824	1,452
	46	119,3304	100,1700	23,601	1,500	35,152	0,552	1,573
	47	155,8470	100,1714	15,262	1,500	71,668	1,126	1,573
	48	114,2770	99,1554	31,391	1,978	30,098	0,473	1,558
	49	94,4282	98,5894	30,708	2,200	10,249	0,161	1,549
	Ref	0,0000	-	-	-	-	-	-
Error cierre V_Horizonte		0,0000						
Cálculo del error angular de la Estación Total								
ev	10,28 ^{cc}				Error a priori	12,143		
el	10 ^{cc}							
ed	15,92 ^{cc}				Error de cierre	0		
ep	2,25 ^{cc}							
ea	21,55 ^{cc}							



CALCULO de la Radiación									
						Ea	0,000	0,000	0,000
Estadillo de calculo									
Punto visado	Azimut	t	ΔX	ΔY	ΔZ	X	Y	Z	
Ref. Eb	368,768								
1	71,573	10,742	31,796	15,223	12,309	31,796	15,223	12,309	
2	35,086	10,734	12,372	20,129	12,301	12,372	20,129	12,301	
3	30,143	10,711	14,334	27,976	12,278	14,334	27,976	12,278	
4	20,265	10,739	9,610	29,163	12,306	9,610	29,163	12,306	
5	20,255	5,655	9,611	29,180	7,222	9,611	29,180	7,222	
6	10,273	5,624	4,938	30,334	7,191	4,938	30,334	7,191	
7	20,258	10,670	9,607	29,164	12,237	9,607	29,164	12,237	
8	70,045								
9	68,995	8,155	28,887	15,298	9,722	28,887	15,298	9,722	
10	68,262								
11	67,159	8,398	28,427	16,121	9,965	28,427	16,121	9,965	
12	66,397	8,397	27,870	16,249	9,964	27,870	16,249	9,964	
13	65,200	8,390	27,043	16,455	9,957	27,043	16,455	9,957	
14	64,293	8,386	26,438	16,608	9,953	26,438	16,608	9,953	
15	63,026	8,389	25,623	16,816	9,956	25,623	16,816	9,956	
16	61,162	8,402	24,461	17,098	9,969	24,461	17,098	9,969	
17	52,428	8,389	19,752	18,300	9,956	19,752	18,300	9,956	
18	49,915	8,399	18,551	18,600	9,966	18,551	18,600	9,966	
19	48,138	8,388	17,737	18,806	9,955	17,737	18,806	9,955	
20	46,792	8,387	17,136	18,956	9,954	17,136	18,956	9,954	
21	44,929	8,392	16,328	19,161	9,959	16,328	19,161	9,959	
22	43,611	8,382	15,766	19,296	9,949	15,766	19,296	9,949	
23	41,626	8,379	14,944	19,501	9,946	14,944	19,501	9,946	
24	40,276	8,386	14,400	19,641	9,953	14,400	19,641	9,953	
25	38,217	8,391	13,589	19,849	9,958	13,589	19,849	9,958	
26	38,213	19,463	13,598	19,865	21,030	13,598	19,865	21,030	
27	40,245	5,118	14,401	19,661	6,685	14,401	19,661	6,685	
28	41,641	5,108	14,962	19,515	6,675	14,962	19,515	6,675	
29	43,595	5,118	15,768	19,309	6,685	15,768	19,309	6,685	
30	44,908	5,101	16,322	19,167	6,668	16,322	19,167	6,668	
31	46,775	5,123	17,131	18,961	6,690	17,131	18,961	6,690	
32	47,324	5,421	21,285	23,154	6,988	21,285	23,154	6,988	
33	64,763	5,421	26,755	16,533	6,988	26,755	16,533	6,988	
34	65,211								
35	66,410	5,112	27,890	16,252	6,679	27,890	16,252	6,679	
36	67,155								
37	68,255								
38	68,951								
39	70,035	5,107	30,601	15,571	6,674	30,601	15,571	6,674	
40	38,237	3,275	13,600	19,852	4,842	13,600	19,852	4,842	
41	38,238	-0,018	13,605	19,860	1,549	13,605	19,860	1,549	
42	47,333	3,273	17,370	18,890	4,840	17,370	18,890	4,840	
43	64,680	3,260	26,692	16,542	4,827	26,692	16,542	4,827	
44	61,131	3,216	24,445	17,105	4,783	24,445	17,105	4,783	
45	52,428	3,215	19,735	18,284	4,782	19,735	18,284	4,782	
46	35,152	-0,063	12,379	20,094	0,004	12,379	20,094	0,004	
47	71,668	-0,041	13,775	6,570	0,026	13,775	6,570	0,026	
48	30,098	0,416	14,294	27,948	0,005	14,294	27,948	0,005	
49	10,249	0,681	4,923	30,311	0,048	4,923	30,311	0,048	



RADIACIÓN DESDE E. B.

Estadillo de campo									
Estación	Punto visado	L.Horiz. (g)	L.Vert. (g)	Dist reducida (Dr)	Altura prisma (m)	Lh Orientada a NG (g)	Lh Orientada a NG (Rad)	Lv (Rad)	
EB	Ref, Ea	0,0000	-	-	-	168,756	2,651	-	
Altura equipo: i(m) 1,580	b2	338,9570	73,8950	24,911	0,000	107,713	1,692	1,161	
	b3	319,8826	75,8306	27,130	0,000	88,638	1,392	1,191	
	b4	314,2176	71,7590	22,771	0,000	82,973	1,303	1,127	
	b5	306,2124	81,1302	18,724	0,000	74,968	1,178	1,274	
	b6	296,2728	83,4386	21,494	0,000	65,028	1,021	1,311	
	b7	278,4758	88,6412	31,613	0,000	47,231	0,742	1,392	
	b8	267,7058	92,3148	47,005	0,000	36,461	0,573	1,450	
	b9	263,6892	93,1782		0,000	32,445	0,510	1,464	
	b10	263,6910	87,2596	53,319	0,000	32,447	0,510	1,371	
	b11	283,4095	86,1192	25,593	0,000	52,165	0,819	1,353	
	b12	343,1164	90,1238	34,739	0,000	111,872	1,757	1,416	
		Ref	0,0001	-	-	-	-	-	-
Error cierre V_Horizont		0,0001							
CALCULO de la Radiación									
						Eb	-12,368	23,156	-0,085
Estadillo de calculo									
Punto visado	Acimut	t	ΔX	ΔY	ΔZ	X	Y	Z	
Ref, Ea	168,7555								
b2	107,7125	10,829	24,728	-3,011	12,409	12,360	20,145	12,324	
b3	88,6381	10,825	26,699	4,816	12,405	14,331	27,972	12,320	
b4	82,9731	10,821	21,961	6,018	12,401	9,593	29,174	12,316	
b5	74,9679	5,718	17,295	7,174	7,298	4,927	30,330	7,213	
b6	65,0283	5,721	18,332	11,222	7,301	5,964	34,378	7,216	
b7	47,2313	5,701	21,361	23,305	7,281	8,993	46,461	7,196	
b8	36,4613	5,702	25,473	39,504	7,282	13,105	62,660	7,197	
b9	32,4447								
b10	32,4465	10,815	26,014	46,542	12,395	13,646	69,698	12,310	
b11	52,1650	5,670	18,702	17,471	7,250	6,334	40,627	7,165	
b12	111,8719	5,433	34,137	-6,441	7,013	21,769	16,715	6,928	



RADIACIÓN DESDE E. C.

Estadillo de campo								
Estación	Punto visado	L.Horiz.	L.Vertica l	Dist reducida (Dr)	Altura prisma (m)	Lh Orientada a NG (g)	Lh Orientada a NG (Rad)	Lv (Rad)
EC	Ref a A	0,0000	-	-	-	298,8845	-	-
Altura equipo: i(m)	C2	40,2830	78,7920	33,631	-	339,1675	5,3276	1,2377
	C13	111,4512	68,2212	20,272	-	10,3357	0,1624	1,0716
	C14	84,1310	71,8170	23,246	-	383,0155	6,0164	1,1281
1,520	C15	91,1938	75,9976	22,016	-	390,0783	6,1273	1,1938
	C16	89,0704	76,2958	22,354	-	387,9549	6,0940	1,1985
	C17	87,4910	76,5576	22,619	-	386,3755	6,0692	1,2026
	C18	85,4706	76,9035	22,992	-	384,3551	6,0374	1,2080
	C19	85,4710	85,2492	22,990	-	384,3555	6,0374	1,3391
	C20	87,5020	85,0434	22,616	-	386,3865	6,0693	1,3359
	C21	89,0194	84,8646	22,357	-	387,9039	6,0932	1,3331
	C22	91,1462	84,6988	22,026	-	390,0307	6,1266	1,3304
	C23	91,1598	89,6760	22,020	-	390,0443	6,1268	1,4086
	C24	89,0538	89,8174	22,349	-	387,9383	6,0937	1,4108
	C25	87,4825	89,9256	22,620	-	386,3670	6,0690	1,4125
	C26	85,4704	90,0476	22,994	-	384,3549	6,0374	1,4145
	C27	85,4704	93,5312	22,993	-	384,3549	6,0374	1,4692
	C28	91,1780	99,1488	22,021	-	390,0625	6,1271	1,5574
	C29	116,1442	88,5032	60,417	-	15,0287	0,2361	1,3902
	C30	112,4650	73,2132	24,638	-	11,3495	0,1783	1,1500
	C31	49,1484	84,5574	22,962	-	348,0329	5,4669	1,3282
	C32	65,5394	91,5566	17,539	-	364,4239	5,7244	1,4382
	Ref	0,0000	-	-	-	-	-	-
Error cierre V_Horizon		0,0000						

CALCULO de la Radiación									
						Ec	39,884	0,705	-0,177
Estadillo de calculo									
Punto visado	Acimut	t	ΔX	ΔY	ΔZ	X	Y	Z	
Ref									
C2	339,1675	11,637	-27,464	19,410	13,157	12,420	20,115	12,980	
C13	10,3357	11,053	3,277	20,005	12,573	43,161	20,710	12,396	
C14	383,0155	11,020	-6,129	22,424	12,540	33,755	23,129	12,363	
C15	390,0783	8,718	-3,417	21,749	10,238	36,467	22,454	10,061	
C16	387,9549	8,731	-4,204	21,955	10,251	35,680	22,660	10,074	
C17	386,3755	8,727	-4,804	22,103	10,247	35,080	22,808	10,070	
C18	384,3551	8,728	-5,594	22,301	10,248	34,290	23,006	10,071	
C19	384,3555	5,424	-5,593	22,299	6,944	34,291	23,004	6,767	
C20	386,3865	5,413	-4,799	22,101	6,933	35,085	22,806	6,756	
C21	387,9039	5,418	-4,222	21,955	6,938	35,662	22,660	6,761	
C22	390,0307	5,398	-3,435	21,756	6,918	36,449	22,461	6,741	
C23	390,0443	3,603	-3,430	21,751	5,123	36,454	22,456	4,946	
C24	387,9383	3,605	-4,209	21,949	5,125	35,675	22,654	4,948	
C25	386,3670	3,610	-4,807	22,103	5,130	35,077	22,808	4,953	
C26	384,3549	3,624	-5,594	22,303	5,144	34,290	23,008	4,967	
C27	384,3549	2,344	-5,594	22,302	3,864	34,290	23,007	3,687	
C28	390,0625	0,294	-3,423	21,753	1,814	36,461	22,458	1,637	
C29	15,0287	11,031	14,131	58,741	12,551	54,015	59,446	12,374	
C30	11,3495	11,025	4,369	24,248	12,545	44,253	24,953	12,368	
C31	348,0329	5,682	-16,730	15,727	7,202	23,154	16,432	7,025	
C32	364,4239	2,340	-9,299	14,871	3,860	30,585	15,576	3,683	



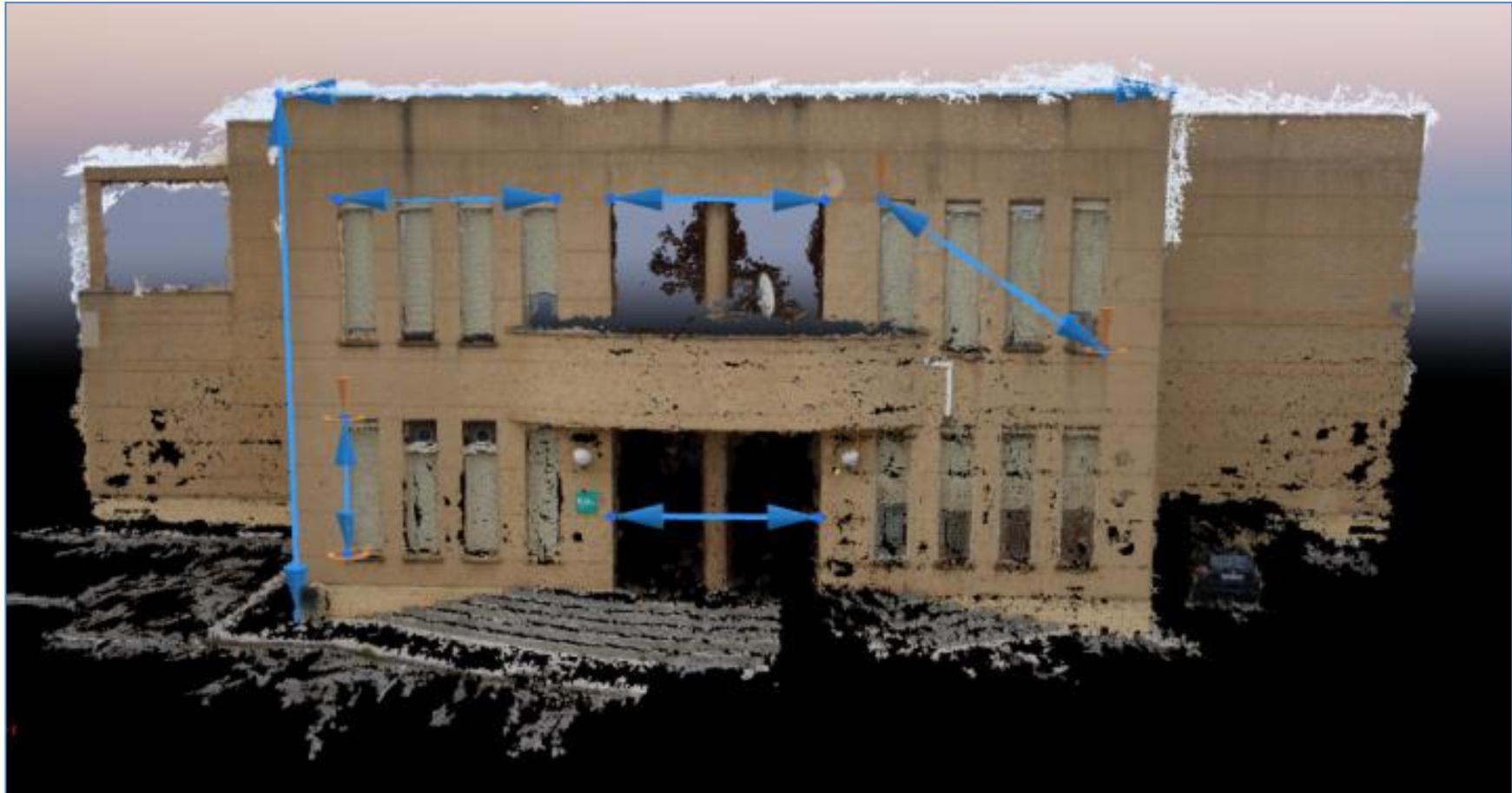
ANEXO IV. Modelos 3D



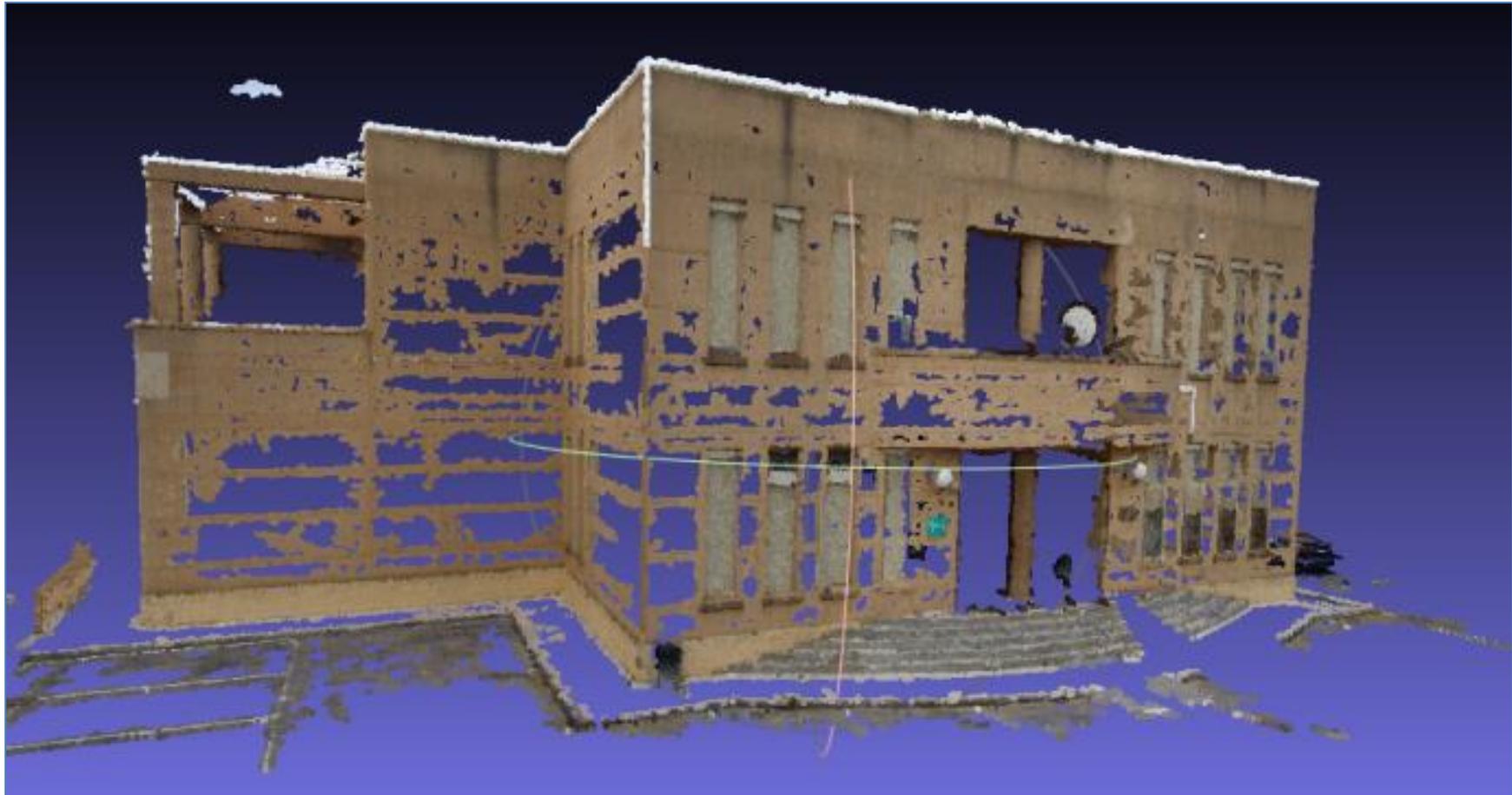
123D CATCH



PHOTOSCAN



PIX4D



VISUAL SFM

