



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

UNA APROXIMACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA A LA DINÁMICA BIM

Trabajo realizado por:

NAIETZA KATHERINA BORNEO BARRIOS

Dirigido por:

Francisco Javier Mora Serrano

Ignacio Valero López

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, Mayo de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Máster <

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

**UNA APROXIMACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA A LA
DINÁMICA BIM**

Autor

Naietza Katherina Borneo Barrios

Tutores

**Mora Serrano, Francisco Javier
Valero López, Ignacio**

Especialidad

Construcción

Departamento

Ingeniería Civil y Ambiental

Fecha

Mayo 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de aprender cada día de los retos que supone cada paso que damos y cada decisión que tomamos. Haber llegado hasta este punto no habría sido posible sin la confianza y la fortaleza que me han sido brindada.

Agradezco a mis familiares por ser un apoyo fundamental en cada avance, por creer en mí, ayudarme siempre cuando lo necesite y tener las palabras idóneas en los momentos precisos.

A mis tutores y compañeros por estar al tanto de mi evolución y brindarme su tiempo y conocimientos para lograr este trabajo de investigación.

Gracias.

RESUMEN

La reconstrucción fotográfica permite que la información del entorno físico quede registrada en una presentación definida. Su aplicación en la ingeniería civil se basa en que los usuarios puedan verse particularmente beneficiados de tal presentación sin necesidad de adicionarle tareas complejas. En este trabajo desarrollamos la reconstrucción digital en base a las fotografías para apoyar el progreso de la construcción de la obra, la supervisión y la documentación gráfica existente, para que el personal responsable tenga acceso rápido y comprensible a las actualizaciones y avances de obra, lo que les permitirá realizar una comparación de la situación actual de la obra y como se había previsto ejecutarla.

Esta actualización se puede lograr sobreponiendo el modelo generado por la reconstrucción digital fotográfica del entorno físico con la captura automática de la información a través de un móvil o cámara sobre los modelos BIM del proyecto. Dentro de este trabajo desarrollaremos como se pueden capturar las imágenes con mayor detalle para lograr un modelo 3D, así como también se puede visualizar e interactuar con la información de un modelo comprensible.

ABSTRACT

Photographic reconstruction allows the information of the physical environment to be registered in a defined presentation. Its application in civil engineering is based for users able to be particularly benefited from such a presentation without the need to add complex tasks. In this investigation we develop the digital reconstruction based on the photographs to support the progress of the construction of the work, the supervision and the existing graphic documentation, so that responsible staff has quick and comprehensible access to the updates and progress of the project, allowing them to make a comparison of the current work and how it had been planned to be execute it.

This update can be achieved superimposing the model generated by the digital photographic reconstruction of the physical environment with the automatic capture of the information across a mobile or chamber on the models BIM of the project. Inside this work we will develop how you can capture images in greater details to achieve a 3D model, as well as also it is possible to visualize and interact with the information of an understandable model.

INDICE

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INDICE	7
MOTIVACIÓN.....	14
INTRODUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO I.....	18
PLANTEAMIENTO	18
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3 METODOLOGÍA.....	22
1.3.1 TIPO DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.3.2 INVESTIGACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS	23
1.3.3 CASO DE USO Y FLUJO DE TRABAJO.....	25
CAPÍTULO II.....	27
MARCO METODOLÓGICO Y ESTADO DEL ARTE	27
2.1 CONTROL DE CALIDAD EN LAS OBRAS.....	29
2.1.1 ENTES QUE PARTICIPAN EN EL PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD 30	
2.2 DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA DE UN PROYECTO DE OBRA ...	31
2.2.1 CONTROL Y REGISTRO FOTOGRÁFICO	31
2.3 RECONSTRUCCIÓN DIGITAL	32
2.3.1 LUZ ESTRUCTURADA	34
2.3.2 TIEMPO DE VUELO	35

2.3.3	TRIANGULACIÓN.....	36
2.3.4	DE CONTACTO	37
2.3.5	FOTOGRAMETRÍA	38
2.4	TECNOLOGÍAS VICULADAS A LA RECONSTRUCCIÓN 3D.....	50
2.5	NUBE DE PUNTOS	51
2.5.1	DEFINICIÓN	51
	CAPÍTULO III.....	53
	DESARROLLO DE LA RECONSTRUCCIÓN DIGITAL 3D	53
3.1	HERRAMIENTAS UTILIZADAS	53
3.2	SELECCIÓN DE SOFTWARE PARA RECONSTRUCCIÓN FOTOGRÁFICA 54	
3.3	DESARROLLO DE MODELO DIGITAL.....	55
3.3.1	CALIBRACIÓN.....	55
3.4	DIGITALIZACIÓN DE LOS MODELOS	57
3.4.1	CARACTERÍSTICAS A TOMAR EN CUENTA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DIGITAL.....	57
3.4.2	ADQUISICIÓN DE DATOS	59
3.4.3	OBTENCIÓN DEL MODELO.....	61
3.4.4	CONVERSIÓN DEL FORMATO.....	65
	CAPÍTULO IV	67
	RESULTADOS	67
4.1	VALORES DE CALIBRACIÓN	67
4.2	MODELOS PREVIOS.....	68
4.2.1	CASO DE ESTUDIO GRUPO A.....	69
4.2.2	CASO DE ESTUDIO GRUPO B.....	73
4.2.3	CASO DE ESTUDIO GRUPO C.....	78
4.2.4	JUSTIFICACIÓN DE LOS MODELOS PREVIOS	87
4.3	MODELO DEL CASO DE USO	87
4.3.1	DIGITALIZACIÓN.....	88

4.3.2 RECONSTRUCCIÓN	89
4.3.3 DISCUSIÓN	94
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	96
5.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN. RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1: Metodología de desarrollo del trabajo final de master (TFM). (Elaboración propia)	24
Diagrama 2: Diagrama de flujo de trabajo del caso de uso. (Elaboración propia.)	25
Diagrama 3: Flujo de desarrollo que se desea obtener entre la situación actual de trabajo y la vinculación con la digitalización. (Elaboración Propia).....	29
Diagrama 4: Clasificación de la fotogrametría. (Elaboración Propia)	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dispositivos que pueden ser empleadas en la captura de imágenes para la reconstrucción digital. Fotogrametría. (Elaboración propia.)	42
Tabla 2: Diferentes tipos de dispositivos, láser y cámaras disponibles en el mercado para realizar reconstrucción digital. (4) (Elaboración propia)	50
Tabla 3: Software que se encuentran en la WEB para aplicación de la técnica de fotogrametría. (Elaboración propia)	51
Tabla 4: Equipos de trabajo utilizados para la captura de imágenes del modelo a reproducir digitalmente. (Elaboración Propia.)	54
Tabla 5: Selección de software para la elaboración del caso de uso según el objetivo a realizar. (Elaboración Propia.)	55
Tabla 6. Comparativa de formatos de archivos (15).	65
Tabla 7: Tabla de resultados del modelo de calibración con datos obtenidos del objeto real y del modelo de reconstrucción digital con los porcentajes de error. (Elaboración Propia)	68

Tabla 8: Comparación de datos reales del modelo 2 del primer grupo de pruebas vs. Objeto digital.(Elabración propia)	70
Tabla 9: Comparación de datos reales del modelo 3 del primer grupo de pruebas vs. Objeto digital.(Elaboración propia)	72
Tabla 10: Comparación de datos reales del modelo 1 del segundo grupo de pruebas vs. Objeto digital.(Elaboración propia)	74
Tabla 11: Comparación de datos reales del modelo 2 del segundo grupo de pruebas vs. Objeto digita calibrando uno de sus ejes. (Elaboración propia)	75
Tabla 12: Comparación de datos reales del modelo 3 del segundo grupo de pruebas vs. Objeto digita calibrando uno de sus ejes. (Elaboración propia)	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de un proceso de supervisión de obra para elaboración de reportes que permita transmitir los avances del proyecto. (Elaboración propia.)	18
Figura 2: Ejemplo del ciclo evolutivo de cómo se lleva a cabo esquemáticamente el proceso de ejecución de un proyecto dividido por etapas.(Elaboración propia.)	28
Figura 3: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de luz estructurada.....	35
Figura 4: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de tiempo de vuelo.	36
Figura 5: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de triangulación realizada con dispositivo láser.	37
Figura 6: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de contacto.....	37
Figura 7: Captura de imágenes para aplicar la técnica de la fotogrametría.(Elaboración propia.)	39
Figura 8: Ejemplo de distancia de captura en relación a la altura del objeto.(Elaboración propia).....	43
Figura 9: Ejemplo de posicionamiento del dispositivo a diferentes ángulos y alturas en función de la dimensión del objeto. A la izquierda en la figura superior la cámara se encuentra perpendicular al objeto, en la imagen inferior de la izquierda se posiciona la cámara 45° y a la derecha se aumenta el ángulo de inclinación.(Elaboración propia).....	44
Figura 10: Trayectoria de captura de imágenes a través de un dron para superficies planas, irregulares, mapas y cartografía.....	45
Figura 11: Recorrido para captura de imágenes a través de un dron de áreas construidas.....	46
Figura 12: Captura de imágenes a través de un dron de una edificación.....	46
Figura 13: Fotogrametría aplicada a la reconstrucción de grandes extensiones de terrenos realizada con altimetría (Drones).(Blog open opin, mapeado 3D, por su creador Ricardo.).....	49
Figura 14: Reconstrucción virtual de la torre-puerta de bejanque (guadalajara) realizada con láser. (Arqueología y patrimonio virtual, 2014 (13))	49

Figura 15: Ejemplo de un modelo de nube de puntos. (Elaboración Propia).....	52
Figura 16: Ejemplo de calibración que se utilizó para ajustar los valores de referencia extraídos del programa Recap para aplicar a los modelos a reconstruir. (Elaboración propia.)	56
Figura 20: Posicionamiento de herramienta de captura de imágenes con ayuda de trípode.....	58
Figura 21: Base con ángulos y circunferencias establecidas para la de captura de imágenes.(Elaboración propia).....	58
Figura 17: Grupo de objetos A utilizados para ensayos previos de la reproducción digital, (a) taza, (b) silla, (c) centro.(Elaboración propia).....	59
Figura 18:Grupo de objetos B para la reproducción digital, (a) pelota, (b) caja, (c) casa.(Elaboración propia).....	60
Figura 19: Grupo de objetos C, ejemplificación de fases de desarrollo de un proyecto.(Elaboración Propia)	61
Figura 22:Ejemplo de cómo se capturan las imágenes, estableciendo la circunferencia focal, los ángulos y las alturas de captura.	62
Figura 23: Registro e inicio de nuevo proyecto, Paso 1.	63
Figura 24: Ubicación de puntos de referencias, Paso 2.....	64
Figura 25: Formato de creación y características de procesamiento, Paso 2.1. ...	64
Figura 26: Guardado del proyecto, Paso 3.	65
Figura 27: Modelo de nube de puntos en Revit, formato exportado de Recap .rcm a formato .rcs .(Elaboración propia).....	66
Figura 28: Cubo de referencia para tomar las medidas de referencia de la Tabla 7.(Elaboración Propia).....	67
Figura 29: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 1 del grupo de pruebas A, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado.(Elaboración Propia)	69
Figura 30: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 2 del grupo de pruebas A, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado.(Elaboración Propia)	70
Figura 31: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 3 del grupo de pruebas A, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado.(Elaboración Propia)	72

Figura 32: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 1 del grupo de pruebas B, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado.(Elaboración Propia)	74
Figura 33: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 2 del grupo de pruebas B, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado.(Elaboración Propia)	75
Figura 34: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 3 del grupo de pruebas B, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado.(Elaboración Propia)	77
Figura 35: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha modelo de nube de puntos fase 1, generado con Recap 360.(Elaboración propia)	79
Figura 36: en la parte superior de la imagen, el modelo digital original, en la imagen inferior, la superposición de la nube de puntos sobre el modelo digital realizado en AutoCAD.(Elaboración Propia)	80
Figura 37: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha modelo de nube de puntos fase 2, generado con Recap 360.(Elaboración Propia)	80
Figura 38: Distancias del modelo digital de la Fase 2 tomada de AutoCAD.(Elaboración Propia)	81
Figura 39: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en AutoCAD. Alzado, vista de planta, lateral y frontal.(Elaboración Propia).....	81
Figura 40: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha el modelo de nube de puntos, fase 3, generado con Recap 360.(Elaboración Propia)	82
Figura 41: Distancias del modelo digital de la Fase 3 tomada de AutoCAD.(Elaboración Propia)	82
Figura 42: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en AutoCAD. Alzado, vista de planta, lateral y frontal.(Elaboración Propia).....	83
Figura 43: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha el modelo de nube de puntos, fase 4, generado con Recap 360.(Elaboración Propia)	84
Figura 44: Distancias del modelo digital de la Fase 4 tomada de AutoCAD.(Elaboración Propia)	84
Figura 45: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en Autocad. Alzado, vista de planta, lateral y frontal.(Elaboración Propia)	85
Figura 46: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha el modelo de nube de puntos, fase 5, generado con Recap 360.(Elaboración Propia)	85

Figura 47: Distancias del modelo digital de la Fase 5 tomada de AutoCAD. (Elaboración Propia).....	86
Figura 48: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en Autocad. Alzado, vista de planta, lateral y frontal.(Elaboración Propia)	86
Figura 49: La imagen superior representa la maqueta real, la imagen inferior representa la maqueta digitalizada en Revit.(Elaboración Propia)	89
Figura 50: Ejemplo de cómo se realizó la circunferencia focal, la ubicación del dispositivo de captura y su ángulo de inclinación.(Elaboración Propia)	90
Figura 51: A la izquierda el modelo del edificio A y B, y a la derecha el modelo del edificio C.(Elaboración Propia)	91
Figura 52: A la izquierda se muestra la imagen del modelo creado en Revit del edificio A y B, y a la derecha el modelo de nube de puntos reproducido con la técnica fotogramétrica.(Elaboración Propia)	91
Figura 53: Sobre posicionamiento del modelo de nube de puntos en el modelo Revit desde varias caras del edificio.....	92
Figura 54: La imagen superior muestra la imagen del modelo creado en Revit del edificio A y B, y la inferior el modelo de nube de puntos reproducido con la técnica fotogramétrica.	93
Figura 55: Sobre posicionamiento del modelo de nube de puntos en el modelo Revit desde varias caras del edificio.(Elaboración Propia).....	93
Figura 56: La imagen superior muestra la imagen del modelo creado en Revit del grupo completo del caso de uso, y la inferior el modelo de nube de puntos reproducido con la técnica fotogramétrica.(Elaboración Propia)	94
Figura 57: Sobre posicionamiento del modelo de nube de puntos en el modelo Revit desde varias caras del edificio.(Elaboración Propia).....	94

MOTIVACIÓN

El sector de la construcción durante muchos años ha llevado a cabo sus tareas mediante el diseño asistido por computadora (CAD) en planos 2D y secciones. Es de conocimiento general los avances que se han logrado en las investigaciones vinculadas con la tecnología en este sector, en las que muchas de sus iniciativas a pesar de haber sido respaldadas por el gremio constructivo, muy pocas veces han logrado su total implementación. (1)

Automatizar la información de la documentación proveniente de la supervisión es importante para los avances de una obra ya que esto apoya los logros y alcances de la empresa, pero también beneficia ya que agiliza la búsqueda de las fuentes de errores y defectos, así como a sus debidos responsables. El progreso adecuado ayuda a los trabajadores en la supervisión y a documentar el avance de una obra. (2)

En este contexto, buscamos una actualización rápida y sencilla del proyecto sin la intervención de factores ajenos que relentezcan este proceso, y además sacar provecho del material gráfico que se dispone en obra. Hoy en día las fotografías en una supervisión se toman de forma individual y con una base regular y objetiva, para almacenarlas junto con los proyectos de obra en una base de datos.

En consecuencia, y en búsqueda de posibles soluciones, se considera útil y de gran beneficio, darle una utilidad más a la recolección de imágenes fotográficas que se realiza desde hace décadas en las diferentes fases del proceso, ya que se convierte en un aporte tangible.

Por tanto, me veo motivada a hacer uso de la aplicación de técnicas de digitalización aunada a la documentación generada en base a las inspecciones que se realizan en una obra, orientando esta investigación al modelado de elementos 3D basado desde la captura inicial del objeto real hasta la generación y almacenamiento del modelo virtual, con la aplicación de nuevas técnicas que permiten la reconstrucción de elementos a partir de galerías de fotos.

INTRODUCCIÓN

A medida que se desarrolla la población, el entorno construido debe crecer conjuntamente para apoyar esta situación, creando ambientes y áreas que cubran las necesidades en las distintas actividades en las que se desenvuelven los individuos. Estos incrementos van acompañados de factores que afectan la economía y el medio ambiente. Dicho desarrollo construido, es básicamente artificial, por lo que se requiere de la intervención del hombre en sentido profesional y en la aplicación de procesos básicos, como plantear, crear y construir. (1)

Como secuencia de lo anterior, podemos decir que, en el entorno constructivo, el desarrollo de un proyecto, se lleva cabo por fases establecidas para su ejecución. Dichas fases representan el proceso de un ciclo evolutivo en la construcción para que se ejecute correctamente, desde la concepción hasta la disposición final del mismo.

Por tal razón, se requiere gestionar toda la información correspondiente a cada fase desde el inicio, lo que involucra mucho personal durante todo su desarrollo. El uso de la informatización trajo muchos cambios positivos con el CAD, y permitió agilizar el flujo de trabajo. Pero los avances no se detuvieron ahí, la digitalización se introdujo y con ella los desarrollos tecnológicos dieron un gran paso en el ámbito constructivo.

Este avance trae como consecuencia inmediata la necesidad de realizar la debida documentación en cada fase, por ejemplo, cuando se está en el inicio del proyecto se debe contar con material de información como son la memoria y los planos que dan paso a la planificación, luego a la ejecución y posteriormente al control y entrega. Es por esta razón que se requiere realizar estudios previos entre los que destaca el estudio de campo y los levantamientos topográficos e iniciar una recolección de archivos fotográficos digitales que permitirá documentar y apreciar los avances de lo que inició como una propuesta. De igual forma si se habla de la fase de marketing o de construcción, se verá la existencia de la documentación gráfica y en especial la de imágenes.

Por tal razón, es que podemos decir que las tareas profesionales dentro de la industria de la construcción requieren a menudo el acceso a la información

directamente sobre el sitio, esto permite a los usuarios que van a supervisar los proyectos situarse dentro del contexto del entorno físico en el cual trabajarán.

Partiendo de este hecho, y teniendo en cuenta que la documentación gráfica que puede existir en un proyecto es bastante amplia, esta investigación se centra en estudiar la reconstrucción geométrica de elementos en base a las imágenes fotográficas captadas en las diferentes fases del proyecto, con especial atención a la fase de ejecución. Además se busca determinar la funcionabilidad de un modelo creado a partir de la reconstrucción digital, que es una técnica que se remonta a varias décadas atrás con diversas aplicaciones, y que se basa en la recreación digital de elementos captados en fotos teniendo como resultado modelos tridimensionales (de nubes de puntos). Para ello el trabajo ha sido estructurando en cinco (5) Capítulos: Capítulo I. Planteamiento, Objetivos y Metodología. Capítulo II, presenta el tipo de investigación y al estado del arte. El Capítulo III conformado por el desarrollo de la técnica aplicada al modelo y casos de uso. El Capítulo IV, referido a los resultados obtenidos. Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones, resaltándose los aspectos más importantes y evidenciándose el logro de los objetivos, así como las recomendaciones de la autora.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando se está trabajando dentro del desarrollo de un proyecto existe una gran cantidad de personal involucrado, unos realizan las tareas desde la oficina y otros requieren trasladarse a la obra, es decir, todos se encuentran directamente relacionados con los avances del mismo, pero no involucrados en su totalidad de forma física.

De esta forma y para mantener al tanto a quienes no se encuentran en obra, se realizan documentaciones donde se reporta de forma escrita y gráfica los avances o inconvenientes que surjan, bien sea una obra nueva o existente, tomando en cuenta diversos factores como su estado actual, elementos estructurales, arquitectónicos, instalaciones, urbanismo y su desarrollo con respecto a la planificación.

En la Figura 1 se ejemplifica una de las muchas formas que se puede emplear para realizar esta acción de reportar los avances de obra.



Figura 1: Modelo de un proceso de supervisión de obra para elaboración de reportes que permita transmitir los avances del proyecto. (Elaboración propia.)

En el diagrama anterior se describe un proceso de cómo generar un reporte sustentado con documentación gráfica durante la supervisión de una obra que se puede describir de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Captura de imágenes: Se puede realizar con cualquier dispositivo fotográfico. En el cual se toma en cuenta los elementos que se desean resaltar o detallar y una vista del emplazamiento. Que posteriormente estas imágenes han de ser seleccionadas para sustentar la información escrita que se difundirá. Las especificaciones de como tomar las imágenes va en función de los requerimientos de quien las necesite.
2. Anotaciones: durante el proceso de supervisión se deben tomar notas de todos los detalles y apreciaciones obtenidas por el encargado de realizar esta acción, para luego realizar los reportes en función de lo que se haya observado.
3. Elaboración de Informe: en este documento se transcriben todas las apreciaciones obtenidas al momento de la supervisión, previamente realizado en el paso anterior y se plasman los aspectos más relevantes observados, así como algunas recomendaciones, incidencias o cambios importantes. Todo esto se acompaña con las imágenes que sustentan la información escrita y se avala con las firmas correspondientes de quienes hayan presenciado la supervisión quedando conformes y notificados de todo.
4. Difusión de archivos: el documento generado en el paso anterior debe difundirse a los supervisores y encargados para mantener una retroalimentación de la información que se necesita para actualizar los avances del proyecto.

El proceso antes descrito referencia una manera de transmitir la información de obra a la oficina. Sabiendo esto, el resultado de una supervisión de obra es un reporte (documento físico escrito) sustentado con documentación fotográfica, el cual permite difundir la información del estado actual de la obra y lo que se está ejecutando en ella a quienes trabajan en el proyecto desde la oficina. Todo este procedimiento permite de alguna forma tener actualizado el proyecto en casi todas las disciplinas que interactúan dentro del mismo.

Al respecto, en muchos casos surgen algunos inconvenientes que se deben a diferentes factores, puede por ejemplo corresponder a una transmisión de información escueta de los representantes o supervisores de obra, sobre los avances de planificación ya que ellos son los responsables de mantener actualizados al resto del equipo de trabajo en cuanto al estado vigente del proyecto. Pero también puede ocurrir que, al momento de la transmisión de la información, la misma no sea interpretada tal como pretendía hacerlo su emisor.

A tal efecto, lo que se busca es una actualización más rápida y eficiente de lo que se aprecia en obra, para establecer visualmente comparaciones y apreciar los avances de una manera gráfica y representativa en relación de cómo se está ejecutando actualmente el modelo en el cual se basa todo el proyecto, con respecto a cómo se realiza esta actualización hoy en día. Lo que permitirá visualizar errores constructivos de una forma más clara y definida, mejorar la toma de decisiones que optimicen los tiempos de ejecución, la calidad de los procesos y evitar grandes pérdidas económicas.

Con este propósito, se pueden aprovechar los avances e investigaciones que se han puesto en práctica en los últimos años en el sector de la construcción. Dos ejemplos claros son:

- a. La metodología de trabajo BIM (Building information modeling), la cual se basa en la gestión de información que permite el acceso a una amplia variedad de usuarios.
- b. Los software de diseño que han dado pasos agigantados de elaboración de planos y secciones 2D a 3D.

En relación a lo antes citado es lógico plantear una integración entre la información (datos y documentos) obtenida de un proceso de supervisión y la nueva metodología de trabajo en la cual se integran todas las especialidades que llevan la puesta en marcha del proyecto, presentando una nueva forma de mantener actualizado los modelos virtuales con técnicas de reconstrucción digital en la construcción especialmente en fases de ejecución de obra, para cotejar la información del estado actual de la obra con respecto a lo que debería ser.

De acuerdo a los razonamientos que se han venido realizando, surgen requerimientos que dan lugar a una serie de interrogantes que cuestionan la resolución de la situación planteada:

1. ¿Cómo se puede realizar en el presente estudio un análisis comparativo entre el modelo digital de la construcción y un modelo de reconstrucción digital en superficies 3D?
2. ¿Cómo se llevan a cabo las actualizaciones digitales en los modelos de un proyecto durante su proceso de ejecución?
3. ¿Cómo saber si el modelo generado por reconstrucción digital se asemeja y es compatible con el modelo digital original?
4. ¿Cómo se puede obtener la viabilidad de este trabajo de investigación?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Por tanto, se formula el objetivo general de este trabajo como sigue:

Estudio de viabilidad de la reconstrucción de elementos 3D a partir de técnicas fotogramétricas para la actualización de modelos BIM específicamente en la fase de ejecución de los proyectos

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Teniendo el objetivo general definido se puede desglosar en los siguientes objetivos específicos:

1. Revisión del estado de arte de la fotogrametría en la actualidad (literatura), y cuál es su utilidad para generar objetos 3D.
2. Estudio y selección de herramientas más adecuadas para la generación de objetos 3D a partir de las fotos.
3. Evaluar el procedimiento de la reconstrucción de un modelo digital 3D en base a la técnica fotogramétrica que permita la actualización de los emplazamientos y elementos existentes en obra que permita la interacción con la herramienta seleccionada
4. Establecer un caso de uso para la aplicación del estudio revisado, creando una maqueta real, en la que se desarrolle un modelo digital, a partir de la cual se aplica el procedimiento desarrollado, para establecer diferencias entre ambos modelos.
5. Determinar si el modelo de reconstrucción digital 3D en las diferentes fases del proyecto es viable para su posterior uso.

1.3 METODOLOGÍA

1.3.1 TIPO DE LA INVESTIGACIÓN

Con el planteamiento del problema previamente definido, los objetivos de esta investigación se formularon en base al desarrollo de cuatro preguntas que orientan las necesidades básicas a cubrir para la resolución del trabajo. Esta

sección busca definir el enfoque de este trabajo de investigación, encaminado para indagar y dar respuestas a cada objetivo específico. Para desarrollarlo, optamos por el proceso de método inductivo, de acuerdo con la definición de Hernández, Fernández y Baptista (2003):

“El proceso de Método inductivo: Se analizan solo casos particulares, cuyos resultados son tomados para extraer conclusiones de carácter general. A partir de las observaciones sistemáticas de la realidad se descubre la generalización de un hecho y una teoría. Se emplea la observación y la experimentación para llegar a las generalidades de hechos que se repiten una y otra vez”.

Ante la definición planteada, se establece una investigación particular específicamente en la fase de ejecución de una obra, que para ser llevada a cabo se simula un escenario ficticio realizado en base a una maqueta. Esta metodología de investigación permita realizar un estudio previo del estado del arte y la situación actual del tema a investigar, además de estudiar el diseño y el muestreo para la recolección de datos.

Significa entonces que la finalidad de desarrollar este tema de investigación es analizar las ventajas de aplicar la técnica fotogramétrica para la reconstrucción de imágenes tomadas en obra para, generar un modelo virtual 3D, y una vez obtenido, poder cotejar los resultados y ver si corresponden adecuadamente con el proyecto original.

1.3.2 INVESTIGACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Conocer todos los eslabones y los procedimientos utilizados, es lo que permite saber a detalle cómo se puede ejecutar una actividad (en este caso, la reconstrucción digital a partir del procesamiento de imágenes) y cuáles son las ventajas e inconvenientes que se pueden encontrar con la aplicación de estos métodos. Explorar el estado de arte en el cual se encuentra el tema a tratar, ¿cómo es su uso y aplicación actual?, ¿qué tecnologías se están poniendo en práctica? y ¿cómo se puede utilizar a futuro?, es lo que define el hilo conductor de la investigación.

Para dar respuesta a ello se dispone de una serie herramientas que permiten llevar a cabo el desarrollo de la investigación de manera que:

- Se establezca un flujo de trabajo.
- Se pueda aplicar a un modelo en particular.
- Se registren las limitaciones que vayan saliendo en el transcurso de la búsqueda y aplicación.
- Se obtenga una valoración de los recursos empleados según el alcance logrado.

En el siguiente diagrama se observa de forma esquemática la metodología que se implementó en este trabajo de investigación.

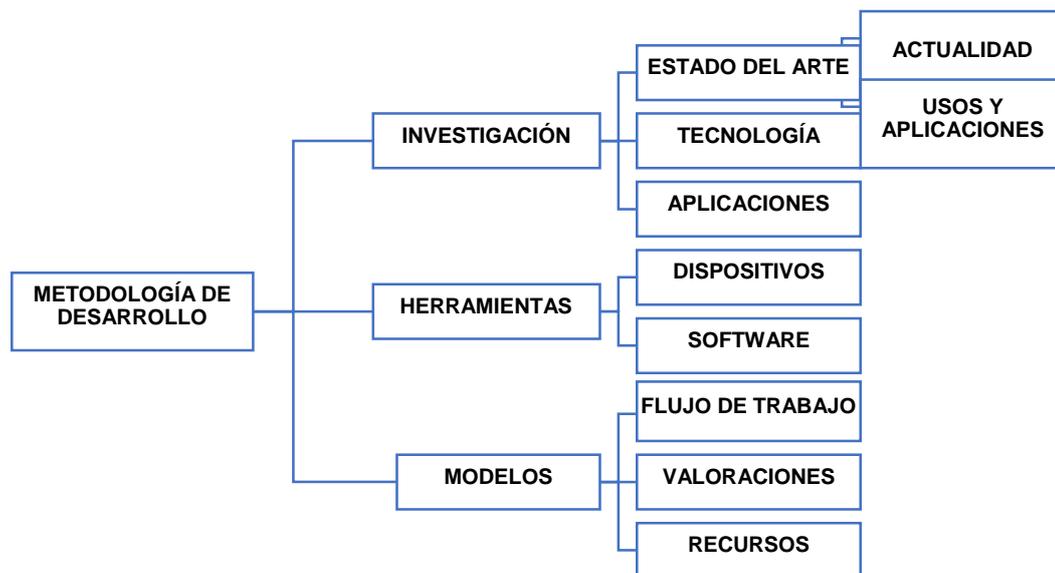


Diagrama 1: Metodología de desarrollo del trabajo final de master (TFM). (Elaboración propia)

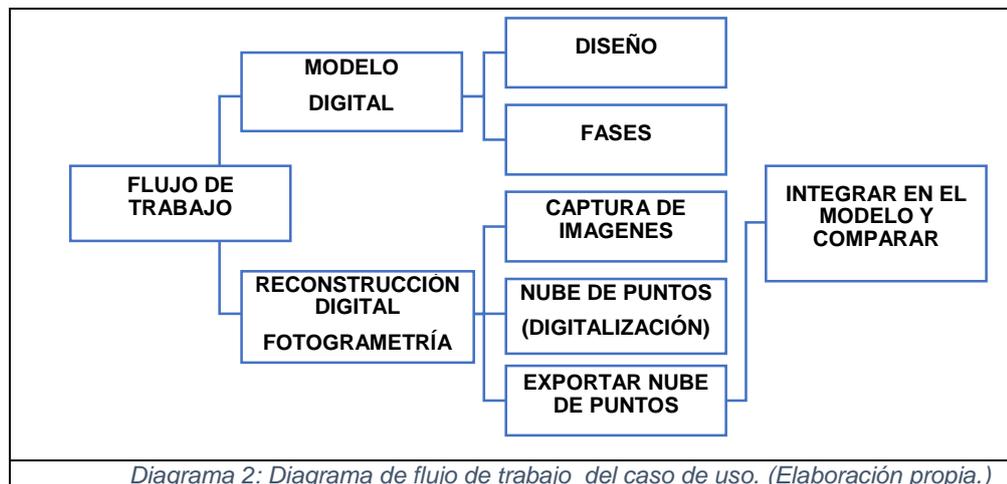
En el diagrama anterior se establece un flujo de desarrollo de cómo se llevará a cabo este proceso investigativo. El diagrama muestra que el procedimiento se encuentra comprendido entre las siguientes etapas:

- Investigación: en esta fase se realiza una búsqueda de toda la información relacionada con el tema a tratar en cuanto a la reconstrucción digital, el estado actual de los avances y desarrollos de técnicas aplicadas a la fotogrametría. También tomando en cuenta como se está poniendo en práctica actualmente esta técnica, su uso y futuras aplicaciones.
- Herramientas: una vez conocido el estado actual del tema, conjunto de técnicas y procesos, se valoran los dispositivos de los cuales se hacen uso para llevar a cabo los procesos experimentales y software disponibles en el mercado de fácil acceso y a bajo costo.

- Modelos: se establece un flujo de trabajo, tanto para la creación del modelo digital como para la integración en BIM que permite elaborar prototipos digitales y establecer valoraciones en cuanto a los resultados obtenidos.

1.3.3 CASO DE USO Y FLUJO DE TRABAJO

Una vez obtenido los conceptos y procedimientos en la etapa de investigación y habiendo establecido el método de desarrollo de investigación del trabajo, se realizan pruebas previas para la interacción con las herramientas seleccionadas y posteriormente se establece un caso de uso donde se realiza la digitalización, generando un modelo de reconstrucción digital 3D, en el cual se simulan las fases de diseño de un proyecto convencional para verificar la funcionalidad con respecto al modelo en digital basado en planos originales.



El caso de uso para esta investigación se llevará a cabo sobre una maqueta de tres edificios modelados a escala, este caso de uso, simula elementos constructivos representados por edificios rectangulares colocados a unas distancias establecidas entre si previamente, situados sobre una base que representa el terreno real de una obra, donde se aplicarán las técnicas escogidas y así poder aplicar el flujo de trabajo.

El Diagrama 2 es una representación esquemática de cómo se llevará a cabo el desarrollo de este estudio, el cual se encuentra comprendido en dos fases:

- La digitalización: es la fase que todo proyecto tiene inicialmente para poder ejecutarse, creada por arquitectos, proyectistas y calculistas representada

por planos, y material gráfico. En ella se crean los diseños y se estructuran las fases de ejecución.

- La reconstrucción: en esta fase se encuentra recolección de material fotográfico que en nuestro caso realizaremos elaborando varios modelos de prueba para establecer parámetros de aplicación lógicos y consecuentes que ayuden en la creación de modelos 3D y su posible utilidad para la actualización de modelos BIM.

Previamente a este caso de uso se realizarán unas pruebas de operatividad e integración con la tecnología a emplear, para poder definir los parámetros necesarios de desarrollo que permitan la reconstrucción digital de los elementos y así poder obtener modelos con definiciones claras y precisas.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO Y ESTADO DEL ARTE

Este capítulo contiene la literatura correspondiente a los de antecedentes para los temas cubiertos en este trabajo de investigación, cuyos dominios temáticos son de Ingeniería y Construcción, y Ciencias de la Computación, que aportan componentes importantes para reforzar los conocimientos y ubicarse en el estado del arte de ambos.

El objetivo de este capítulo, es filtrar la literatura de investigación encontrada en un conjunto de preguntas expuestas en el planteamiento del problema, que generan ciertas lagunas en el conocimiento y desarrollo de este trabajo, por lo que la bibliografía empleada nos sirve como una guía de avance y seguimiento para aclarar dudas.

En primer lugar, en este apartado se revisa brevemente como se llevan a cabo los controles de calidad en obra ya que, para la realización de los modelos de reconstrucción digital, la muestra proviene como resultado de una supervisión que suele estar acompañada de material fotográfico. Por tal razón se explican los factores y consideraciones propias de llevar a cabo esta tarea. Lo siguiente será una revisión de la técnica a emplear para la reconstrucción fotográfica que se realizará con la técnica fotogramétrica, y con especial aplicación al uso de cámara fotográfica ya que es donde se centrará nuestro trabajo de investigación.

Por lo tanto, después de la revisión de la literatura y de la creación de los modelos 3D, pasamos al estudio y utilidad de la nube de puntos como resultados de la reconstrucción digital.

Queda evidenciado en las metodologías empleadas actualmente favorecen el progreso y rendimiento de las obras (3). Hecha la consideración anterior, y sabiendo que la ejecución de un proyecto se lleva a cabo por etapas las cuales se desarrollan desde su inicio hasta su disposición final como se muestra en la Figura 2: Ejemplo del ciclo evolutivo de cómo se lleva a cabo esquemáticamente el proceso de ejecución de un proyecto dividido por etapas.(Elaboración propia.), es notable que muchas empresas de desarrollo de tecnología informática (IT) hayan creado software que permitan una integración completa y una buena interfase entre

todas las especialidades que forman parte del proyecto, orientando la ejecución de los proyectos a ser desarrolladas bajo la metodología BIM.

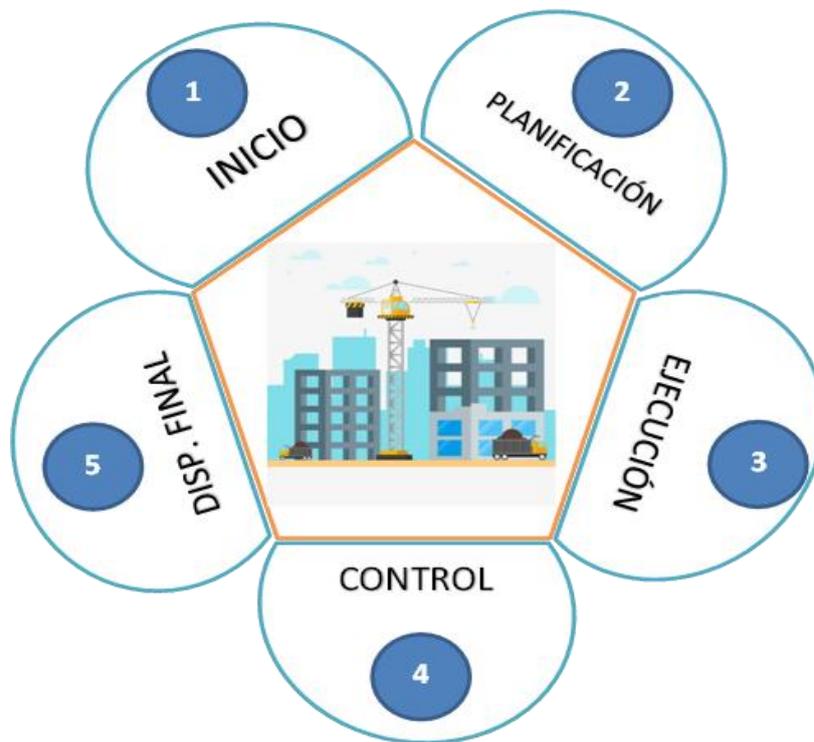
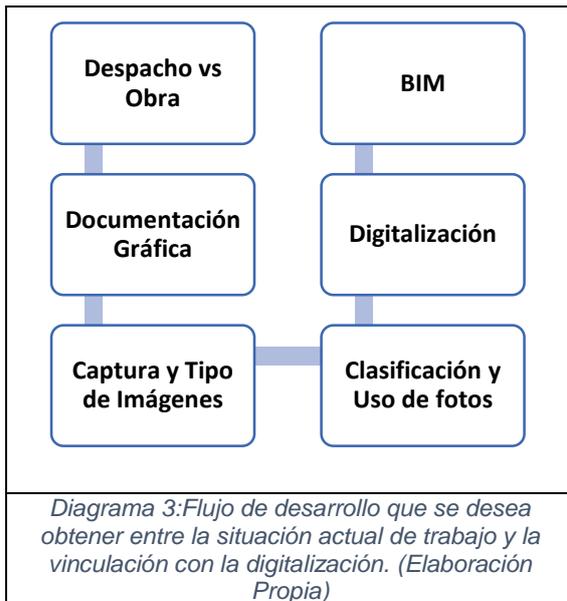


Figura 2: Ejemplo del ciclo evolutivo de cómo se lleva a cabo esquemáticamente el proceso de ejecución de un proyecto dividido por etapas. (Elaboración propia.)

Teniendo en cuenta la figura anterior que muestra el ciclo evolutivo de un proyecto, se puede apreciar la importancia de vincular a estas etapas de desarrollo las nuevas metodologías de gestión de proyecto, teniendo en cuenta que en la actualidad solo se pueden ver aplicadas en algunas de las fases, esperando su futura aplicación en la totalidad del proceso.

En función de las necesidades que presente cada etapa se podrán aplicar algunos software que lleven a cabo la tarea de una forma más eficiente. En el caso particular de este trabajo se enfocó la investigación en la etapa 3 y 4 de ejecución y control respectivamente, correspondiente a Figura 2, que se encuentran directamente relacionado con la interacción oficina vs. obra.



En definitiva, las fases en las que deseamos enfocarnos para mejorar el flujo de trabajo teniendo en cuenta el material que podemos disponer de cada una de ellas, y adicionalmente aplicamos la metodología de trabajo establecida en este proyecto de investigación, podremos lograr un vínculo que permita fusionar dicha metodología con la forma en la que se está llevando a cabo el trabajo actualmente utilizando las nuevas

propuestas tecnológicas que existen en el mercado podemos tener un resultado como se puede apreciar en el Diagrama 3.

2.1 CONTROL DE CALIDAD EN LAS OBRAS

Una inspección de obra es un examen visual que se realiza de forma cuidadosa, a modo de comprobación y comparación entre lo que se está ejecutando y lo que se planificó, tal y como se encuentra plasmado en los planos. (4)

Por tal razón, el control de calidad de una obra se hace con la finalidad de garantizar una correcta ejecución conforme con las normas técnicas, especificaciones, planos y demás documentos que conforman o constituyen el proyecto original. Esta sistemática se apoya principalmente en los controles de calidad, tanto de los materiales que se utilizan en obra, los equipos y servicios que se adquieren para lograr el correcto funcionamiento de la misma, como de los procesos constructivos de los elementos que conforman la estructura.

De igual forma y sabiendo la importancia que representa llevar a cabo unos sistemas de control en cualquier fase de un proyecto, es evidente la necesidad de guardar registros digitales de esas revisiones periódicas que permiten una prueba visual al momento de corroborar cualquier información escrita en relación a los procesos constructivos.

2.1.1 ENTES QUE PARTICIPAN EN EL PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD

La estructura organizacional del funcionamiento de una obra o proyecto varían de acuerdo a varios factores y en cómo se hayan establecido los rangos de mando. En este apartado interesa resaltar quienes participan o pueden participar como ejecutores del proceso de inspección de una obra que se rige por una relación directa entre dos partes: el propietario y el constructor o contratista. Dicha relación se establece desde un acuerdo verbal, hasta un documento formal donde se establecen acuerdos previos. (4)

Dentro de los miembros que pueden ejecutar la acción de supervisar una actividad específica o general durante el proceso de ejecución en una obra y capturar estas acciones en documentación digital, se encuentran los siguientes:

- El contratista
- Director de obra
- Inspector de obra
- Representantes técnicos
- Jefe o encargado de obra

2.1.1.1 Objetivo de los controles de calidad

La parte fundamental al realizar un control de obra es la verificación de la correcta ejecución de la misma. Llevar a cabo un seguimiento riguroso de los procesos de ejecución es de gran interés para todos los entes participantes de un proyecto (propietario, proyectistas, arquitectos, contratistas), ya que esto conlleva la seguridad de los trabajadores y la calidad que se desea tener en un producto final.

Todo este proceso se ve reflejado en quienes ejecuten e intervengan en las inspecciones de obra, ya que no sólo evalúan los procesos constructivos, sino que intervienen en aspectos económicos, técnicos, legales y sociales que comprende un proyecto.

2.2 DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA DE UN PROYECTO DE OBRA

2.2.1 CONTROL Y REGISTRO FOTOGRÁFICO

Uno de los procesos de documentación de forma rápida es la fotografía. Su uso se debe a que aporta mayor definición a la hora de analizar detalles rigurosos, razón por la cual la captura fotográfica se lleva a cabo con el fin de mostrar a los ingenieros, jefes de proyectos, supervisores, inversores o clientes el progreso de la obra y para mantener a los equipos de las diferentes disciplinas que integran el proyecto, informados en el área según lo que requiera mayor interés. (5)

Otras características que se pueden mencionar en relación al registro fotográfico son:

- Las fotografías pueden tomarse de forma periódica o continua, esto dependerá del uso para el cuál se hayan establecido, o la función que este registro fotográfico vaya a cumplir.
- En función al tipo de proyecto y la función que vaya a cumplir el registro fotográfico cada supervisor establecerá criterios y especificaciones según la empresa.
- Las fotografías por lo general son asignadas a la especialidad que se esté supervisando, sea estructura, arquitectura, instalaciones, entre otros.
- La información se encuentra en formato digital, y debe estar registrada en una base de datos debidamente nombradas, datadas y ordenadas.
- Algunos registros están directamente relacionados con otros, como es el caso de las fotografías de progreso que están vinculadas con las fotografías previa a la construcción.

2.2.1.1 Clasificación de las Imágenes

La realización de un seguimiento de obra va en función a los plazos establecidos al inicio del proyecto, los cuales pueden realizarse diario, semanal o mensualmente, es necesario tener registros fotográficos de todos los avances de actividades en la planificación del proyecto, ya que son bastante representativos y se pueden enlazar a vínculos, sea en hojas de cálculos o directamente al proyecto

BIM. La facilidad de tener los registros fotográficos es que, al estar los archivos guardados por filtros, se agiliza la gestión y búsqueda en oficina.

Las imágenes pueden clasificarse según el tipo de proyecto al que se quiera referir y a la función que cumplan dentro del mismo (5):

- Según el tipo de proyecto:
 - Obra nueva
 - Remodelaciones
 - Reparaciones
 - Inspecciones

- Según su función:
 - Previas a la construcción
 - Progreso (programadas regularmente)
 - Fotografías puntuales
 - Culminación de obra
 - Marketing
 - Especialidad (Mecánica, Estructura, Instalaciones)
 - Fotografías aéreas

2.2.1.2 Áreas que se benefician del registro fotográfico

Realizar el trabajo de una forma coordinada y tener la información disponible es esencial para que el proyecto pueda tener un desarrollo continuo y llevarse a cabo por los múltiples usuarios que participan, aunque sean disciplinas diferentes. Este proceso puede definirse como un sistema multidisciplinario y multiusuario, en el cual pueden trabajar de forma simultánea dos o más profesionales con la certeza de que la información esté actualizada constantemente y disponible para quien la necesite.

2.3 RECONSTRUCCIÓN DIGITAL

Es un proceso mediante el cual, utilizando la información que, obtenida de un entorno real u objeto, y mediante el uso de un dispositivo y un software, podemos modelar en tres dimensiones cualquier región anatómica con patologías diversas. Una vez que el objeto o entorno es digitalizado, el modelo reconstruido se puede

editar o redimensionar a través del software de diseño 3D, y una vez preparado este modelo se puede exportar. En algunos casos se exporta el documento para ser impreso y crear un objeto real o si se desea incluir en otros software para creación de modelos BIM.

A continuación, se describen algunos aspectos que hay que tomar en cuenta previo al momento en que se decide iniciar una reconstrucción digital (6):

- Campo de desarrollo

Es importante saber con qué fin u objetivo vamos a llevar a cabo la reconstrucción digital. Actualmente son muchos los campos que están aplicando esta técnica, como el sector de la ingeniería, la geología, la medicina, video juegos entre otros. Ya que en función de las superficies y relieves a reconstruir serán más útiles unas herramientas de capturas que otras. También es importante destacar si el tratamiento que se va a dar es casero, estudiantil o profesional.

- Tipo de objeto

En función del objeto que se desee reproducir digitalmente se debe escoger la técnica y la herramienta de captura ya que no todos los dispositivos son útiles para cubrir todas las áreas de aplicación. Por lo que tomar en cuenta el tamaño del objeto o elemento a reproducir es importante para la selección tanto de la técnica como de la herramienta. Se debe definir en donde se llevará a cabo la reconstrucción, si será en instalaciones especializadas, en áreas específicas de trabajo o en casa.

- Superficie

Es un aspecto muy importante porque define la precisión con la que debemos trabajar para obtener una reproducción casi exacta. Ya que la resolución de la herramienta de captura pueda ser capaz de captar el detalle con precisión que una vez reconstruido digitalmente sea suficiente para el proyecto.

- Distancias

La mayoría de las técnicas pueden ser aplicadas a distintas muestras y poblaciones. Pero en general mientras más grande sea el objeto o el elemento a reconstruir la técnica y la herramienta debe ser de alta gama y calidad que permita trabajar a grandes distancias sin afectar la definición real del elemento y reproducir excelentes resultados.

Existen una serie de técnicas que puede ser empleadas para realizar la reconstrucción digital que serán explicadas en la siguiente sección (6):

2.3.1 LUZ ESTRUCTURADA

Dentro del campo de la Visión tridimensional, existen un gran número de técnicas que hoy son empleadas con éxito en numerosas aplicaciones industriales. Entre todas ellas, se encuentra lo que se conoce como la Luz Estructurada. Este tipo de sistema se caracteriza por ser un método directo y activo. este sistema emplea algún sistema generador de luz.

Los sistemas de luz estructurada se basan en estudiar la deformación que sufre un patrón de luz al ser interseccionado por cualquier objeto. Este es el problema principal de este tipo de herramientas, ya que se necesita un tipo de luz concentrada en un punto, en el cual no valdría como sistema de iluminación, cualquiera de los sistemas normales que se emplean actualmente, como bombillas, fluorescentes, etc., ya que, están compuestos por ondas de diferentes frecuencias provocando que el haz se difumine por todo el entorno.

Una vez que ya se conoce el tipo de luz que se va a emplear, será necesario elegir un patrón adecuado. Las diferentes soluciones van desde la utilización de puntos, hasta rejillas con láseres de diferentes colores. Por supuesto, además del patrón de luz, es necesario tener una cámara que recoja todas las imágenes de la deformación del plano láser. La posición de la cámara en el conjunto deberá ser aquella, que permita obtener, tanto la mejor resolución como evitar que existan zonas oscuras, es decir, que no existan zonas del objeto que no sean iluminadas por el láser. (7)

Esta técnica se puede llevar a cabo con cámara digitales siempre y cuando tengan incluidas laser interno o con herramientas de tecnología láser como se muestra en la Figura 3.

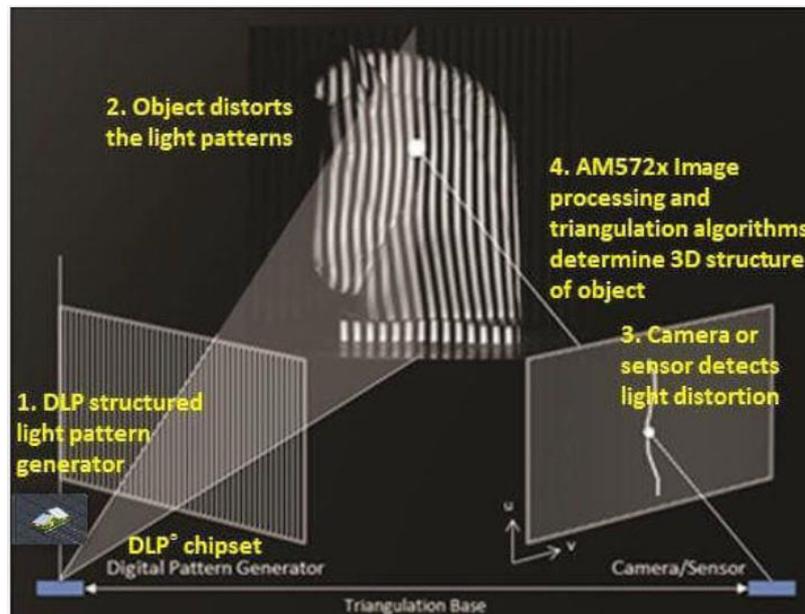


Figura 3: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de luz estructurada.

Fuente: Max Von Übel (6)

2.3.2 TIEMPO DE VUELO

Es una técnica en la que el dispositivo envía un haz de láser a la escena y mide el tiempo que tarda en volver. Solo sirve para objetos que reflejen en todas las direcciones, no sirven objetos negros, especulares, transparentes. (8)

El tiempo requerido para un viaje de ida y vuelta permite estimar la distancia recorrida por el rayo de luz. Sabiendo que un rayo de sol llega a la Tierra en solo 8 minutos y 17 segundos, te puedes hacer una idea de cómo de precisos deben ser los sensores de estos dispositivos para que funcione. (6)

Sin embargo, incluso los escáneres de tiempo de vuelo más potentes tienen defectos, las diferencias de temperatura, humedad y otros factores afectan la velocidad de la luz y dificultan la capacidad de la herramienta de captura, para medir con precisión el tiempo requerido para un viaje de ida y vuelta.

En consecuencia, su grado de precisión es bastante bajo, en el rango de centímetros. Se utilizan principalmente para captar grandes estructuras como edificios. Al igual que sucede con otros métodos, no es posible crear mallas fiables

con tan solo un repaso. Los dispositivos de tiempo de vuelo que usan rayos láser no deben usarse para escanear personas o animales. (6)

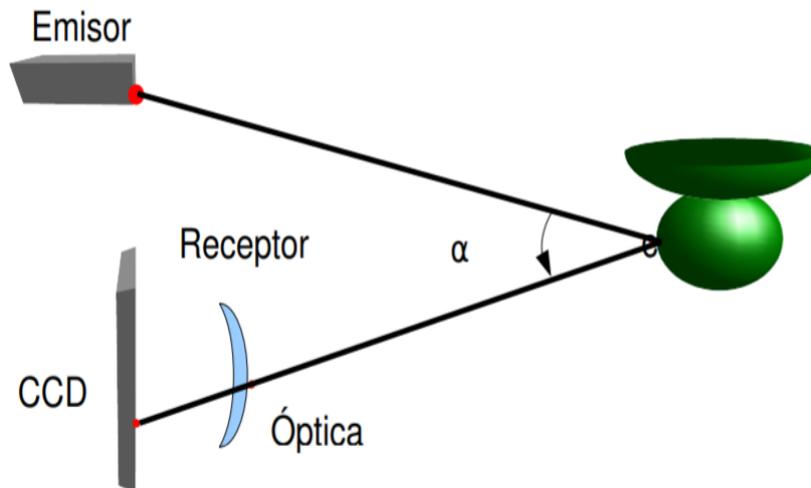


Figura 4: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de tiempo de vuelo.
Fuente: J.C. Torres (8)

2.3.3 TRIANGULACIÓN

Esta técnica es similar a la técnica fotogramétrica y luz estructurada, ya que utilizan el mismo principio geométrico básico para determinar la ubicación de un punto en el espacio.

El dispositivo proyecta un rayo láser sobre el objeto y una cámara registra en el lugar donde el láser contenido dentro del dispositivo entra en contacto con el objeto. Como se conocen los ángulos y las medidas del láser y la cámara, el punto (o línea) láser se puede ubicar con precisión. Este tipo técnica es conocido por su precisión. Su resolución oscila en décimas de micrómetro. No obstante, su alcance está limitado a unos pocos metros. (6)

El láser devuelve puntos, por lo que es necesario generar una superficie (normalmente una malla de triángulos, usando os puntos como vértices).

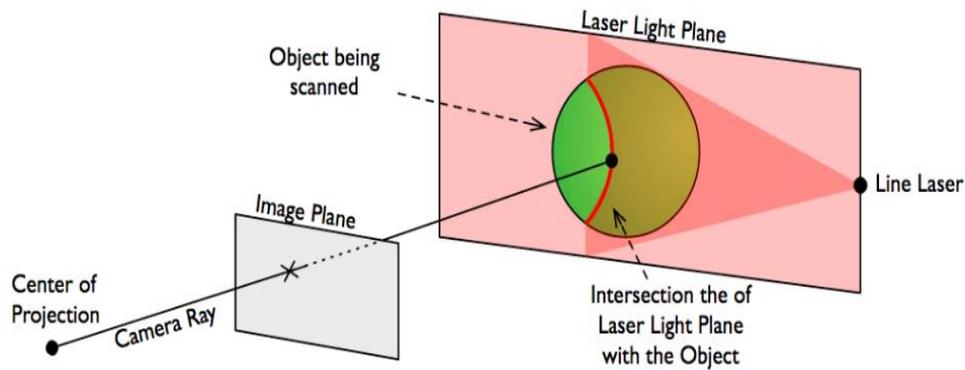


Figura 5: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de triangulación realizada con dispositivo láser.
Fuente: Max Von Übel (6)

2.3.4 DE CONTACTO

La técnica de reconstrucción 3D por contacto, el dispositivo toca físicamente el objeto que está colocado sobre una superficie o fijado a una especie de plataforma que lo sujeta. Por lo general, se trata de un proceso lento, ya que la más mínima vibración puede distorsionar el escaneo. Aunque esta reproducción digital 3D producen resultados precisos utilizados para el control de calidad en ingeniería, la sonda táctil puede modificar o incluso dañar los objetos escaneados. Por este motivo, no se utilizan para la conservación del patrimonio cultural. (6)

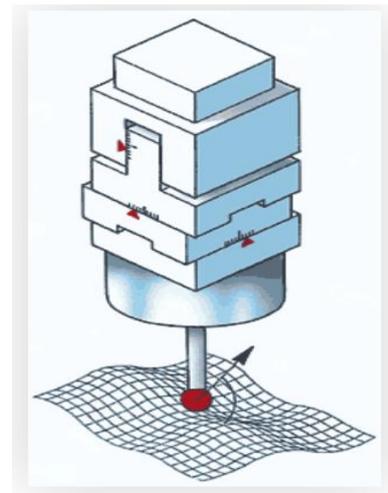


Figura 6: Ejemplo de cómo se realiza la reconstrucción digital por medio de la técnica de contacto.
Fuente: Max Von Übel (6)

2.3.5 FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría tiene sus inicios hace muchos años, pero alcanzó gran popularidad en el siglo XVIII basando sus raíces en la óptica. Fue una de las primeras ciencias que tuvo un desarrollo práctico y cuyo aporte es fundamental, tanto en la captura de imágenes, como en su posterior reconstrucción. Fue de gran utilidad para los artistas, pintores y escultores de la época ya que utilizaban esta técnica para recrear sus obras de forma manual.

Basándose en métodos y modelos matemáticos, esta técnica logró dar un avance importante en lo que se realizaba a lápiz y papel con la elaboración de alzados de objetos utilizando la perspectiva. Su desarrollo estimuló su posterior aplicación en la producción de la base cartográfica, dando inicio a su uso en levantamiento de fachadas arquitectónicas y plantas de edificios, mediante la captura de fotografías terrestres, para pronto innovar hacia las fotografías aéreas y obtener levantamientos de la cartografía de base, lo que se ha impulsado y mantenido hasta nuestros días gracias a las aportaciones de la innovación tecnológica.

Desde sus inicios, la fotogrametría se ha convertido en una herramienta indispensable para la creación modelos 3D a partir de imágenes 2D, ya que las imágenes de los objetos son obtenidas por medios fotográficos y la medición se realiza a distancia, todo esto sin que exista contacto físico con el objeto.

La digitalización de la fotogrametría nace como consecuencia de la evolución tecnológica, lo que ha permitido llevar a cabo todo este proceso a través de software especiales mediante ordenadores, aumentando la posibilidad de explotar el uso de las imágenes extrayendo mucha más información, y permitiendo la reproducción de modelos digitales mucho más reales y precisos.

Lo que hace de esta técnica una forma fácil de reconstrucción digital es la simplicidad del formato digital y del tratamiento de las imágenes para restituirlas, ya que al ingresar las imágenes digitales al ordenador se tiene una visualización en pantalla de la ubicación de los puntos de referencia, y este procedimiento se puede realizar cuantas veces sea necesario.

2.3.5.1 Definición la fotogrametría

Según Gonzales S., (2003):

“La fotogrametría es una técnica que se emplea para determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Puede ser de corto o largo alcance. Se podría simplificar básicamente en "medir sobre fotos". Cuando trabajamos con una imagen fotográfica podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional, ya cuando trabajamos más de una foto, en la zona común a éstas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica; o dicho de otro modo, información tridimensional”. (9)

Actualmente, la fotogrametría es una técnica aplicada a edificaciones existentes, levantamientos topográficos, situación de estructuras en grandes extensiones de terrenos, entre otros. Se realiza mediante el uso de tecnología y aplicaciones informáticas. Utilizando las fotografías tomadas desde diferentes puntos de vista del elemento como

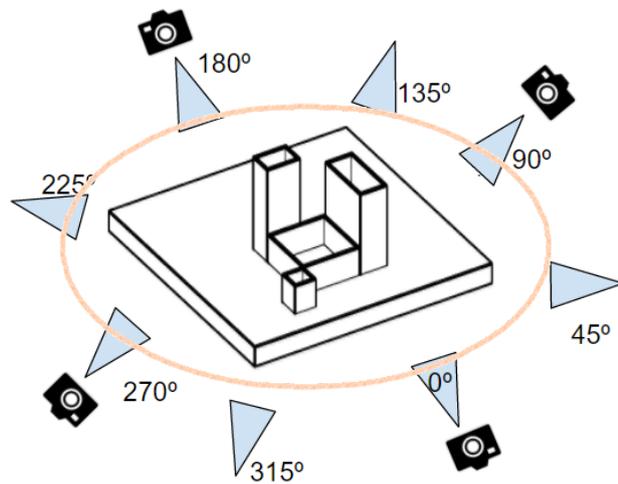


Figura 7: Captura de imágenes para aplicar la técnica de la fotogrametría. (Elaboración propia.)

referencia, o haciendo uso de un láser 3D, que permite la captura de diferentes puntos de referencia con un nivel de detalle alto, se pueden generar nubes de puntos (10). Dependiendo del software que se elija, posteriormente se puede introducir dicha nube en un programa asociado al modelado. Este procedimiento ayuda y facilita el proceso de análisis, diseño y revisión del modelado de la geometría de la edificación mejorando el rendimiento de ejecución, y planificación del proyecto.

En la Figura 7 se representa la captura de imágenes abarcando el objeto seleccionado a sus 360°, para poder aplicar la técnica de la fotogrametría y poder generar a partir de ella una nube de puntos que podrá ser utilizada posteriormente.

2.3.5.2 Fundamento de la fotogrametría

Al citar el trabajo de Jauregui, L (2009):

“El principio en el que se basa la fotogrametría consiste en la proyección de forma ortogonal sobre un plano de referencia, la imagen registrada en una fotografía, la cual ha sido proyectada sobre el negativo mediante la proyección central, que es la usada por las lentes.” (11)

Para complementar lo antes citado, en el siguiente apartado describiremos las formas en que puede ser aplicada o clasificada la técnica de la fotogrametría, sea que la foto haya sido tomada desde el espacio terrestre o el aéreo y luego según el tratamiento que se le vaya a aplicar a dichas fotografías, sea analógico (que ya no se utiliza) o digital.

2.3.5.3 Clasificación de la fotogrametría

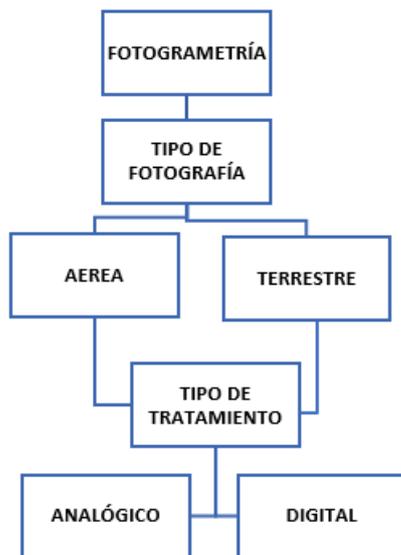


Diagrama 4: Clasificación de la fotogrametría.(Elaboración Propia)

Para clasificar y definir los conceptos básicos de la fotogrametría, se tomó como referencia el trabajo de “Principios de la fotogrametría” (10) y el de “Fotogrametría” (12) Basado en el Diagrama 4:

Según el tipo de fotografía:

1. Fotogrametría Terrestre: Son fotografías tomadas al mismo nivel del objeto (en tierra) de forma horizontal al terreno y paralelo al elemento, donde su principal aplicación es en elementos constructivos.

2. Fotogrametría Aérea: Son imágenes tomadas desde el aire con elementos aéreos, cuya orientación es perpendicular al terreno o corteza terrestre, pueden realizarse a través de un avión o dron. Su principal aplicación es a la cartografía.

Según el tipo de tratamiento:

1. Fotogrametría analógica: Es el tratamiento que se da con la reconstrucción del modelo espacial con sistemas ópticos o mecánicos donde la operación la realiza un operador, alineando y escalando manualmente el modelo estereoscópico. Luego, mejorando la técnica en la reconstrucción exclusiva mediante programas informáticos que simulan la geometría del objeto, se crearon restituidores analógicos y con la incorporación de las computadoras se dio inicio al procesado de imagen, logrando niveles de detalle a diferentes escalas.

2. Fotogrametría digital: Es la técnica en la que se utiliza como dato de entrada las fotografías previamente transformadas a formato digital, reconstruyendo así mismo el modelo espacial de forma numérica o digital. El uso de las computadoras y los software aplicados dan origen a los modelos digitales del terreno 3D.

2.3.5.4 Método general de la fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que proviene de utilizar métodos matemáticos aplicados a fotografías en formato digital. Especialmente en geometría proyectiva. Surge por la necesidad de obtener información en tres dimensiones a partir de información en dos dimensiones. El método o fundamento se basa en la obtención de puntos o coordenadas en común entre dos o más fotos para llevar a cabo la proyección del objeto.

El Método General de la Fotogrametría clásica fue formulado en los años sesenta por Bonneval para el contexto específico de la Fotogrametría Analógica Aérea Estereoscópica. El Método se basa en el concepto de haz perspectivo, en su formación y en su reconstrucción. Siendo la definición de Haz perspectivo el conjunto de semirrectas que unen la superficie de un objeto tridimensional con un centro de proyección o punto de vista. Una imagen fotográfica es una forma de registro de un haz perspectivo. (10)

a. Herramientas para la captura

En este apartado se mencionan las herramientas necesarias para llevar a cabo la técnica de la fotogrametría, donde el objetivo principal es capturar las imágenes del objeto con una alta definición de los detalles. (Ver Tabla 1)

Tabla 1: Dispositivos que pueden ser empleadas en la captura de imágenes para la reconstrucción digital. Fotogrametría. (Elaboración propia.)

Cámara fotográfica	
Smartphone	
Drones	
Láser	

Es importante resaltar que estos dispositivos permiten capturar la información ajustándose a ciertos parámetros indicados en los siguientes apartados. Para realizar esta técnica con cámara fotográfica, drones y láser se explicará brevemente los parámetros a tomar en cuenta a continuación:

- **Cámara fotográfica:**
 - -Calibración
 - Elección del escenario
 - Distancia y circunferencia focal
 - Enfoque
- **Calibración de la cámara:** existen métodos y algoritmos que permiten una calibración correcta del dispositivo, pero lo que realmente se quiere enfocar en este punto es calibrar y programar la cámara para que pueda captar imágenes nítidas, sin distorsiones para evitar errores suplementarios en la reproducción digital e identificar los puntos con precisión.

- Elección del escenario: este parámetro tiene mucha relación con el anterior, ya que depende del escenario podremos calibrar correctamente el dispositivo de captura. Sea un espacio abierto al aire libre o un entorno cerrado se deben considerar la iluminación natural o artificial por tema de sombras, y las limitaciones del entorno por movilidad y desplazamiento alrededor del elemento a capturar.

- Distancia y circunferencia focal: lo usual es capturar imágenes donde el eje focal sea lo suficientemente amplio para obtener un campo visual completo. Este parámetro también va asociado a la calibración del dispositivo de captura porque puede emplearse dependiendo del tamaño del objeto a reproducir lentes focales especiales. Una vez establecida la distancia en función de las dimensiones del objeto y el eje focal se establece una circunferencia en la que variara periódicamente de forma ligera la posición de captura. (Ver Figura 8)

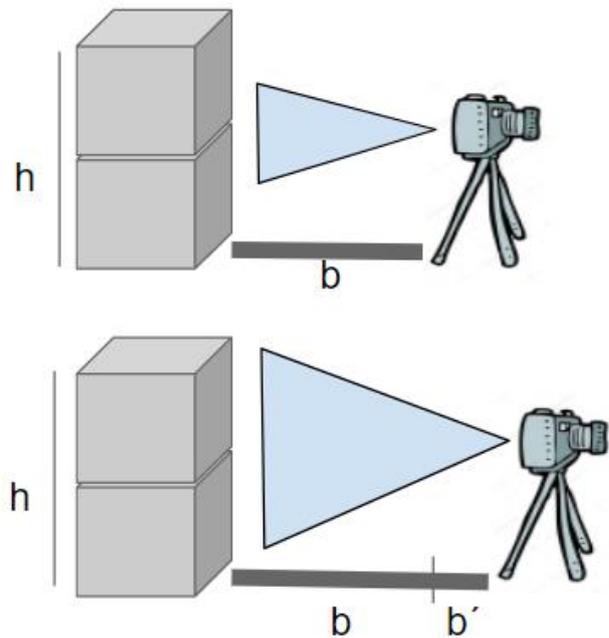


Figura 8: Ejemplo de distancia de captura en relación a la altura del objeto. (Elaboración propia)

- Enfoque y ángulo de captura: ya establecido los puntos anteriores y tomando en cuenta las dimensiones del objeto habrá que determinar el enfoque y ángulos de captura perpendiculares con respecto al objetivo e ir aumentándolo de forma progresiva cuantas veces sea necesario para obtener todos los planos completos del objeto. Un ejemplo de ello es ubicar el dispositivo perpendicularmente y trazar una circunferencia de 360° a una altura establecida lo que nos da un ángulo de inclinación de 0° , y repetir este procedimiento con la misma circunferencia, pero a un ángulo superior

a 0° y se repite cambiando el ángulo de captura si es necesario, se puede variar la altura del dispositivo si fuere necesario si la dimensión del elemento así lo requiriese. (Ver Figura 9)

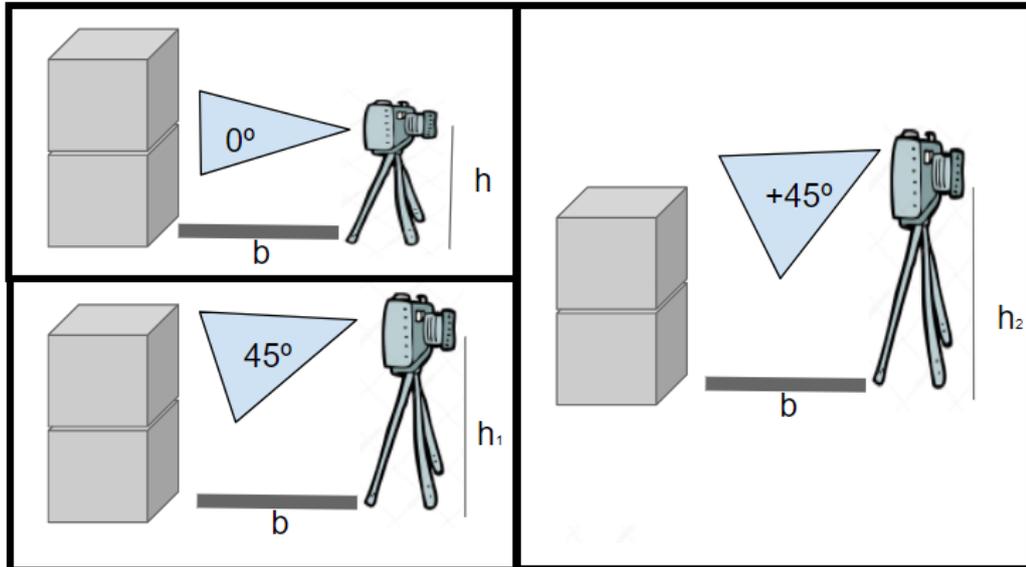


Figura 9: Ejemplo de posicionamiento del dispositivo a diferentes ángulos y alturas en función de la dimensión del objeto. A la izquierda en la figura superior la cámara se encuentra perpendicular al objeto, en la imagen inferior de la izquierda se posiciona la cámara 45° y a la derecha se aumenta el ángulo de inclinación. (Elaboración propia)

Los parámetros mencionados anteriormente son fundamentales para obtener una calidad de imagen que luego permita un procesamiento de reconstrucción digital favorable.

- **Drones:**

- Hay que definir la trayectoria del vuelo.
- Solape entre las imágenes.
- Posición de la cámara.

Estos tres parámetros mencionados anteriormente, son claves a la hora de implementar esta técnica con un dron como dispositivo de captura, ya que vienen determinado por una necesidad en común, y es que para que el elemento sea reconstruido de forma correcta, es necesario determinar un número de imágenes en concreto. Mientras mayor sea el número de puntos de vistas y más variados sean, la información será más abundante y útil a la hora de hacer el proceso (13).

a) Para levantamientos terrestres:

La trayectoria recomendada a seguir será la de forma de cuadrícula (ver Figura 10). Se recomienda que los solapes mínimos sean entre 75% (frontal) y al menos el 60% (lateral). La posición de la cámara debe estar totalmente perpendicular apuntando al suelo (plano cenital) (13).

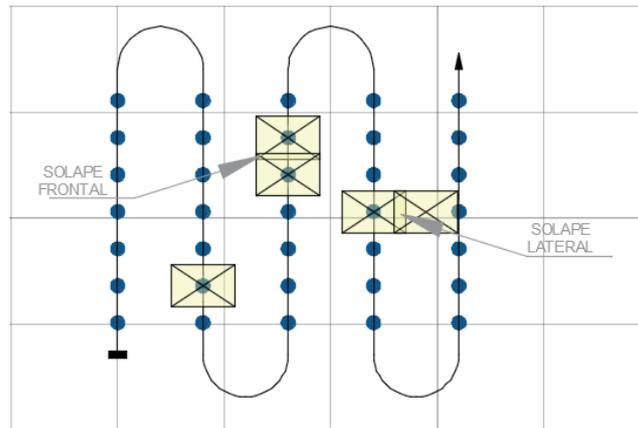


Figura 10: Trayectoria de captura de imágenes a través de un dron para superficies planas, irregulares, mapas y cartografía. Elaboración propia, con base en la fuente Insite aereals, 2017

b) En el caso de la reconstrucción de elementos ya construidos:

En las reconstrucciones de modelos tanto 2D como 3D es necesario realizarla desde varios puntos de vista alternativos para cada área. Por esto, se necesita completar una trayectoria de doble cuadrícula, es decir, completar una trayectoria como para el caso de una ortofoto y continuar con otra semejante a 90 grados (ver Figura 11). Con este tipo de trayectoria se asegura el tener fotografías desde cuatro puntos (aproximados) norte, sur, este y oeste. El solape, igual que en el caso de los ortomapas, da un resultado de 75% y 60% (13).

Por su parte, para que las paredes verticales puedan ser reconstruidas, es necesario que la cámara apunte en un ángulo de entre 10° y 35° . Habrá casos en los que sea necesario contemplar una tercera trayectoria, estableciendo diferentes alturas entre sí (13).

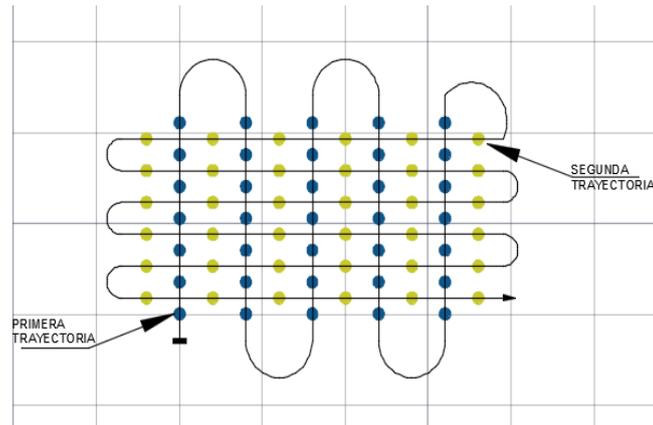


Figura 11: Recorrido para captura de imágenes a través de un dron de áreas construidas. Elaboración propia, en base a fuente *Insite aereals*, 2017.

c) En el caso de la reconstrucción de edificios y estructuras verticales es donde se presentan más diferencias respecto a los anteriores, por lo cual es necesario completar tres trayectorias circulares a diferentes alturas, en un único vuelo o en varios vuelos consecutivos. La cámara debe formar un ángulo de 45° en la trayectoria más baja, 30° en la media y 10° en la más elevada. Además, es necesario tomar entre 40 y 80 capturas en cada una de las órbitas, es decir, cada foto estará separada de la anterior por $5^\circ - 10^\circ$ grados. En todos los casos, la cámara debe tomar como punto de interés el centro aproximado del objeto. (ver Figura 12)

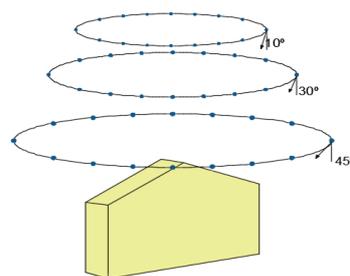


Figura 12: Captura de imágenes a través de un dron de una edificación. Fuente: La autora en base a fuente *Insite aereals*, 2017.

Es necesario tomar en cuenta que en objetos muy grandes se requiere modificar estos valores de forma que siga existiendo la misma cantidad de solape entre imágenes. En este caso, más fotos, cada menos grado y si el objeto es muy alto, añadiendo progresivamente más órbitas. (13)

- Láser o escáner:
 - Establecer el área o zona de escaneo.
 - Definir si es necesario un escaneo terrestre o aéreo.
 - Utilizar software compatible con el escáner.

La utilización de esta herramienta simplifica en gran medida los procesos de trabajo, ya que el escáner o láser es capaz de lanzar miles de impulsos que son reflejados en la superficie obteniendo una nube de puntos. Algunas de las ventajas que ofrece esta técnica en comparación con el dron y la cámara se pueden mencionar a continuación:

Eficiencia: La relación que existe entre el tiempo de dedicación y el nivel de detalle que se obtiene permite acortar tiempos de trabajo.

Escaneo completo: No solo se reflejan los contornos, además, permite la documentación de superficies, aspectos y cualquier tipo de detalle.

Documentación integral: Permite la obtención de información tanto del interior como del exterior del edificio.

Preservación de información en formato digital: Se obtiene información muy completa y al detalle de edificios y terrenos que van a desaparecer.

Rapidez, esta tecnología permite tomar millones de puntos por segundo del entorno estudiado.

Seguridad, permite medir lugares peligrosos e inaccesibles sin poner en riesgo la vida de ningún técnico.

Exactitud, ya que el error de la nube de puntos tomada, está por debajo del centímetro a nivel global y milímetro a nivel relativo, por lo que se ofrece una gran precisión.

Exhaustividad, la alta resolución del dato, permite obtener información casi continua del entorno. (14)

b. Proceso de reconstrucción de la superficie del objeto

Una vez se realiza la captura de imágenes el proceso de la reconstrucción de la superficie resulta de forma casi automática, ya que se lleva a cabo de manera digital a través del software existente. El usuario tiene la opción de marcar puntos

de referencias existentes entre las imágenes introducidas, estos puntos correspondientes a las superficies vienen dados con coordenadas que el programa asocia y ejecuta por medio de modelos matemáticos. La orientación interna del objeto se lleva a cabo de forma absoluta según el orden de imágenes introducidas y los puntos que se hayan marcado como referencia que sirven de orientación y ubicación.

2.3.5.5 Aplicación y uso de la fotogrametría en la actualidad

Son muchas las disciplinas en la actualidad que se benefician de esta técnica, la cual se implementó inicialmente con la realización de mapas y planos topográficos, en el desarrollo de obras de ingeniería civil, la arqueología, la medicina y otros sectores de gran importancia. Los avances en la tecnología y la aplicación del mismo en esta técnica, permite la aceptación cada vez mayor en muchos sectores, poniéndola en práctica y obteniendo resultados satisfactorios, por lo que su evolución ha captado la atención de grandes sectores de la industria permitiendo tener un mayor alcance al momento de ofrecer mejoras a la sociedad.

Algunos de los usos que actualmente se le da a esta técnica son:

1. Ubicación de carreteras
2. Seguimientos catastrales
3. Cartografía y mapas forestales
4. Reconstrucción de estructuras antiguas
5. Rehabilitaciones
6. Medicina

En las siguientes imágenes se aprecian ejemplos de cómo se ha puesto en práctica la técnica de la fotogrametría y los resultados obtenidos son una representación gráfica de lo útil que puede ser y las ventajas que aporta.



Figura 13: Fotogrametría aplicada a la reconstrucción de grandes extensiones de terrenos realizada con altimetría (Drones). (Blog open opin, mapeado 3D, por su creador Ricardo.)

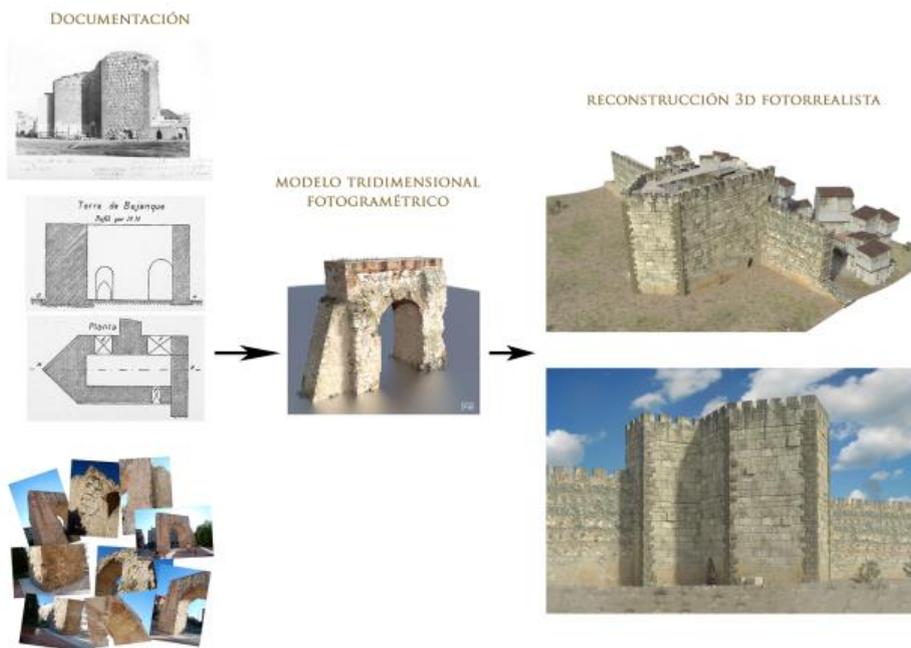


Figura 14: Reconstrucción virtual de la torre-puerta de bejanque (guadalajara) realizada con láser. (Arqueología y patrimonio virtual, 2014 (15))

Las figuras antes expuestas son la representación gráfica que muestran como resultado de la reconstrucción digital de objetos o elementos en base a fotografías a través de la técnica fotogramétrica, y se logra con el procesamiento de una colección de imágenes digitales. Este resultado a simple vista puede

apreciarse como un objeto sólido, pero en realidad son una cantidad de puntos que generan una nube de coordenadas en 3D X, Y, Z.

En el siguiente apartado se hablará un poco más a detalle de la nube de puntos como resultado de la fotogrametría.

2.4 TECNOLOGÍAS VICULADAS A LA RECONSTRUCCIÓN 3D

El sector de escaneado 3D contiene una amplia variedad de productos y software que varían en cuanto a su función y precio. Existen muchas opciones, desde comprar un dispositivo de captura 3D como puede ser un láser, drones o un escáner si se desea para realizar con fines profesionales, como utilizar un teléfono inteligente que también puede conectarse a estos dispositivos. Sin embargo, es indispensable contar no solo con los dispositivos para realizar la tarea, sino una vez se obtenga el material es necesario procesarlo y darle el tratamiento posterior requerido y para ello necesitamos contar con un software que tengan compatibilidad con los dispositivos, que la interacción con el usuario sea cómoda, y lo más importante que sea de un precio asequible o si es posible gratuito. (6)

- En cuanto a dispositivos

Tabla 2: Diferentes tipos de dispositivos, láser y cámaras disponibles en el mercado para realizar reconstrucción digital. (6)(Elaboración propia)

DISPOSITIVO	CASA	CARACTERÍSTICAS
EinScan-SE/SP	Shining 3D	Luz estructurada Escáner 3D de escritorio Escaneo fijo y automático 1,3 megapíxeles
3D IIIDScan	PrimeSense	Luz estructurada Escáner 3D de escritorio Cámara: PrimeSense Carmine 1.09 Resolución: 640x480 Lentes estándar: Lentes fijas Cámara de textura integrada Escaneo humano Plato giratorio disponible

Escáner 3D HD	NextEngine	Triangulación láser Escáner 3D de escritorio
3D RealSense™	Intel®	Cámara Web HD Cámara de profundidad Proyector Láser Microfonos

- En cuanto a software

Tabla 3: Software que se encuentran en la WEB para aplicación de la técnica de fotogrametría. (Elaboración propia)

SOFTWARE	CORPORACIÓN	PLATAFORMA	LICENCIA
CONTEXCAPTURE	BENTLEY	LINUX, OSX, WINDOWS	PAGA €
PHOTOSCAN	AGISOFT	LINUX, OSX, WINDOWS	PAGA €
VISUAL SFM	LIBRE/ CHANGCHANG WU	LINUX, OSX, WINDOWS	LIBRE
ON-SITE PHOTO	ALLPLAN	LINUX, OSX, WINDOWS	PAGA €
RECAP 3D	AUTODESK	LINUX, OSX, WINDOWS	LIBRE/ PAGA €

2.5 NUBE DE PUNTOS

2.5.1 DEFINICIÓN

La definición de nube de puntos según la compañía Autodesk, (2016) en su biblioteca de búsqueda, dice que:

Una nube de puntos es un gran conjunto de puntos adquiridos mediante escáneres láser 3D u otras tecnologías para crear representaciones tridimensionales de las estructuras existentes.

Los archivos de nube de puntos admiten el proceso de diseño, por lo que ofrecen un contexto real donde se pueden volver a crear los objetos a los que se hace referencia o insertar otros modelos. Una vez que una nube de puntos está enlazada a un dibujo, esta se puede utilizar como una norma de dibujo, se puede cambiar su visualización o es posible aplicar una asignación de color para distinguir los diferentes componentes.” (16)

En marco de la definición anterior, se puede decir que la nube de puntos es el resultado de la aplicación de la técnica de fotogrametría, que puede representar con exactitud geométrica una realidad física y su aplicación puede ser múltiple. El siguiente paso una vez se han procesado las imágenes y obtenido la nube de puntos, es que éste debe convertirse en una malla para utilizar en los programas que ayuden a la automatización del modelado de elementos.

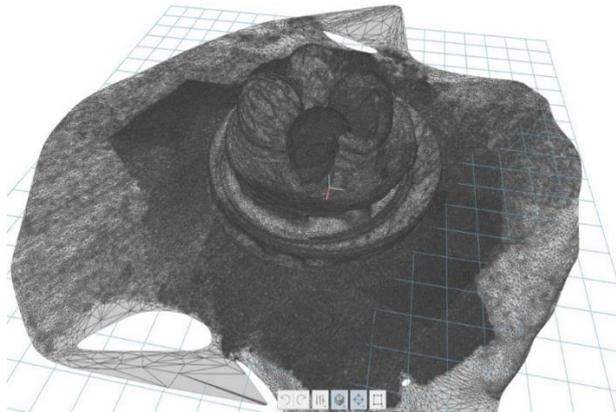


Figura 15: Ejemplo de un modelo de nube de puntos. (Elaboración Propia).

En la Figura 15 se puede observar como los objetos creados tras la base del procesado de imágenes generan una nube de puntos con elemento triangulares unidos entre sí, formando una especie de malla que ayuda a la pre visualización que luego permite definir propiedades al objeto.

En el siguiente apartado se desarrolla detalladamente el procedimiento que se siguió para llevar a cabo la aplicación la técnica fotogramétrica para reproducir de forma digital la reconstrucción de los elementos capturados en fotografías en el cual se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- Herramientas utilizadas
- Ángulos de captura
- Distancias de captura
- Iluminación
- Ubicación
- Procedimiento
- Resultados

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA RECONSTRUCCIÓN DIGITAL 3D

El desarrollo de este capítulo está enfocado al proceso de la digitalización de imágenes y la creación de modelos 3D, a partir de la técnica de la fotogrametría, para poder determinar la compatibilidad entre el modelo nube de puntos diseñado con la aplicación de esta técnica y un modelo digital diseñado en base a los planes originales relacionados con el proyecto a ejecutar. En este apartado, se estudia a detalle el procedimiento que se necesita establecer con un modelo que represente un proyecto real.

El proceso digital comprende el funcionamiento e interacción de las distintas herramientas y metodologías de trabajo puestas en práctica, con la finalidad de explorar el desarrollo e implementación de los mismos en el caso de uso que se estableció en la metodología de trabajo previamente.

En consecuencia, el objetivo que se desea alcanzar al determinar si existe compatibilidad entre ambos modelos, lo que busca es su futura aplicación específicamente en la fase de ejecución de los proyectos de obra reales.

3.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

En cuanto a los equipos y las herramientas de trabajo utilizados para elaborar los modelos, tanto el digital como el de nube de puntos a partir de la reconstrucción digital, pueden observarse con una breve descripción para cada una de ellos en la Tabla 1.

Para seleccionar estos dispositivos se tomaron en cuenta varios parámetros debidamente explicados en el apartado 2.3 Fotogrametría, y valorando que el trabajo de campo se realizaría en una locación casera y con elementos que fueran asequibles para llevar a cabo las pruebas, se consideró que:

- El dispositivo de captura de imagen podía ser una cámara digital o un dispositivo móvil, el cual debe tener una resolución de imagen buena para poder obtener resultados de mejor calidad al momento de emplear la técnica fotogramétrica. En el caso de este proyecto se utiliza un iPhone 5S como se muestra en la Tabla 4.

- El ordenador que se utiliza es un portátil hp, ver Tabla 4, para el procesamiento de las imágenes y el correcto funcionamiento de los software empleados es necesario que el equipo tenga gran potencia.

Tabla 4: Equipos de trabajo utilizados para la captura de imágenes del modelo a reproducir digitalmente. (Elaboración Propia.)

EQUIPO		ESPECIFICACIONES
<p>PORTÁTIL (HP PAVILION) PRINCIPAL</p>		<p>PROCESADOR INTEL® CORE I7-7700HQ (2.8 GHZ, 6 MB)</p> <p>MEMORIA RAM 8GB</p> <p>CONTROLADOR GRÁFICO NVIDIA GEFORCE GTX 1050M 2GB</p>
<p>APPLE IPHONE 5S</p>		<p>SISTEMA OPERATIVO IOS 7</p> <p>4.0 PULGADAS 8.0 MP1560 MAH 4G</p>

3.2 SELECCIÓN DE SOFTWARE PARA RECONSTRUCCIÓN FOTOGRÁFICA

Actualmente, son muchos los softwares que se encuentran disponibles en el mercado para la aplicación de esta técnica. A algunos se pueden obtener de una forma gratuita y otros tienen un costo, la selección con respecto a esta característica va directamente relacionada con la inversión que se desee realizar y el fin para el cual se desea aplicar. En este caso de estudio en particular, como lo que se pretende es determinar la compatibilidad de un modelo creado, (no es el caso de una obra real), se seleccionaron software de versiones estudiantiles gratuitas.

Específicamente se decidió utilizar software de la casa de Autodesk, ya que cuenta con licencias de fácil acceso que permiten realizar una planimetría de los proyectos de forma integrada teniendo la colaboración entre cada uno de ellos, y permitiendo visualizar diferentes fases y etapas del proyecto a medida que avanza. Los criterios para seleccionar los software están relacionados a la función que estos cumplen y a los objetivos de este proyecto que se explicarán a continuación:

Tabla 5: Selección de software para la elaboración del caso de uso según el objetivo a realizar. (Elaboración Propia.)

OBJETIVO	PROGRAMA	FUNCIÓN
DISEÑO	Revit	Es una herramienta de construcción y diseño de para modelos de arquitectura, ingeniería MEP, ingeniería estructural y construcción. Permite al usuario diseñar con elementos de modelación aplicando propiedades y variables convirtiéndolo en un dibujo paramétrico
RECONSTRUCCIÓN DIGITAL	Recap 3D	Es una herramienta que te permite reconstruir digitalmente objetos además de limpiar, organizar y visualizar los sets de datos masivos de la nube de puntos para su futura exportación.

3.3 DESARROLLO DE MODELO DIGITAL

Lo primero que se debe tener en cuenta para comparar o determinar la compatibilidad entre un modelo con respecto a otro es tener la base desde el cual se establecerán las diferencias al momento de realizar la comparación. En el caso de un proyecto, el punto de comparación de lo que se ejecute en una obra siempre serán los planos y el modelo BIM en caso de que se tenga.

Debido a ello, es importante establecer una vinculación de uso con los software seleccionados para realizar caso del estudio establecido en este trabajo en el que se simuló un proceso de ejecución con 3 edificios rectangulares a escala, sobre una base plana en la que se establecen las fases constructivas. Una manera de establecer esa vinculación que nos permitirá tener un dominio sobre la técnica que se quiere aplicar es realizando pruebas previas al caso de uso definitivo, en las cuales podremos notar las dificultades y definir nuevos parámetros de trabajo que nos optimicen los resultados en el modelo definitivo.

3.3.1 CALIBRACIÓN

En el caso particular de la herramienta Recap es necesario realizar una calibración para poder saber la relación de distancia del objeto real con respecto al objeto a reproducir digitalmente ya que sus valores de reproducción son

adimensionales. En la Figura 16 se muestra como se debe realizar este proceso que se describe a continuación:

- Se establece un plano base de trabajo, en el cual se referencia el punto central.
- se ubicó la distancia de captura y a partir de ella se referencia la circunferencia focal.
- Se colocan reglas de medida en los tres ejes x, y, z.
- Se implanta una altura de posicionamiento de dispositivo de captura y los ángulos respectivos para obtener un eje focal que abarque la totalidad del elemento.
- Se reproduce digitalmente para reconstruir el elemento y se toman las medidas arrojadas por el programa para compararlas con las medidas originales y obtener un factor de calibración.

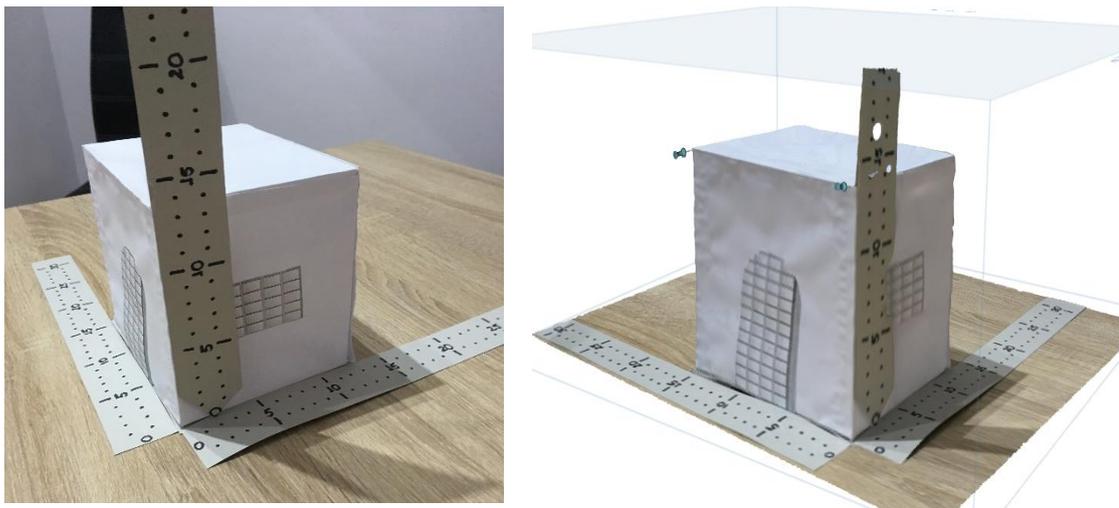


Figura 16: Ejemplo de calibración que se utilizó para ajustar los valores de referencia extraídos del programa Recap para aplicar a los modelos a reconstruir. (Elaboración propia.)

Para lograr una calibración correcta con el resto de objetos, se deben respetar las distancias y alturas obtenidas a partir de este modelo para las siguientes reproducciones estableciendo relaciones de distancias y alturas en función de las dimensiones de los objetos seleccionados.

3.4 DIGITALIZACIÓN DE LOS MODELOS

Para dar inicio al proceso de digitalización, y tomando en cuenta las consideraciones descritas en los apartados anteriores, en cuanto a la selección del software y las herramientas empleadas para llevar a cabo la elaboración del modelo de nube de puntos, se tiene que seguir el flujo de trabajo establecido en el Diagrama 2 que permita realizar una investigación de manera ordenada y continua, sintetizándolo como se describe a continuación:

- a) Características a tomar en cuenta para la reconstrucción digital.
- b) Adquisición de datos, mediante el registro fotográfico con la utilización de herramientas domésticas.
- c) Obtención del modelo de nubes de puntos con el software seleccionado.
- d) Conversión al formato adecuado de la nube de puntos para su uso con Revit.
- e) Comprobación y validación de los resultados del software, en la creación del modelo de nube de puntos.

3.4.1 CARACTERÍSTICAS A TOMAR EN CUENTA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DIGITAL

3.4.1.1 Ángulos de captura

Como se ha explicado en el estado de arte, depende del tipo de fotografía y la aplicación que se le vaya a dar en cuanto a la técnica pueden variar los ángulos de captura. Esto va directamente relacionado con el procedimiento de captura de imagen que se desea aplicar y el tipo de dispositivo que se vaya a utilizar, sea a través cámaras digitales, drones o láseres. En el caso particular de este trabajo de investigación aplicaremos como herramienta de captura un dispositivo móvil con cámara integrada y con la ayuda de un trípode se establecieron ángulos de captura de 0° totalmente perpendicular al objeto, 45° y 90°.



Para obtener una captura completa del objeto se estableció una base debidamente distribuida según los ángulos correspondientes como se muestra en la figura anterior, donde se pudiera capturar el objeto 360°.

*Figura 17: Posicionamiento de herramienta de captura de imágenes con ayuda de trípode.
Elaboración propia.*

3.4.1.2 Distancias de captura

Como se estableció un área de trabajo de una mesa cuadrada con medidas de 0,90 x 0,90 cm, se tomó el centro de la sección y se creó el perímetro de captura en una circunferencia creada alrededor del centro y las distancias de captura fueron de 45 cm para las primeras pruebas y posteriormente el trípode se colocó a 65 cm para las últimas pruebas.



Figura 18: Base con ángulos y circunferencias establecidas para la de captura de imágenes.(Elaboración propia)

3.4.1.3 Iluminación

La iluminación que se tomó fue con luz natural y la ayuda de luz artificial en algunos casos para evitar la apariencia de sombras que podría crear dificultad en la reconstrucción digital.

3.4.1.4 Ubicación el dispositivo de captura

La cámara fue colocada en el trípode a una altura de captura desde la base del objeto a distancias de 10 cm, 20 cm, 30 cm y 55 cm de altura que nos permitiera abarcar una visual completa del objeto.

3.4.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

En el mismo orden de ideas, la adquisición de datos se basa en recolectar la mayor cantidad de información, identificadores y reseñas posibles para llevar a cabo la tarea estimada. En este caso en particular, antes de aplicar la técnica de la fotogrametría para crear el modelo de nube de puntos en el caso de prueba, se llevaron a cabo diferentes ensayos para comprobar el uso del software y poder tener un mayor dominio y definición de los resultados. A tal efecto, se realizaron pruebas con diferentes elementos de diversos tamaños y formas en los que se tuviera la facilidad de capturar las imágenes y luego procesarlo establecidos en tres grupos de trabajo. (Ver Figura 19)



Figura 19: Grupo de objetos A utilizados para ensayos previos de la reproducción digital, (a) taza, (b) silla, (c) centro.(Elaboración propia)

Los primeros ensayos que se realizaron fueron con una silla, una taza y un centro de mesa, lo que permitió observar y mejorar el procedimiento de captura de

imágenes y la calidad de las fotografías y posteriormente el procesamiento de datos en el programa seleccionado. Es importante resaltar que la cantidad de imágenes tomadas alrededor del elemento influye al momento de la reconstrucción digital ya que aporta puntos de relación y ubicación entre los solapes de las imágenes con respecto al elemento.

Consecutivamente se realizaron pruebas de calibración con elementos de carácter más uniformes con una pelota, un cuadrado y un objeto representativo al de una casa mejorando la técnica de reproducción digital en base a los resultados obtenidos con el grupo de pruebas anteriores, tomando en cuenta las distancias de captura en función de las dimensiones del objeto, las texturas, los vacíos existentes dentro de los mismos objetos, la rotación del dispositivo de captura.

Posteriormente se configuró lo que se emplearía como un primer modelo para la exportación de la nube de puntos como resultado de la fotogrametría, y sobreponer la nube de puntos en un modelo digital creado en AutoCAD, que cumple la función básica de simular las fases de desarrollo de un proyecto y se empleara para determinar la compatibilidad geométrica de la nube de puntos con respecto al modelo 3D. En la Figura 20, se puede observar el orden cronológico que se estableció para identificar las fases de elaboración.



Figura 20: Grupo de objetos B para la reproducción digital, (a) pelota, (b) caja, (c) casa. (Elaboración propia)



Figura 21: Grupo de objetos C, ejemplificación de fases de desarrollo de un proyecto. (Elaboración Propia)

3.4.3 OBTENCIÓN DEL MODELO

La obtención del modelo de nube de puntos está directamente relacionada con la recolección de datos ya que se genera a partir de esta información, resaltando ciertas características importantes relacionadas con el uso del software Recap 360 de Autodesk, que se toman en cuenta para proceder a la digitalización como lo son:

- La cantidad de fotos que se precisan son las necesarias para captar la totalidad del modelo a sus 360°, para este programa se requiere un mínimo de 20 fotografías para lograr la reconstrucción digital. Aunque la versión estudiantil que se usa para este trabajo admite un máximo de 100 imágenes.
- La calidad y definición de la imagen debe ser alta, en este caso las fotografías fueron tomadas con la cámara de un iPhone, que cuenta con unas características de:
 - Resolución de la cámara: 8 megapíxeles
 - Resolución de las imágenes: 3264x2448píxeles.
 - Flash dual led
 - Apertura focal f/22
- La iluminación y el ambiente donde se realice la captura de imágenes debe ser la adecuada para evitar el efecto de sombras y que esto no afecte la

reconstrucción digital asumiéndolo como un elemento adicional. En este trabajo se utilizó luz natural con ayuda en algunos casos de luz artificial y el flash del dispositivo.

El procedimiento a seguir para reconstruir digitalmente a partir de las galerías de imágenes tomadas previamente se describe a continuación:

1. Como se muestra en la Figura 22, una vez realizada la captura de las fotografías, se descargan al ordenador en una carpeta correspondiente al proyecto, debidamente identificada. Se da inicio al programa Recap, y se selecciona en la ventana la opción photo Project para iniciar con un nuevo proyecto, esta opción trabaja directamente en la web de Autodesk, así que se desplegará una ventana que da las opciones de procesado.



*Figura 22: Ejemplo de cómo se capturan las imágenes, estableciendo la circunferencia focal, los ángulos y las alturas de captura.
Elaboración propia*

2. Ya dentro de la web de Autodesk, en la ventana de crear el modelo se inicia el proceso de adjuntar las imágenes tomadas previamente. Para ello, se selecciona la opción que aparece enmarcada en amarillo y automáticamente se despliega una ventana para examinar los archivos del ordenador, se accede a la carpeta del proyecto y se escogen las imágenes que se desean procesar.



Figura 23: Registro e inicio de nuevo proyecto, Paso 1.
Elaboración Propia

3. Una vez incluidas las imágenes, se procede a generar los puntos de referencias que permiten tener mejor precisión al momento de procesar la información y que el software pueda reconocer y ubicar mejor el objeto. Figura 23. Este paso se lleva a cabo seleccionando la opción que aparece enmarcada en amarillo en la figura correspondiente, y automáticamente se genera una ventana de dialogo dividida en dos, ambas con las imágenes importadas de la carpeta del archivo del proyecto.

La ventana del lado izquierdo permite seleccionar una primera imagen de referencia, la cual estará asociada a las imágenes de la ventana del lado derecho. Por cada una de la ventana izquierda se podrán seleccionar tres de la ventana derecha. Esto le permite al programa generar puntos de referencias asociados al objeto, ya que se le ha realizado una toma de fotografía alrededor obteniendo una visual y ajuste más preciso al momento de crear el objeto 3D.

Se debe tener cuidado de no repetir las imágenes de referencia de la ventana derecha ya que así se facilitará al programa la localización y se evita errores de identificación. Este paso es muy práctico y útil en geolocalizaciones y en espacios o estructuras grandes o donde las distancias a las cuales fueron tomadas las fotografías fueron muy largas, especialmente cuando se trabaja con fotografías aéreas.(Ver Figura 24)



Figura 24: Ubicación de puntos de referencias, Paso 2.
Elaboración Propia

- Una vez marcadas las referencias se definen las características de procesamiento que se le darán al formato final, así se define como se generará la nube de puntos con la optimización que se desea, los formatos finales en los cuales se abrirá el proyecto y las características que permitirán una mejor resolución y visualización del objeto 3D.(Ver Figura 25)



Figura 25: Formato de creación y características de procesamiento, Paso 2.1.
Elaboración Propia

- Para finalizar con el proceso de creación del objeto 3D, se acepta, graba y guarda el proyecto asignándole un nombre. Por defecto este archivo se guardará en la carpeta A360 de Autodesk y dentro de la propia aplicación en la web, en caso de que se necesite revisarlo, estará disponible en la cuenta online de Recap. Adicionalmente se recibirá un correo electrónico notificando la creación de un nuevo proyecto. (Ver Figura 26)



Figura 26: Guardado del proyecto, Paso 3.
Elaboración Propia

3.4.4 CONVERSIÓN DEL FORMATO

Una vez generadas las nubes de puntos, se realiza un estudio sobre los formatos de archivo soportados por las distintas aplicaciones que se usaron según se resume en la tabla siguiente: (12)

Tabla 6. Comparativa de formatos de archivos (17).
Fuente: Blasco Juan José, 2015.

APLICACIÓN	IMPORTA / ABRE	EXPORTA / GUARDE
Recap	.rcs, .fls, .fws, .lsproj, .ptg, .pts, .ptx, .las, .zfs, .zfprj, .asc, .cl3, .clr, .e57, .rds, .txt, .xyz, .rcp, .pcg, .xyb	Nube de puntos (.rcs, .pts, .e57, .pcg)
Photo on Recap 360	-	Modelo (.obj, .rcm, .fbx, .ipm) Nube de puntos (.rcs)
Revit	.rcs, .rcp, .3dd, .asc, .d3, .clr, .e57, .fls, .fws, .ixf, .las, .las84, .mpc, .obj, .pcg, .ptg, .pts, .ptx, .rds, .rep, .rxp	-

Es importante resaltar la utilidad de estos formatos de exportación, porque según para cada programa se puede utilizar extensiones diferentes.

El siguiente paso es hacer que los archivos tengan una mejor integración en REVIT, por lo que necesitan ser procesados y convertidos a un formato .rcs, lo que puede hacerse directamente desde el propio programa o utilizarse la aplicación Recap, que aporta entre otras las siguientes funciones de interés:

- ✓ Se pueden importar varias nubes de puntos al mismo tiempo.
- ✓ La nube de punto se puede trabajar por fases y/o etapas en modo de capas.
- ✓ Eliminar secciones de la nube de puntos que no sea de interés futuro.
- ✓ Mediciones sobre la nube de puntos, así como verificar coordenadas, distancias y ángulos.
- ✓ Aplicación de colores de visualización según la información de alturas, intensidad o valores de las normales.

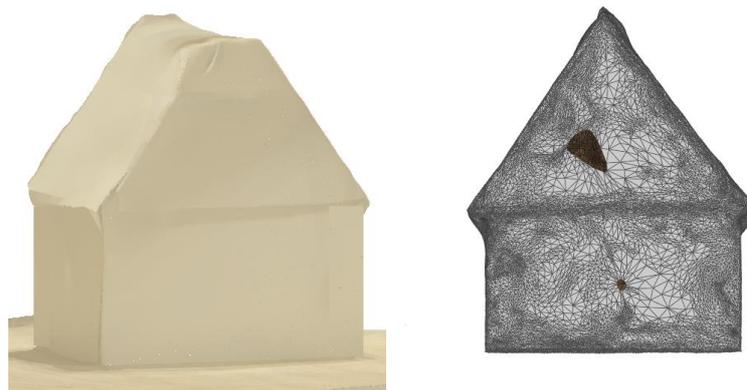


Figura 27: Modelo de nube de puntos en Revit, formato exportado de Recap .rcm a formato .rcs .(Elaboración propia)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En el capítulo IV se estudia y revisa los resultados obtenidos en los diferentes casos realizando una valoración en cuanto a la funcionabilidad que tiene el modelo de nube de puntos creado a partir de la técnica fotogramétrica con respecto al modelo digital para su uso en las diferentes fases de un proyecto de obra civil.

En este apartado se busca dar respuestas a las preguntas originadas en el planteamiento inicial del problema. De modo que realizar un modelo digital basado en los planos del proyecto permite tener una guía referencial en el cual basar los resultados obtenidos de la reconstrucción digital y conseguir conclusiones fiables.

4.1 VALORES DE CALIBRACIÓN

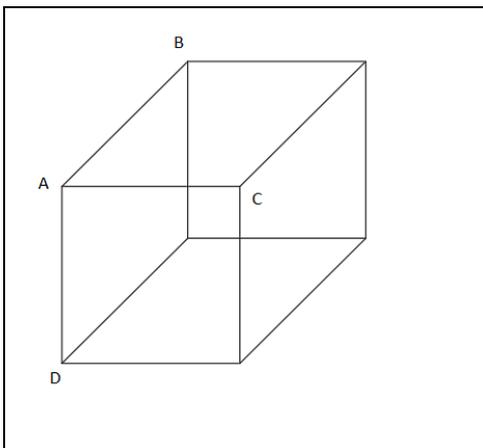


Figura 28: Cubo de referencia para tomar las medidas de referencia de la Tabla 7.(Elaboración Propia)

En el capítulo 3 se describió el procedimiento que se llevó a cabo para realizar la calibración del programa y establecer los porcentajes de error y en caso de existir hallar sus valores.

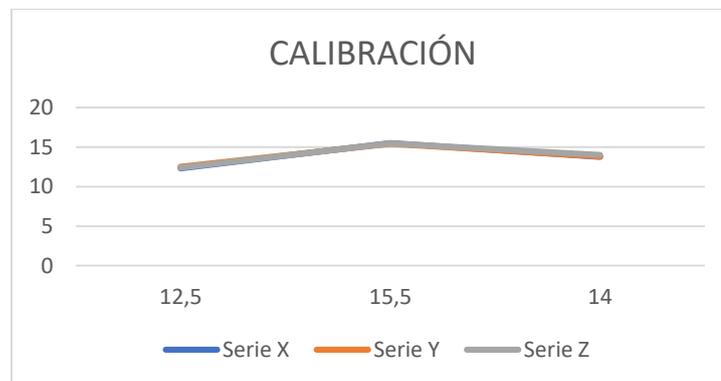
La Figura 28 muestra los puntos que se tomaron en cuenta para tomar las distancias de referencias y establecer una tabla comparativa como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Tabla de resultados del modelo de calibración con datos obtenidos del objeto real y del modelo de reconstrucción digital con los porcentajes de error. (Elaboración Propia)

Puntos	Medida real (cm)	App Calibración "X" (uni.)	∂ % error	App Calibración "Y" (uni.)	∂ % error	App Calibración "Z" (uni.)	∂ % error
A-B	12,5	12,3	1,6	12,5	0	12,40	0,8
A-C	15,5	15,50	0	15,40	0.6	15,475	0,16
AD	14	13,75	1,78	13,797	1,45	14	0

En la Tabla 7 en la primera columna se tabulan los puntos de referencia que se tomaron del objeto para tomar las medidas, en la segunda columna encontramos los valores reales del objeto, las dos columnas siguientes corresponden a los valores obtenidos de los puntos de referencia desde el programa de reconstrucción digital 3D y el porcentaje de error.

Los resultados que se obtuvieron de la calibración en función de porcentaje fue de una media de 0,70%, lo que refleja una reproducción digital casi exacta de los objetos.



4.2 MODELOS PREVIOS

Para conocer las herramientas, los parámetros y lineamientos a seguir para lograr una reconstrucción digital idónea para este trabajo, se utilizaron modelos propios del autor, como referencia para poder observar el progreso de cada modelo y la reproducción del mismo de lo físico a lo digital a través de las imágenes.

Se muestra la derivación obtenida como resultado de cada prueba previa al modelo de nube de puntos corroborando la comprobación y validación descrita en el capítulo anterior.

Los resultados que se quieren comprobar en estos modelos es precisión en cuanto a digitalización y escala del objeto original con respecto al digital, se realizaron pruebas con dos grupos de elementos y posteriormente con el modelo del caso de uso.

4.2.1 CASO DE ESTUDIO GRUPO A

El primer grupo sirvió como referencia para ajustar los parámetros de aplicación para mejorar la técnica fotogramétrica en el modelo definitivo. Estas pruebas fueron realizadas con tres objetos que se describen a continuación:

4.2.1.1 Silla

Para este objeto, se puede observar en la Figura 29 un resultado que no tiene aproximación alguna entre objeto real vs. el objeto digitalizado con las imágenes tomadas previamente del mismo, lo que se dedujo de este ensayo fue que la captura de imágenes no se realizó correctamente por las siguientes razones:

- Se fijó un eje de rotación al elemento, en vez de rotar la herramienta de captura.
- No se tomó en consideración el ángulo de captura de imágenes del objeto en los 360°.
- La distancia a la cual se realizaron las capturas de imágenes no permitió captar el objeto en su totalidad en todas las imágenes.



Figura 29: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 1 del grupo de pruebas A, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado. (Elaboración Propia)

Este modelo no puede ser representado en tablas y gráficos debido a que por su reproducción tan deficiente hubo valores que no se pudieron definir en el modelo de nube de puntos.

4.2.1.2 Taza

Se puede observar en la Figura 30 un resultado bastante representativo del objeto real vs. El objeto digitalizado con las imágenes tomadas previamente del mismo, donde se observa el elemento con distorsión, se considera que la captura de imágenes no se realizó correctamente por las siguientes razones:

- Se fijó un eje de rotación al elemento para poder aplicar la técnica de captura de fotos como ráfaga donde la herramienta de captura se fijó en un punto.
- Se tomó en consideración el ángulo de captura de imágenes del objeto en los 360° para seguir la secuencia en las imágenes.
-



Figura 30: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 2 del grupo de pruebas A, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado. (Elaboración Propia)

Tabla 8: Comparación de datos reales del modelo 2 del primer grupo de pruebas vs. Objeto digital. (Elaboración propia)

Datos	Longitud Real (cm)	Unidad de medida Digital (cm)	Diferencia (cm)	% error
Altura	11	10,8	0,2	1,8
Diámetro	8,5	8,4	0,1	1,17

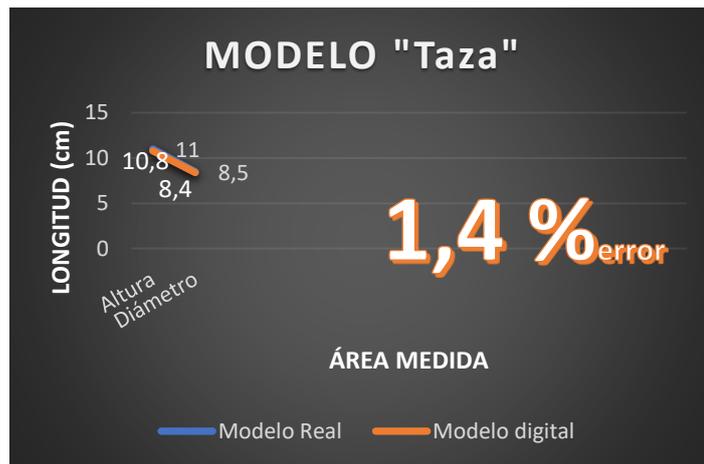


Gráfico 1: Representación gráfica de resultados provenientes de la Tabla 8. (Elaboración propia)

El Gráfico 1 sirve para tabular los resultados obtenidos del modelo de nube de puntos del primer grupo de pruebas, correspondiente al modelo “taza” de los datos obtenidos del programa de reconstrucción digital y poder compararlo con los valores reales del mismo. En la gráfica se representan los valores extraídos de la Tabla 8, donde la serie azul reproduce los valores reales del objeto, y la serie naranja reproduce los la unidades de valor del objeto digital de nube de puntos respectivamente.

Analizando el porcentaje de error entre ambas series se obtuvo que es de un 1,4 % en promedio de todas las medidas correspondientes.

4.2.1.3 Centro

Se puede observar en la Figura 31 un resultado bastante representativo del objeto real vs. el objeto digitalizado con las imágenes tomadas previamente del mismo, donde se observa el elemento casi igual exceptuando algunas irregularidades lo que permite perfeccionar la técnica para poder aplicarla al modelo representativo de las fases para generar la nube de punto en la que se quiere comprobar la funcionabilidad de estos modelos aplicados a proyectos reales. Se tomaron en cuenta los errores y fallas en los modelos anteriores que para mejorar la técnica y el resultado obtenido se describe a continuación:

- Se fijó un eje de rotación a la cámara y no al elemento.
- Se tomó en consideración el ángulo de captura de imágenes del objeto en los 360°.

- Se respetaron las distancias de ubicación de la cámara fotográfica.



Figura 31: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 3 del grupo de pruebas A, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado. (Elaboración Propia)

Se puede resumir de las pruebas realizadas a este grupo de objetos que se tomaron en cuenta parámetros de posicionamiento de los elementos y del dispositivo de captura, además de los ángulos de enfoque, pero no de los materiales y sus texturas por lo que se asume que es un factor importante en la reproducción digital de los elementos para lograr una simetría uniforme y evitar las zonas huecas que genera el procesamiento de las imágenes por defecto en algunos casos. Estos aspectos los tomaremos en cuenta en los siguientes grupos de prueba.

Tabla 9: Comparación de datos reales del modelo 3 del primer grupo de pruebas vs. Objeto digital. (Elaboración propia)

Datos	Longitud Real (cm)	Unidad de medida Digital (cm)	Diferencia (cm)	% error
Altura Plato inferior	3	2,95	0,05	1,66
Altura Plato superior	4	4	0	0
Diámetro Plato inferior	0,38	0.375	0,005	1,31
Diámetro Plato superior	0,30	0.295	0,005	1,66

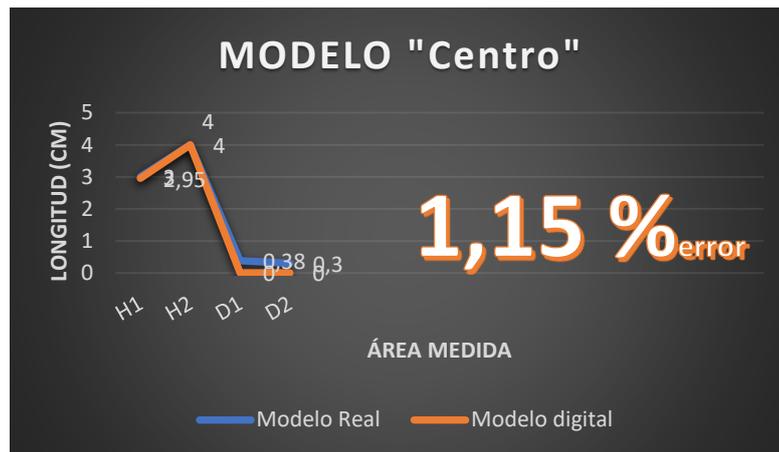


Gráfico 2: Representación gráfica de resultados provenientes de la Tabla 9. (Elaboración propia)

El Gráfico 2 sirve para tabular los resultados obtenidos del modelo de nube de puntos del segundo grupo de pruebas, correspondiente al modelo "centro" de los datos obtenidos del programa de reconstrucción digital y poder compararlo con los valores reales del mismo. En la gráfica se representan los valores extraídos de la Tabla 9, donde la serie azul reproduce los valores reales del objeto, y la serie naranja reproduce los la unidades de valor del objeto digital de nube de puntos respectivamente.

Analizando el porcentaje de error entre ambas series se obtuvo que es de un 1,15 % en promedio de todas las medidas correspondientes.

4.2.2 CASO DE ESTUDIO GRUPO B

En el segundo grupo de prueba, tomamos como referencia los parámetros de posicionamiento tanto de los objetos, del equipo de captura para definir la distancia focal y los ángulos de orientación de la cámara. Adicionalmente se tomaron en cuenta algunos parámetros como la textura del objeto, la iluminación y la base y fondo donde estaría ubicado el objeto. Todo esto para mejorar la técnica fotogramétrica. Estas pruebas fueron realizadas con tres objetos que se describen a continuación:

4.2.2.1 Pelota

Como se aprecia en la Figura 32, se obtuvo un resultado bastante representativo del objeto real vs. el objeto digitalizado con las imágenes tomadas previamente del mismo, donde se observa el elemento casi igual. Se aprecian

algunas irregularidades las cuales se tomaron en cuenta para corregir en las siguientes pruebas, que se describe a continuación:

- El olor o brillo del elemento se debe tomar en cuenta, ya que al hacer contacto con los rayos de luz crea un resplandor muy pequeño, pero que al programa le cuesta identificar y arroja como resultado una especie de incremento en la superficie del elemento.
- Aunque se colocó un fondo negro de base para evitar la mezcla de textura entre las superficies el objeto se reprodujo con algunas irregularidades en sus bordes. Posiblemente por el brillo mencionado anteriormente.



Figura 32: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 1 del grupo de pruebas B, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado. (Elaboración Propia)

Tabla 10: Comparación de datos reales del modelo 1 del segundo grupo de pruebas vs. Objeto digital. (Elaboración propia)

Datos	Longitud Real (cm)	Unidad de medida Digital (cm)	Diferencia (cm)	% error
Diámetro	8	8,022	0,022	0,2

En este modelo no se puede graficar ya que son puntos debido a los datos referenciados, ya que son dos puntos que difieren por 0,022 cm con un margen de error de 0,2%.

4.2.2.2 Caja

Como se aprecia en la Figura 33, el resultado que se obtuvo de la reconstrucción digital con respecto al objeto original, fue un resultado bastante representativo donde se puede observar el elemento casi idéntico. Se aprecian

algunas irregularidades las cuales se tomaron en cuenta para corregir en las siguientes pruebas. A continuación, se describen algunos aspectos que se tomaron en cuenta del objeto anterior con respecto a este:

- Como se mencionó en el objeto anterior, el brillo que se reflejaba por el color o brillo del elemento se debe tomar en cuenta, en este caso tomamos un elemento de color mate que no reflejara al contacto con los rayos de luz, mejorando notablemente los huecos de las superficies.
- Aunque se colocó un fondo negro de base para evitar la mezcla de textura entre las superficies el objeto se reprodujo con algunas irregularidades en sus bordes. Posiblemente por el brillo mencionado anteriormente.



Figura 33: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 2 del grupo de pruebas B, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado. (Elaboración Propia)

Tabla 11: Comparación de datos reales del modelo 2 del segundo grupo de pruebas vs. Objeto digital calibrando uno de sus ejes. (Elaboración propia)

Datos	Longitud Real (cm)	Unidad de medida Digital (cm)	Diferencia (cm)	% error
Altura	7	6,784	0,216	3,08
Base	9	8,928	0,072	0,8
Profundidad	9	9	0	0

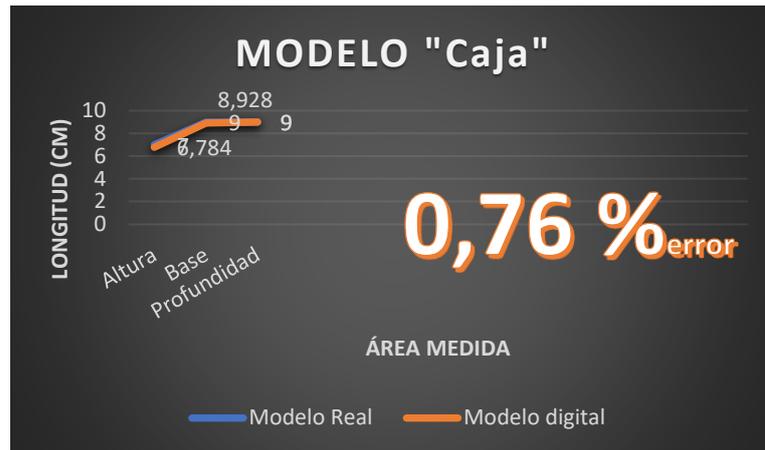


Gráfico 3: Representación gráfica de resultados provenientes de la Tabla 9. (Elaboración propia)

El Gráfico 3 sirve para tabular los resultados obtenidos del modelo de nube de puntos del segundo grupo de pruebas, correspondiente al modelo “caja” de los datos obtenidos del programa de reconstrucción digital y poder compararlo con los valores reales del mismo. En la gráfica se representan los valores extraídos de la Tabla 11, donde la serie azul reproduce los valores reales del objeto, y la serie naranja reproduce los la unidades de valor del objeto digital de nube de puntos respectivamente.

Analizando el porcentaje de error entre ambas series se obtuvo que es de un 0,76 % en promedio de todas las medidas correspondientes.

4.2.2.3 Casa

Como se aprecia en la Figura 34, el resultado que se obtuvo de la reconstrucción digital con respecto al objeto original, fue un resultado bastante representativo y con mucha similitud, donde se puede observar el elemento casi idéntico. Se aprecian algunas irregularidades las cuales se tomaron en cuenta para corregir en las siguientes pruebas. A continuación, se describen algunos aspectos que se tomaron en cuenta del resultado obtenido:

- Aunque el elemento tenía un color uniforme, y era mate, la reproducción digital se creó con ciertos huecos, especialmente en los centros geométricos del objeto. Esto indica que, aunque se hayan tomado las consideraciones de los parámetros de las pruebas anteriores, el software tiende a realizar estos errores por razones que deben investigarse en otro proyecto ya que se sale de nuestro campo de investigación por ser algo más técnico.

- Teniendo en cuenta que las dimensiones no son relativas un eje con respecto al otro, es decir no son equidistantes como es el caso del cuadrado o la circunferencia, en este caso se tomó en cuenta la calibración del objeto, y se ajustó



Figura 34: A la izquierda la imagen del objeto real del modelo 3 del grupo de pruebas B, y a la derecha la imagen del objeto ya digitalizado. (Elaboración Propia)

Tabla 12: Comparación de datos reales del modelo 3 del segundo grupo de pruebas vs. Objeto digital calibrando uno de sus ejes. (Elaboración propia)

Datos	Longitud Real (cm)	Unidad de medida Digital (cm)	Diferencia (cm)	% error
Base	30	30	0	0
Altura	20	19,30	0,7	3,5
Profundidad	18	17,51	0,5	2,7
Altura techo	28,5	27,6	0,9	3,15
Base techo	32	31,78	0,22	0,68
Profundidad techo	22	21,77	0,23	1,04

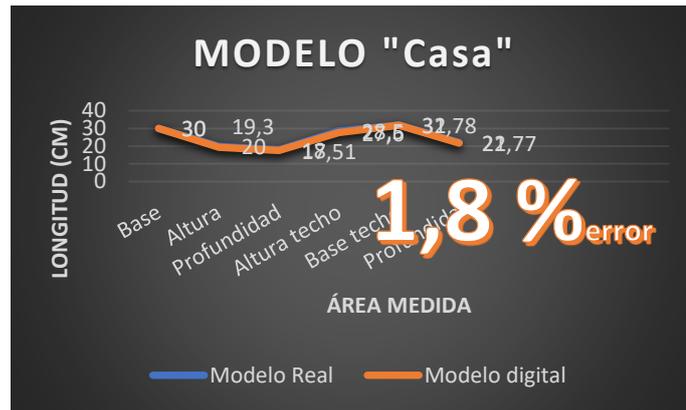


Gráfico 4: Representación gráfica de resultados provenientes de la Tabla 9. (Elaboración propia)

El Gráfico 4 sirve para tabular los resultados obtenidos del modelo de nube de puntos del segundo grupo de pruebas, correspondiente al modelo “caja” de los datos obtenidos del programa de reconstrucción digital y poder compararlo con los valores reales del mismo. En la gráfica se representan los valores extraídos de la Tabla 12, donde la serie azul reproduce los valores reales del objeto, y la serie naranja reproduce los la unidades de valor del objeto digital de nube de puntos respectivamente.

Analizando el porcentaje de error entre ambas series se obtuvo que es de un 1,8 % en promedio de todas las medidas correspondientes.

4.2.3 ASO DE ESTUDIO GRUPO C

Una vez estudiado los parámetros que establece la técnica de fotogrametría en el capítulo 2 en los grupos de prueba A y B, y teniendo una interacción más estrecha con el software de reconstrucción digital, en esta fase de pruebas no se busca representar gráficamente las diferencias de calibración, sino se busca representar la superposición del objeto reconstruido digitalmente con respecto al objeto inicial del proyecto, e iniciar la compatibilidad de los resultados obtenidos. Las nubes de puntos se importan al programa del modelo original, que en este caso es para comprobar la geometría entre ambos modelos, se utilizó el software AutoCAD. Este grupo de pruebas se dividió en varias fases que se describen a continuación:

4.2.3.1 Fase 1

En la Figura 35 se puede observar la representación gráfica del objeto empleado como modelo y el resultado bastante representativo del objeto real vs. el

objeto digitalizado con las imágenes tomadas previamente del mismo. Se observa el elemento casi igual al original, exceptuando algunas irregularidades que sirven para poder aplicarla al modelo digital y comprobar la funcionalidad de estos modelos en proyectos reales.



Figura 35: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha modelo de nube de puntos fase 1, generado con Recap 360.(Elaboración propia)

Los resultados obtenidos de la primera fase del modelo de nube de puntos, donde se encuentra un objeto, se cotejaron con el modelo original realizado en AutoCAD. Al importar la nube de puntos al modelo digital, el programa lo asume como un único elemento que ingresa con unas dimensiones diferentes a las tomadas en la reconstrucción digital que son:

X: 28.242,17 m

Y: 27.980,20 m

Y para poder ajustar el objeto a la escala real según los planos originales se usó la escala de valor 0,0033 y obtener como resultado la superposición que se observa en la Figura 36 con una diferencia entre el diseño digital y la nube de puntos con los siguientes valores:

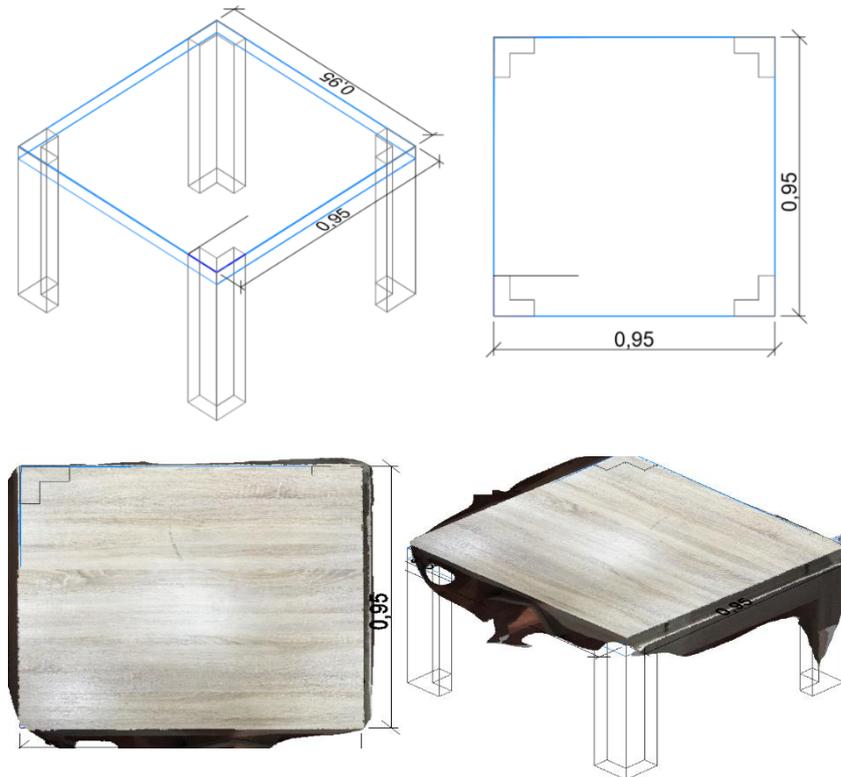


Figura 36: en la parte superior de la imagen, el modelo digital original, en la imagen inferior, la superposición de la nube de puntos sobre el modelo digital realizado en AutoCAD.(Elaboración Propia)

4.2.3.2 Fase 2

Esta fase representa el avance del proyecto en el cual se implanta un primer elemento como se observa en la Figura 37, en el que la representación gráfica del objeto empleado como modelo da un resultado bastante real con respecto al digitalizado por medio de las imágenes previas del mismo. Se observa el elemento casi igual al original, exceptuando algunas irregularidades que sirven para poder aplicarla al modelo digital y comprobar la funcionalidad aplicada a proyectos reales.



Figura 37: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha modelo de nube de puntos fase 2, generado con Recap 360.(Elaboración Propia)

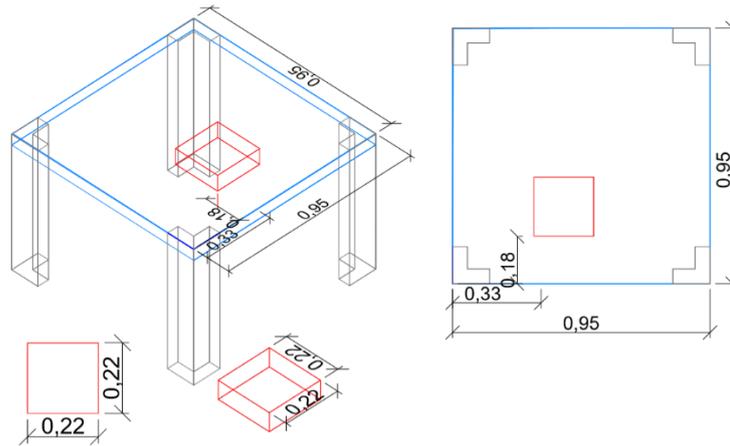


Figura 38: Distancias del modelo digital de la Fase 2 tomada de AutoCAD.(Elaboración Propia)

Al importar la nube de puntos al modelo digital, el programa lo asume como un único elemento que ingresa con unas dimensiones diferentes a las tomadas en la reconstrucción digital que son:

X: 28.242,17 m

Y: 27.980,20 m

Y para poder ajustar el objeto a la escala real según los planos originales se usó la escala de valor 0,0033 y obtener como resultado la superposición que se observa en la Figura 39.

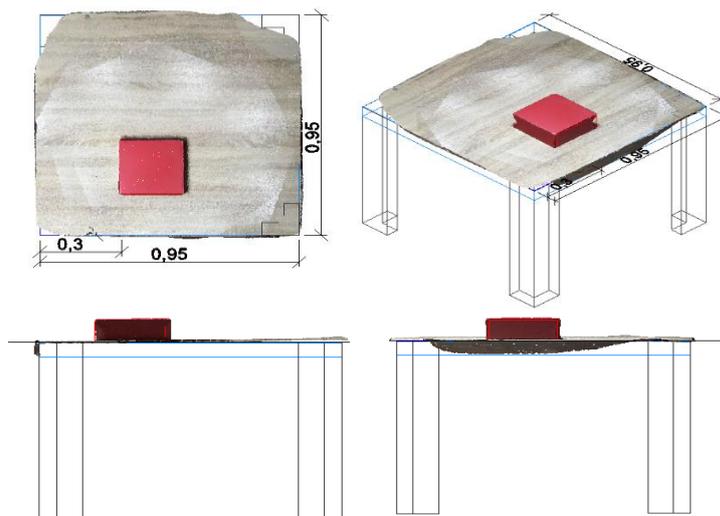


Figura 39: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en AutoCAD. Alzado, vista de planta, lateral y frontal.(Elaboración Propia)

4.2.3.3 Fase 3

Esta fase representa el segundo elemento añadido como se observa en la Figura 40. La representación gráfica del objeto empleado como modelo cuyo resultado es bastante representativo del objeto real con respecto al digitalizado por medio de las imágenes previas del mismo.



Figura 40: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha el modelo de nube de puntos, fase 3, generado con Recap 360.(Elaboración Propia)

En esta imagen se observa el elemento casi igual al original, exceptuando algunas irregularidades como vacíos en el relieve del objeto y esto se debe a la reflexión de la luz sobre la superficie. Efecto que se menciona en las pruebas realizadas anteriormente, en cuanto a las texturas de los objetos y los resultados que se pueden obtener de ellas.

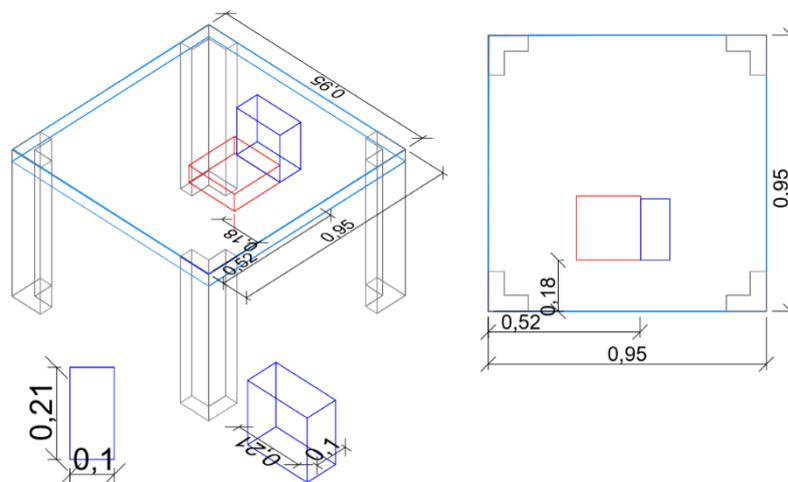


Figura 41: Distancias del modelo digital de la Fase 3 tomada de AutoCAD.(Elaboración Propia)

Al importar la nube de puntos al modelo digital, el programa lo asume como un único elemento. Y para poder ajustar el objeto a la escala real según los planos originales se usó la escala de valor 0,0030 y obtener como resultado la superposición que se observa en la Figura 42.

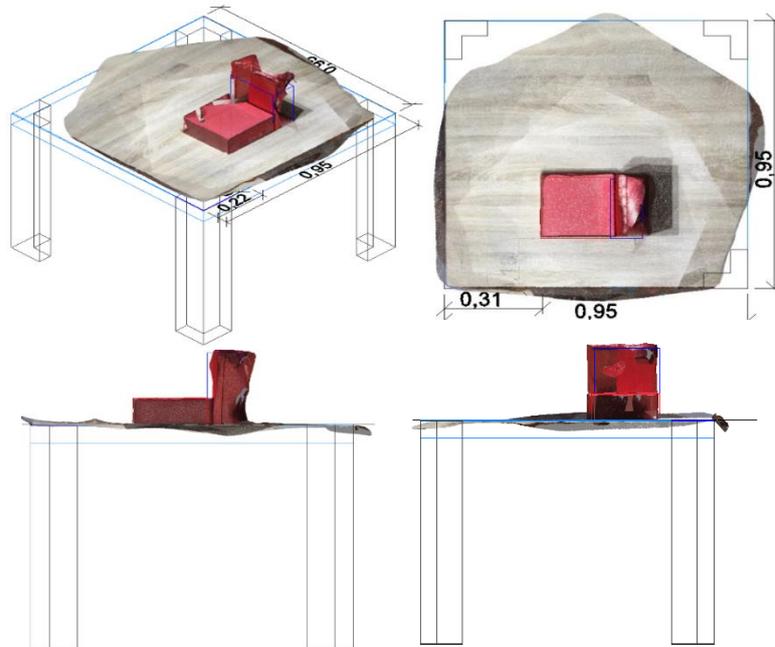


Figura 42: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en AutoCAD. Alzado, vista de planta, lateral y frontal. (Elaboración Propia)

4.2.3.4 Fase 4

En esta fase se adiciona otro elemento como se observa en la Figura 43, la representación gráfica del objeto empleado como modelo cuyo resultado es bastante representativo del objeto real con respecto al objeto digitalizado por medio de las imágenes previas del mismo. Se observa el elemento casi igual al original, exceptuando algunas irregularidades que sirven para poder aplicarla al modelo digital y comprobar la funcionalidad de estos modelos aplicados a proyectos reales.

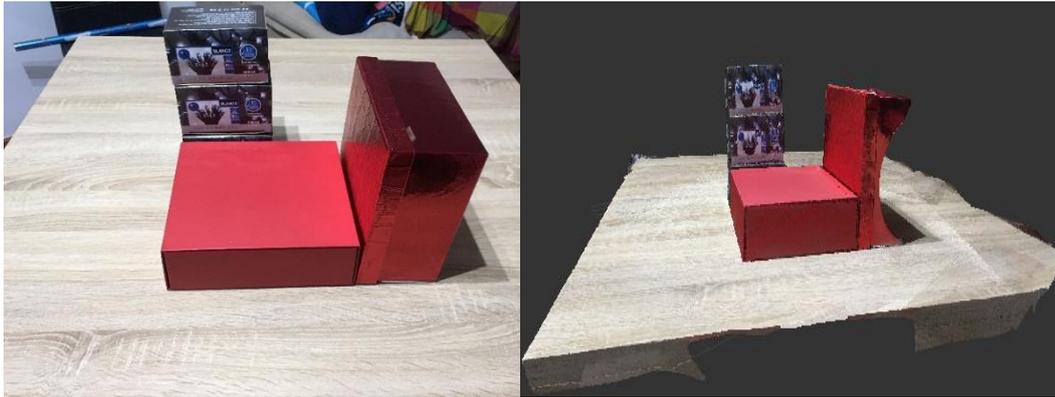


Figura 43: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha el modelo de nube de puntos, fase 4, generado con Recap 360. (Elaboración Propia)

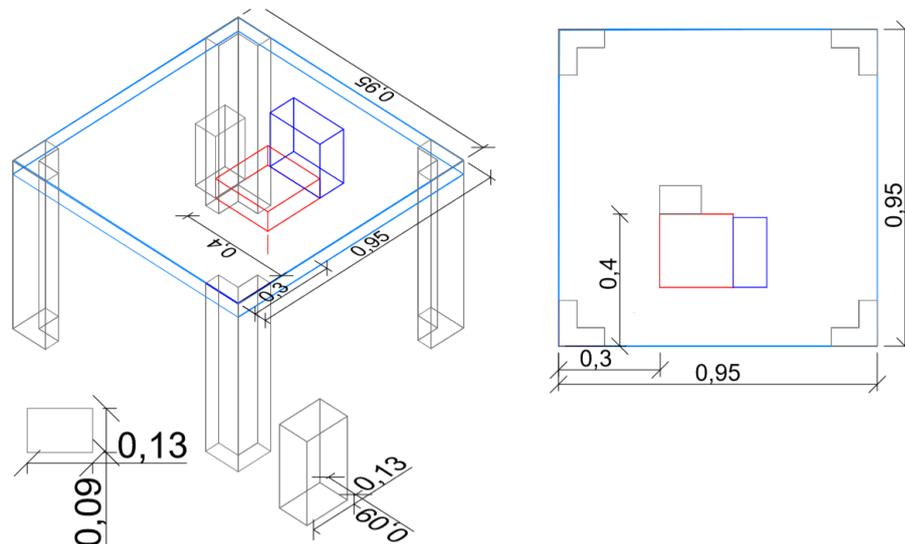


Figura 44: Distancias del modelo digital de la Fase 4 tomada de AutoCAD. (Elaboración Propia)

Al importar la nube de puntos al modelo digital, el programa lo asume como un único elemento. Y para poder ajustar el objeto a la escala real según los planos originales se usó la escala de valor 0,0031 y obtener como resultado la superposición que se observa en la Figura 45.

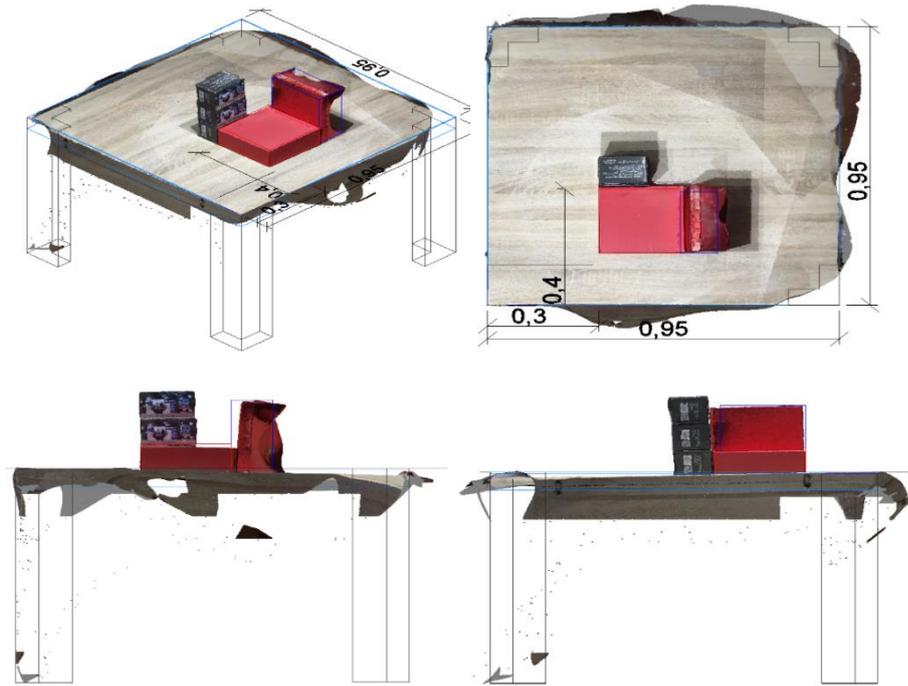


Figura 45: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en Autocad. Alzado, vista de planta, lateral y frontal. (Elaboración Propia)

4.2.3.5 Fase 5

Esta última fase, representa el cuarto objeto añadido como se observa en la Figura 46, la representación gráfica del objeto empleado como modelo cuyo resultado es bastante parecido, exceptuando los errores de superficies huecas del objeto real con respecto al digitalizado en el objeto de textura metalizada.



Figura 46: A la izquierda foto del elemento original, a la derecha el modelo de nube de puntos, fase 5, generado con Recap 360. (Elaboración Propia)

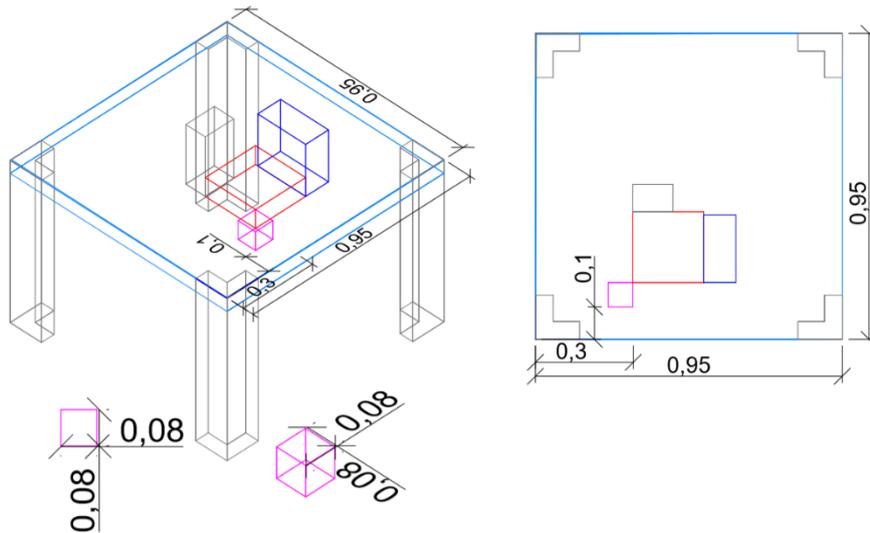


Figura 47: Distancias del modelo digital de la Fase 5 tomada de AutoCAD. (Elaboración Propia)

Al importar la nube de puntos al modelo digital, el programa lo asume como un único elemento. Y para poder ajustar el objeto a la escala real según los planos originales se usó la escala de valor 0,0031 y obtener como resultado la superposición que se observa en la Figura 48.

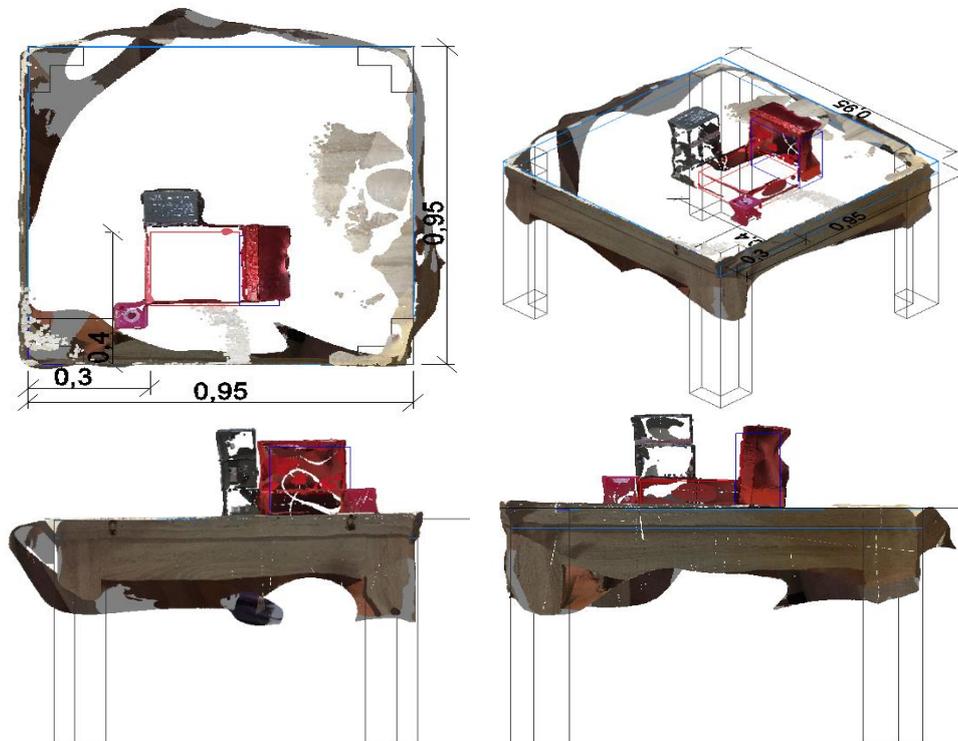


Figura 48: Superposición del modelo de nube de puntos sobre el modelo digital en Autocad. Alzado, vista de planta, lateral y frontal. (Elaboración Propia)

4.2.4 JUSTIFICACIÓN DE LOS MODELOS PREVIOS

En las primeras pruebas se detectaron algunos errores que permitieron mejorar el procedimiento de la digitalización para desarrollar el caso de uso definitivo, percibiendo detalles como:

✓ La inclinación en la que se tomaron las fotografías para la primera prueba (una silla) no fueron apropiadas debido a que el elemento tenía muchos vacíos y no se tenía una percepción total para reconstruirlo, además que se necesitaban más imágenes ya que 20 no eran suficientes para tener un objeto final perfecto o con un nivel de detalle preciso.

✓ La cantidad de fotografías para adquirir un objeto preciso influye mientras el objeto o elemento tenga más detalles que se quieran reflejar.

✓ Se colocó el objeto (prueba 2: una taza), en una base giratoria que permitiera realizar las capturas en ráfaga teniendo el objeto en fotos a sus 360°, pero se observó que, utilizando esta técnica de captura, el programa no entiende ni asume algunos puntos de relación entre los solapes de las imágenes y genera un elemento con distorsión.

✓ La iluminación es un factor importante, a tal efecto se realizaron pruebas con luz natural y artificial para poder tener puntos de comparación, ya que un elemento estructural, generalmente se encuentra en una zona externa expuesto a la luz natural.

✓ Con el tercer objeto que fue un centro de mesa se corrigieron los detalles mencionados en los puntos anteriores y se obtuvo un resultado favorable, con lo cual se dio paso a la aplicación en el caso de uso.

4.3 MODELO DEL CASO DE USO

Ya teniendo un conocimiento previo de los conceptos y procedimientos en la etapa de investigación y habiendo establecido un método de prueba en el que el muestreo fue el centro de desarrollo de este trabajo investigación, se establecen todos los parámetros y mejoras obtenidos de cada grupo de prueba aplicados al caso de uso donde se realizara la digitalización, generando un modelo de reconstrucción digital 3D, en el cual se simulan las fases de diseño de un proyecto

convencional desde una maqueta diseñada a escala para verificar la funcionalidad con respecto al modelo en digital basado en los planos originales.

Este caso de uso se llevará a cabo sobre una maqueta de tres edificios, que representa los elementos constructivos representados con edificios rectangulares colocados a unas distancias establecidas entre si previamente, situados sobre una base que representa el terreno real de una obra, donde se aplicarán las técnicas escogidas y así poder poner en práctica el flujo de trabajo establecido en la metodología de este proyecto.

Con las pruebas realizadas a los grupos de prueba A y B y C se ha logrado tener una interacción más estrecha con el software de reconstrucción digital, en esta fase de pruebas lo que se busca es representar el estado inicial del proyecto, y comparar la compatibilidad de los resultados obtenidos, que son de las nubes de puntos exportados al programa del modelo original, que, en este caso para comprobar la geometría entre ambos modelos, se utilizó el software Revit.

4.3.1 DIGITALIZACIÓN

El caso de estudio principal involucra el modelado y digitalización de tres edificios, la única documentación existente son los planos en el modelo Revit ya que no es una edificación real. Los edificios A y B cuenta con cuatro plantas de 5 m cada una haciendo una altura total de 20 m y el edificio C de 14m de altura, y todos ellos tiene una base de 15,50 m y una profundidad de 12,50 m, como se puede apreciar en la Figura 49 se encuentran los edificios reales vs el modelo a escala digitalizado en el programa Revit como un modelo paramétrico basado en objetos con propiedades y parámetros definidos que podrían alimentar en un proceso BIM real.

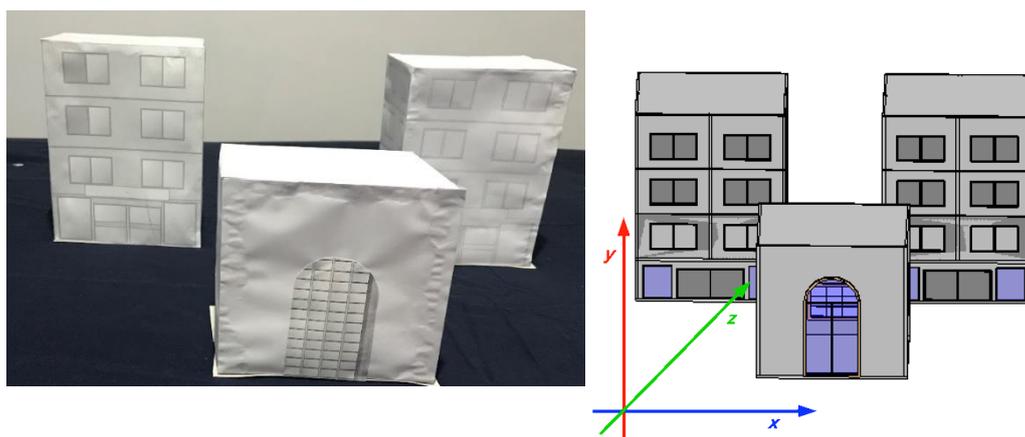


Figura 49: La imagen superior representa la maqueta real, la imagen inferior representa la maqueta digitalizada en Revit. (Elaboración Propia)

Realizar este paso se encuentra directamente vinculado al objetivo específico de este trabajo donde se establece elaborar un modelo digital el cual se va a tomar como referencia para realizar la comprobación de los modelos de nubes de puntos creados a partir de la reconstrucción fotográfica, ya que se modelaron edificios en entorno 3D con vistas 2D. Este modelo nos ayudará a establecer una comparativa de los tres flujos de trabajo. Al final tomó la misma cantidad de tiempo realizar cada modelo, principalmente porque el diseño de los objetos se realizó de forma mecanizada.

4.3.2 RECONSTRUCCIÓN

Este procedimiento es posterior a la captura de imágenes realizada a la maqueta, en la cual se establecieron las distancias focales y los ángulos de captura según el apartado 2.3.3 en el método general de la fotogrametría que se explica brevemente a continuación:

- Calibración de la cámara: la resolución de la cámara utilizada es de 8 megapíxeles, y las imágenes tiene una resolución de 3264x2448píxeles. Cuenta con un Flash dual led y una apertura focal f/22. El modo de captura que se eligió para las imágenes fue el modo 1:1.
- Elección del escenario: se escogió una base plana con unas dimensiones de 0,90x0,90 m, con luz natural y en algunos casos con ayuda de luz artificial para reducir los efectos de sombra.

- Distancia y circunferencia focal: las imágenes fueron tomadas a una distancia de 45 y 65cm respectivamente, creando con este diámetro la circunferencia focal ya que era la necesaria para capturar con el lente el encuadre completo de los objetos.
- Ángulos de captura: se estableció una primera serie de capturas de imágenes completamente perpendicular al objeto (ángulo 0°), posteriormente se realizaron capturas con un ángulo de inclinación de la cámara de 45° y luego a 90° . EL posicionamiento de la cámara se colocó dividiendo la circunferencia en 16 puntos de captura.



Figura 50: Ejemplo de cómo se realizó la circunferencia focal, la ubicación del dispositivo de captura y su ángulo de inclinación. (Elaboración Propia)

Como se ha dividido la reconstrucción digital de este modelo en tres etapas, a cada una de ellas se le realizaron una secuencia de captura entre 55 y 60 imágenes aproximadamente, ya que el programa requiere como mínimo 20 fotografías para la reconstrucción del objeto.

Los tiempos de captura de imágenes fueron muy similares. Sin embargo, la principal diferencia entre este modelo y los anteriores es que a este punto se conocían los factores que generaban incongruencia en los modelos y los parámetros necesarios para llevar a cabo la acción en una forma rápida y ágil.

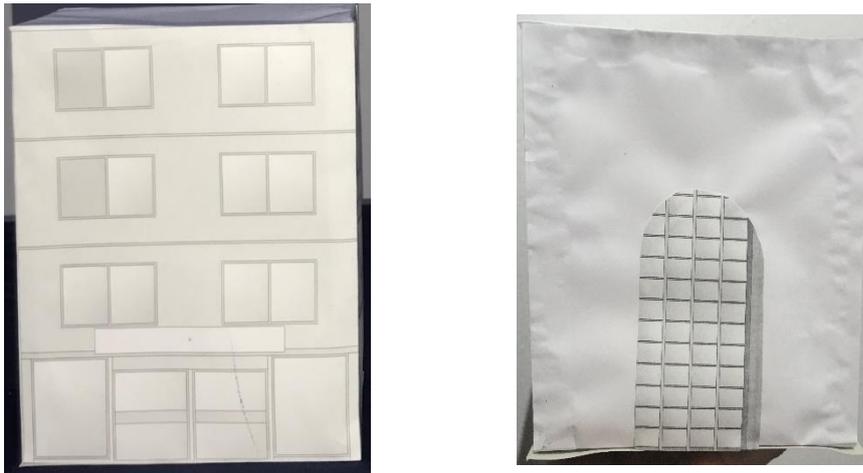


Figura 51: A la izquierda el modelo del edificio A y B, y a la derecha el modelo del edificio C.(Elaboración Propia)

4.3.2.1 Caso de estudio edificio A y B

A continuación, se muestran los resultados de la digitalización de los edificios del modelo elaborado en Revit con respecto al modelo de nube de puntos exportada a formato .rcs, con la ayuda de la Tabla 6 del apartado 3.4.4 en conversión de formato. En esta sección se mostrarán los edificios individuales.

En la Figura 52 se muestran los resultados obtenidos tanto del modelado del edificio A y B en comparación con el modelo reproducido a través de la técnica fotogramétrica con la recolección de imágenes. Se puede observar que la reproducción se ejecutó correctamente y con muy pocas irregularidades.

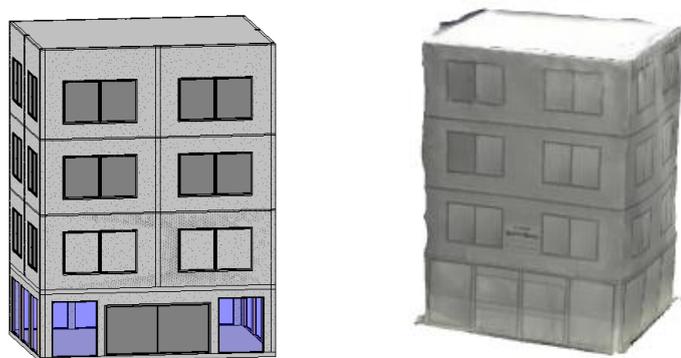


Figura 52: A la izquierda se muestra la imagen del modelo creado en Revit del edificio A y B, y a la derecha el modelo de nube de puntos reproducido con la técnica fotogramétrica.(Elaboración Propia)

Posteriormente a la reproducción digital de la nube de puntos y una vez exportada al formato correspondiente que es compatible con el software de Revit, se procede a la integración de la nube de puntos en el modelo digital de los edificios para comprobar la similitud de ambos objetos, como se puede observar los resultados en la Figura 53



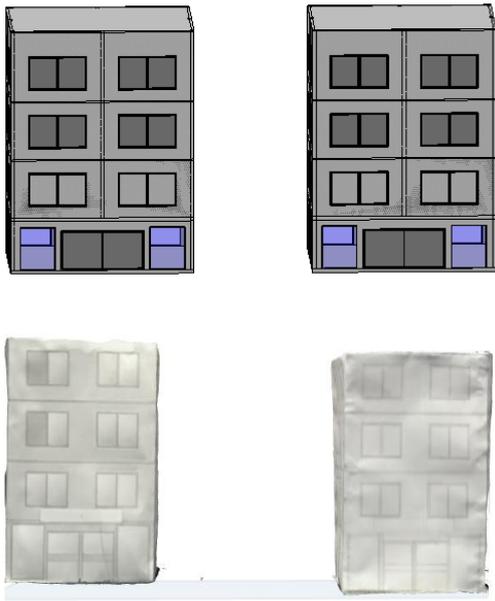
*Figura 53: Sobre posicionamiento del modelo de nube de puntos en el modelo Revit desde varias caras del edificio.
Elaboración Propia*

4.3.2.2 Caso de estudio de edificios A, B y C

En esta sección se mostrarán ambos edificios, a continuación, se exponen los resultados de la digitalización de los edificios del modelo elaborado en Revit con respecto al modelo de nube de puntos exportada a formato .rcs, con la ayuda de la tabla 4 del apartado 3.4.4 en conversión de formato.

En la Figura 54 se muestran los resultados obtenidos tanto del modelado del edificio A y B en comparación con el modelo reproducido a través de la técnica fotogramétrica con la recolección de imágenes. Se puede observar que la reproducción se ejecutó correctamente y con muy pocas irregularidades

Posteriormente a la reproducción digital de la nube de puntos y una vez exportada al formato correspondiente que es compatible con el software de Revit, se procede a la integración de la nube de puntos en el modelo digital de los edificios para comprobar la similitud de ambos objetos, como se puede observar los resultados en la Figura 55.



Se debe destacar que los modelos se ajustaron a su valor real de diseño para que la integración con respecto al modelo digital no representara errores de escala o aproximaciones.

Figura 54: La imagen superior muestra la imagen del modelo creado en Revit del edificio A y B, y la inferior el modelo de nube de puntos reproducido con la técnica fotogramétrica.
Elaboración Propia

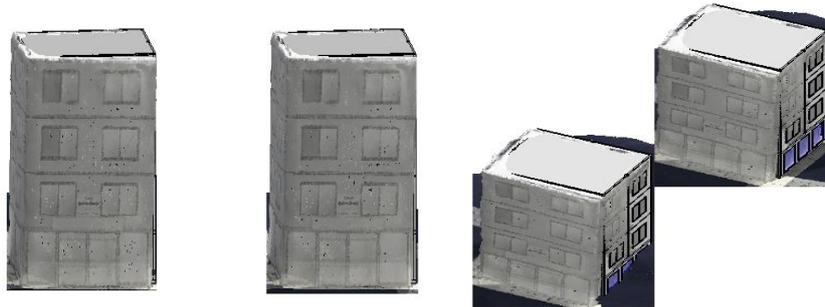


Figura 55: Sobre posicionamiento del modelo de nube de puntos en el modelo Revit desde varias caras del edificio.(Elaboración Propia)

A continuación, como secuencia del procedimiento anterior se realizó la misma prueba, pero ahora incluyendo el tercer y último edificio. Con la experiencia obtenida en las pruebas anteriores, se notó el procesado de la imagen más rápido y con menos deficiencia que en casos previos. Todas las nubes de puntos una vez generadas, se registra en el programa como un archivo con extensión “rcp” y posteriormente se podrán convertir del formato de nube de puntos “rcs”, de Autodesk que se realiza en Autodesk Revit con la opción de indexar el documento.

El proceso involucró cargar las nubes de puntos al software y usarlos como una guía para escalar y comparar los elementos geométricos del edificio.

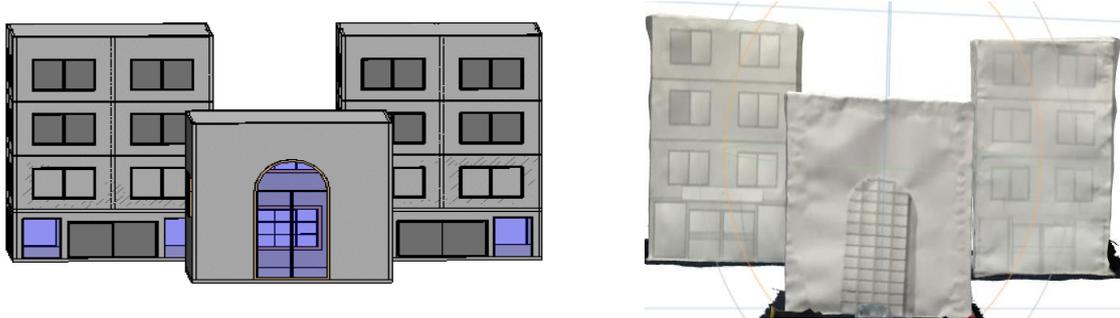


Figura 56: La imagen superior muestra la imagen del modelo creado en Revit del grupo completo del caso de uso, y la inferior el modelo de nube de puntos reproducido con la técnica fotogramétrica. (Elaboración Propia)

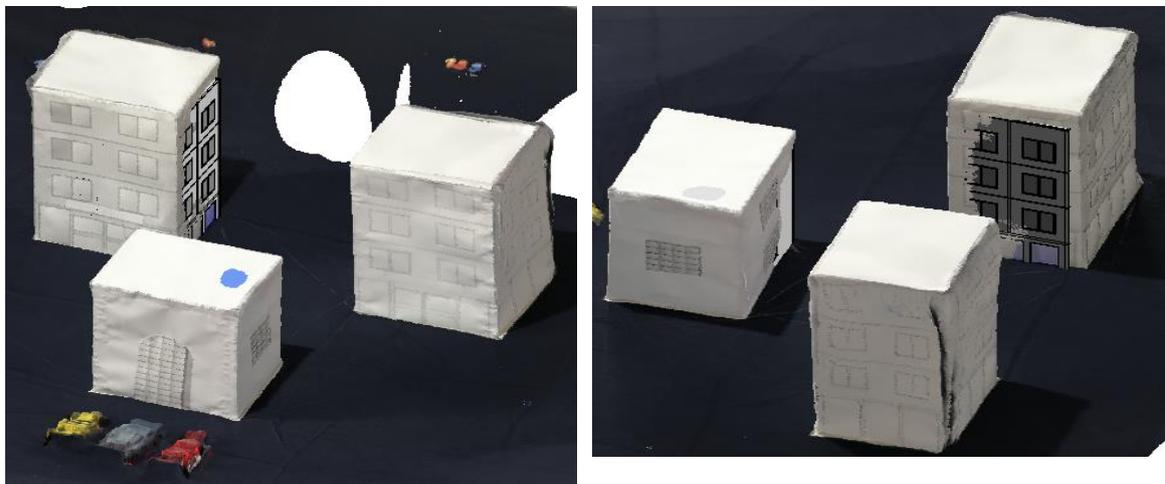


Figura 57: Sobre posicionamiento del modelo de nube de puntos en el modelo Revit desde varias caras del edificio. (Elaboración Propia)

4.3.3 DISCUSIÓN

El objetivo del trabajo realizado en este capítulo, se llevó a cabo con la finalidad de poner en práctica el estado del arte en el flujo de trabajo para tomar nubes de puntos derivados de la reconstrucción digital y producir un modelo 3D que sería apropiado para comprobar proceso BIM. Los casos de estudio se pueden dividir en tres partes principales:

- Colección de Datos
- Procesamiento
- Modelado

De los tres procedimientos, la cantidad de captura de imágenes requiere una tarea que requiere tiempo y precisión por el posicionamiento tanto de las distancias como de los ángulos, sin embargo, el procedimiento para capturar datos era el mismo en todas las pruebas ya que es un requisito y mientras más capturas de imágenes se obtengan se podrá minimizar las oclusiones agregando y controlando las configuraciones requiere tiempo y cuidado dentro del mismo software.

Después de la recopilación de datos viene el paso de procesamiento de los mismos, que se realiza de una forma homogénea y geoméricamente consistente. Aunque relativamente sencillo, puede llevar mucho tiempo en función de los volúmenes del objeto y si los datos son altos. Tanto la detección de objetivos deliberados, sombras y esferas, así como las características en la escena. Sin embargo, no siempre se encontró con este defecto en todos los objetos.

la intervención del usuario se requiere a menudo limpiar manualmente las secciones que identifica incorrectamente de objetos que detecta el software causando la coincidencia con el modelo.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Se ha visto como el uso y aplicación de la técnica de la fotogrametría ha evolucionado y cada vez más se observa su uso en distintas áreas y especialidades. En este caso en particular se quiere comprobar su función y eficiencia en el sector de la construcción, específicamente en la fase de ejecución de proyectos.

De forma resumida se ha estudiado la funcionabilidad de la aplicación de la técnica fotogramétrica en la digitalización de objetos, creando modelos de nubes de puntos que permitan estudiarlos y aplicar los resultados de esta investigación en casos de usos reales. Este estudio se ha incorporado dentro de un proceso experimental de elementos no constructivos que simulan las fases de ejecución de un proyecto cuyos resultados reflejan derivaciones positivas para el objetivo que se estaba buscando en este caso en particular.

Sin embargo, aún hay criterios no definidos en los factores de conversión y de aproximación en los elementos digitalizados, así como también en la interpretación de los modelos generados como nubes de puntos por parte de los software que actualmente se utilizan, ya que son capaces adjuntar la nube de puntos dentro de la unidad de trabajo adoptándolos como un único objeto. De momento es necesario linealizar los objetivos y alcances para su puesta en uso y obtener criterios de valoración más cuantitativos que cualitativos.

De acuerdo con el razonamiento que se ha venido realizando, se puede dar mención a las conclusiones obtenida mediante los resultados analizados en el capítulo anterior, en el cual se realizaron tablas y gráficos, debidamente explicados, extraídos de la fuente de los programas empleados para modelar tanto la prueba digital, que servirá de piloto, como la nube de punto de cada modelo. Por esta razón concluimos que:

- En las primeras pruebas fue necesario establecer un eje de rotación que permitiera al programa tener un punto de referencia central en común para todas las imágenes, ya que al momento de realizar el análisis digital deben existir puntos similares que coincidan entre imágenes para que exista una asociación y relación en la secuencia de captura de imágenes, de este modo

se logra la reproducción digital uniforme del elemento a sus 360° y no se reproducen objetos planos o de una sola cara.

- El ángulo de captura representa una característica importante en la captura de las imágenes para poder obtener el mayor detalle posible de los espacios ocultos del objeto y poder reproducirlos en la digitalización del mismo, ya que si no se toma en cuenta al momento de obtener las fotografías aparecerán irregularidades en la nube de puntos. Después de realizar varias pruebas, se concluyó que los ángulos que fueron de utilidad en la captura de imágenes en relación al objeto con respecto a los ángulos de inclinación de la cámara de 0°, 45° y 90° que permitió captar los elementos den su totalidad.

- La distancia que se adopta para capturar las imágenes es importante ya que en función a ella se obtiene una visibilidad completa o no del objeto en el marco de fotografía, lo que resulta significativo ya que al momento de reproducir el objeto digitalmente se crea una distorsión en la nube de puntos que hace aumentar las dimensiones del objeto. Las distancias que se establecieron fueron:

- Desde el objeto al eje focal del trípode con la cámara de 45cm y 65 cm.
- A la altura (eje Y) de la cámara se probó a 10cm, 20cm, 30cm y 50cm.

Es importante tomar en cuenta estas alturas y distancias focales ya que los objetos utilizados para realizar las pruebas no superaban los 30cm de altura, 20 cm de ancho y 20 cm de profundidad.

- Una referencia clara de los dispositivos que se deben usar para llevar a cabo la reconstrucción digital por medio de láser y escáner que son las técnicas más desarrolladas en la actualidad, pero también las que requieren una mayor inversión lo encontramos en el artículo Escáner 3D: mejores 27 escáneres 3D, aplis y software 2018 escrito por Übel, Max von

- Los resultados son cuantificables, ya que se pueden calcular las distancias del modelo de nube de puntos y compararlas con el modelo digital. Tales comparaciones también son visuales como se observan en

las figuras correspondientes a cada fase en la superposición de la nube de puntos sobre el modelo digital.

- Es factible integrar la nube de puntos al archivo de Revit para poder realizar las comparaciones como un único elemento, aunque esta debe escalarse para ajustarla al tamaño real, donde la escala debe calcularse dentro del mismo dibujo.
- Es importante destacar que el escaneo puede arrojar problemas comunes como zonas huecas e irregularidades y esto se puede deber a los brillos, materiales metalizados o satinados y los reflejos por la incidencia de los rayos de luz, algunas soluciones que se pueden mencionar son:
 - Las superficies metálicas pueden pintarse en colores mate para quitar el brillo.
 - Realizar doble polarización en la captura de la imagen, en casa de estar usando cámara fotográfica una se le coloca al objetivo del lente y el otro polarizador se debe colocar en la fuente de luz.
 - El filtrado de la imagen.

En consecuencia, se determina que la funcionabilidad del modelo de nube de puntos en las diferentes fases creadas aporta resultados visuales que le atribuyen un valor calculable por los programas de diseño.

La proximidad de estos modelos creados en base a la reconstrucción digital a través de la técnica fotogramétrica para ser aplicada a la metodología BIM resulta muy factible y próxima a su implementación a gran escala, en este trabajo de investigación nos centramos en llevar a cabo la implementación de esta técnica a bajo costo con herramientas y elementos asequibles a cualquier usuario y con medios de aplicación inmediata.

5.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN. RECOMENDACIONES

Como continuación al desarrollo de esta investigación, se recomienda abrir nuevas líneas de investigación para el desarrollo de las herramientas de visualización en base a los modelos creados por digitalización fotogramétrica que pueden ser aprovechadas en diversas formas. De la misma manera se deja abierta la investigación para dar continuidad al análisis de su aplicación en fases de ejecución en proyectos de obras civiles que se puedan mejorar y hacer uso en estas prácticas en el marco de la construcción.

En tal sentido se sugiere extender esta investigación, planteando su uso en elementos estructurales sencillos como vigas, columnas y fundaciones que representan componentes pequeños dentro de la ejecución de una obra y pueden cumplir con los parámetros de captura y reproducción digital.

Durante la finalización de esta investigación la plataforma Autodesk incluyó en la actualización del Recap 360 la posibilidad de trabajar con dispositivos tablets que permite realizar escaneos para una digitalización más exacta. Es por ello que se recomienda la aplicación de esta tecnología ya que optimiza los resultados y reduce el margen de error.

Adicionalmente se recomienda la implementación de dispositivos como drones en obras civiles, ya que amplía la capacidad de captura y reproducción de elementos, permitiendo desarrollar no solo pequeños elementos estructurales sino avances de losas, paredes, muros, entre otros.

Es importante mencionar que existen empresas que se dedican a realizar estos trabajos de reconstrucción digital a nivel industrial y empresarial en los sectores de edificación, infraestructura, patrimonio, cartografía, escenarios virtuales, carreteras y otros ámbitos, como es Insitu (18) que se dedican a:

Desarrollar las siguientes fases:

- Inspección de la zona de estudio para programar el trabajo
- Planificación y estudio de las características para la selección de la mejor tecnología.
- Obtención de una nube georreferenciada global del proyecto

- Obtención de los productos solicitados por nuestros clientes.

Tecnología utilizada y principales ventajas:

La tecnología utilizada para la obtención de nubes de puntos de estructuras, tuberías, líneas de montaje, piezas y fachadas dependerá de la precisión exigida siendo el escáner laser terrestre la mejor opción para este tipo de trabajos, al obtener nubes de puntos georreferenciadas de gran precisión que reflejan la realidad.

Productos finales:

- Los productos finales pueden ser, entre otros, los siguientes:
- Modelos tridimensionales
- BIM
- Secciones y perfiles

Lo que nos permite referenciar como está el campo de reconstrucción digital 3D en el sector constructivo y los avances e incorporación que esta ha tenido, ratificando la importancia de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

1. **Thomson, Charles Patrick Hugo.** From Point Cloud to Building. *Capturing and Processing Survey Data Towards*. Londres : UCL CIVIL, ENVIRONMENTAL AND GEOMATIC ENGINEERING, 2016.
2. **Zollmann, Stefanie.** Augmented Reality for. *Augmented Reality for Construction Site Monitoring and Documentation*. ALEMANIA : CONTRIBUTED PAPER, February 2014. Vol. Proceedings of the IEEE, 102. 2.
3. **Sarachu, Elena.** Calor y Frio.com. *BIM, Building Information Modeling: eficiencia y sostenibilidad en la construcción*. [En línea] 27 de Junio de 2017. [Citado el: 15 de Diciembre de 2017.] <https://www.caloryfrio.com/noticias/actualidad/bim-building-information-modeling-eficiencia-y-sostenibiliad-en-la-construccion.html>.
4. **Torrico, Luis Alfredo Nava.** in SlideShare. [En línea] 5 de febrero de 2015. [Citado el: 27 de diciembre de 2017.] <https://es.slideshare.net/LuisNavaTorrico/inspeccion-de-obras-civiles-44316106>.
5. **Progress, IC.** IC Progress Photography. s.l. : <http://icprogressphotos.com/services>, 2016.
6. **Übel, Max von.** Escáner 3D: mejores 27 escáneres 3D, aplis y software 2018. *All3DP*. [En línea] 15 de Febrero de 2018. [Citado el: 30 de Abril de 2018.] <https://all3dp.com/es/1/escaner-3d-portatil-aplicacion-software-3d-scanner/>.
7. **Anguita, M.** *Cálculo de medidas mediante luz estructurada*. s.l. : Elai-UPM, 1999. <http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Investiga/GCII/areas/luz/luz%20estructurada.htm>.
8. **J.C. Torres .** *Digitalización 3D*. Granada : Universidad de Granada, 2010. http://lsi.ugr.es/~jctorres/MasterDesarrolloSoftware/D3D_1.pdf.

9. **Gonzalez, S.** WIKIPEDIA. [En línea] 20 de Octubre de 2003. [Citado el: 2017 de Diciembre de 16.] <https://es.wikipedia.org/wiki/Fotogrametr%C3%ADa>.
10. **Nordeste, Universidad Nacional del.** *Principios de Fotogramería*. Argentina : s.n., 2011.
11. **Jauregui, Luis.** Fotogrametría. *Introducción a la Fotogrametría*. Merida, Venezuela : Universidad de los Andes, 2009. Vol. Capítulo I. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/>.
12. **Otero, I., y otros.** Fotogrametría. *1.2 Fotogrametría*. Madrid : s.n. http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Fotogrametria/fotogrametria_cap_libro.pdf.
13. **Insights, Aereal.** Cómo planificar capturas de drone. *Cómo planificar capturas de drone*. Zaragoza : s.n., 2017.
14. **4Dmetric.** LÁSER ESCÁNER. *LÁSER ESCÁNER*. España : s.n., 2017.
15. **RESCO, PABLO APARICIO.** ARQUEOLOGÍA Y PATRIMONIO VIRTUAL. [En línea] 07 de Agosto de 2014. [Citado el: 09 de Marzo de 2018.] <https://parpatrimonioytecnologia.wordpress.com/category/guadalajara/>.
16. **AUTODESK.** AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK. *AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK*. [En línea] 04 de OCTUBRE de 2016. [Citado el: 19 de ENERO de 2018.] <https://knowledge.autodesk.com/es/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ESP/AutoCAD-Core/files/GUID-C0C610D0-9784-4E87-A857-F17F1F7FEEBE-htm.html>.
17. **Blasco, Juan Jose.** DE NUBES DE PUNTO A MODELADOS EN REVIT 3D. *www.academia.edu*. [En línea] 01 de Mayo de 2015. [Citado el: 17 de Noviembre de 2017.] https://www.academia.edu/12337713/De_nubes_de_puntos_a_modelos_tridimensionales_en_REVIT.
18. **Insitu.** Insitu. [En línea] 2017. <https://ingenieriainsitu.com/industrial/>.