

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA

Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
CIVIL**



ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DIGITALIZACIÓN POR FOTOGRAMETRÍA Y TLS PARA LA RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO SÓLIDO DE UNA SECCIÓN DEL QHAPAQ ÑAN Y SUS APLICACIONES

BORRADOR DE TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniería Civil

PRESENTADO POR:

SAÚL WALTER RETAMOZO FERNÁNDEZ

ASESOR:

Msc. Ing. CRISTIAN CASTRO PEREZ

AYACUCHO - PERÚ

2016

*... A Dios,
mi familia
y amigos.*

Agradecimientos

Estoy en deuda con muchas personas cuyo apoyo, aliento y amistad han hecho posible la realización de esta tesis. Por esta y muchas razones más, me gustaría expresar mi gratitud a:

- En primer término me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.
- A mis padres y hermanos por estar ahí cuando más los necesité; en especial a mi madre por su ayuda y constante cooperación.
- A mi asesor de pregrado, Mg. Cristian Castro Pérez, por su visión crítica y rectitud en su profesión como docente y por sus consejos que ayudan a formarte.
- A mis amigos Carolina, Cesar, Cristian, Eduardo, Fernando, Julio, Mijail y Saulo quienes fueron un gran apoyo emocional durante el desarrollo de la investigación.
- A la Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga por ofrecer un ambiente de estudios acogedor, oportuno y competitivo.
- A la Pontificia Universidad Católica del Perú por permitirme realizar la investigación en su campus.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Resumen

En esta tesis se desarrollan algoritmos para construir modelos de mallas 3D basados en estudios de Fotogrametría y TLS. También, se presentan algoritmos para realizar recorridos virtuales, construir modelos sólidos y dibujar planos de arquitectura. Además, se realizará un análisis de ingeniería del modelo sólido. Los algoritmos desarrollados se aplicarán a un tramo del Qhapaq Ñan o Camino Inca que está ubicado dentro del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Los algoritmos propuestos muestran resultados óptimos en términos de tiempo de procesamiento, resolución y efectividad de acuerdo a otros estudios similares. Los recorridos virtuales presentan a los monumentos de forma más amena y pueden ser empleados para promover el turismo. Los planos de arquitectura muestran una representación más real y completa de la estructura en comparación con los típicos planos de arquitectura. Los modelos sólidos son obtenidos a partir de la base de datos de los modelos 3D lo cual es más óptimo que usar herramientas de ingeniería inversa o una biblioteca de sólidos compuesto por cubos, tetraedros y esferas. Además, estos modelos sólidos pueden ser utilizados en análisis de ingeniería considerando la geometría original del objeto de estudio.

Summary

In this thesis algorithms are developed to build 3D mesh models based on Photogrammetry and TLS studies. Algorithms are also presented to realize virtual tours, build solid models and draw architectural plans. In addition, an engineering analysis of the solid model is made. The developed algorithms are applied to a section of the Qhapaq Ñan or Inca Trail that is located within of the Pontificia Universidad Catolica del Peru campus.

The proposed algorithms show excellent results in terms of processing time, resolution and effectiveness according to other similar studies. Virtual tours present the monuments of way most enjoyable and can be used to promote tourism. Architectural drawings show a most real and complete representation of the structure compared with typical architectural plans. Solid models are obtained from the database of 3D models which is most optimal that to use reverse engineering tools or a solids library comprising cubes, tetrahedrons and spheres. In addition, these solid models can be used in engineering analysis considering the original geometry of the object of study.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Índice General	IV
Lista de Acrónimos	VII
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Bibliográficos	1
1.2. Descripción de la realidad problemática	2
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. Problema principal	3
1.3.2. Problema secundario	3
1.4. Justificación e importancia	4
1.5. Objetivos del trabajo	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Hipótesis de la investigación	6
1.6.1. Hipótesis general	6
1.6.2. Hipótesis específicas	6
1.7. Variables e indicadores	6
1.8. Unidad de Análisis	7
1.9. Tipo y nivel de investigación	8
1.10. Periodo de análisis	9
1.11. Fuentes de información	9
1.12. Instrumentos utilizados	9
1.13. Técnicas de recolección	10
1.14. Procesamiento de datos	10
1.15. Organización de la tesis	10
2. Marco teórico y estado del arte	13
2.1. Estado del Arte	13
2.1.1. Estado del Arte en el Perú	13
2.1.2. Estado del Arte en el Mundo	14

2.1.2.1.	Estudio de Fotogrametría	14
2.1.2.2.	Estudio con Escáner Láser Terrestre	18
2.1.2.3.	Modelos Sólidos	23
2.2.	La Fotogrametría como herramienta de digitalización 3D	24
2.2.1.	Proyección de imágenes	24
2.2.1.1.	Notación	24
2.2.1.2.	Modelo de cámara agujero de alfiler	24
2.2.1.3.	Distorsión radial	27
2.2.1.4.	Modelo de distorsión de Brown	28
2.2.2.	Geometría de dos vistas	30
2.2.3.	Triangulación	31
2.2.4.	Ajuste de paquetes	33
2.2.5.	Técnicas de integración de mallas	33
2.2.5.1.	Métodos basados en Delaunay	33
2.2.5.2.	Métodos basados en superficie	34
2.2.5.3.	Superficies paramétricas	34
2.2.5.4.	Métodos volumétricos	34
2.2.6.	Texturado del modelo de mallas	35
2.3.	Escáner Láser Terrestre como herramienta de digitalización 3D	36
2.4.	Modelos sólidos	36
3.	Metodologías de digitalización	39
3.1.	Materiales y métodos	39
3.2.	Levantamiento digitalización con estación total	40
3.3.	Levantamiento y digitalización con Kinect	40
3.4.	Levantamiento y digitalización con fotogrametría	43
3.4.1.	Recolección de datos	43
3.4.2.	Digitalización y reconstrucción 3D	43
3.5.	Levantamiento y digitalización con escáner láser terrestre Faro	46
3.5.1.	Recolección de datos	46
3.5.2.	Digitalización y reconstrucción 3D	46
3.6.	Levantamiento digitalización con escáner láser terrestre Leica	48
4.	Análisis y resultados de la investigación	50
4.1.	Evaluación de la precisión en modelos 3D	50
4.1.1.	Medición de distancias euclidianas	50
4.1.2.	Curvas de nivel	51
4.1.3.	Desviación de superficies	52
4.2.	Evaluación de la precisión en modelos 3D basado en imágenes	54
4.2.1.	Transformada de Fourier 2D	58
4.2.2.	Entropía de Shanon	61
4.3.	Modelos sólidos a partir de los estudios de digitalización	61
4.3.1.	Algoritmo para construir modelos sólidos	61
4.4.	Planos de arquitectura a partir de los estudios de digitalización	64
4.5.	Recorridos virtuales a partir de los estudios de digitalización	64
4.6.	Análisis de ingeniería del modelo sólido	66
4.6.1.	Análisis modal de un tramo del Qhapaq Ñan	68
4.7.	Interpretación de resultados y/o discusiones	71

5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	74
5.1. Conclusiones	74
5.2. Recomendaciones	76
5.3. Trabajos Futuros	77
Referencias	78
Lista de Anexos	83

Lista de Acrónimos

2DFT: Transformada de Fourier 2D.
2DIFT: Transformada de Fourier 2D inversa.
C2C: Función de comparación Nube-a-Nube.
C2M: Función de comparación Nube-a-Malla.
CS: Algoritmo Consenso de Superficies.
DEM: Modelos de elevación digital.
DMVR: Algoritmo Reconstrucción 3D Multi-Vista Densa.
ELT: Estudio con Escaner Láser Terrestre.
EPOCA: Algoritmo Envolvente de la Posición de las Cámaras.
ET: Estudio con Estación Total.
EXIF: Formatos de archivos de imagen intercambiables.
ICP: Algoritmo Puntos Cerrados Iterativamente.
IVIA: Algoritmo de Integración Volumétrica.
M3C2: Función Modelo Multiescala a Nube de Puntos.
MC: Algoritmo de Juntado de Cubos.
PG: Estudio de Fotogrametría.
PMVS: Algoritmo Pegado en Pares Multi-Vista.
PSR: Algoritmo de Reconstrucción de Superficie de Poisson.
PUCP: Universidad Pontificia Universidad Católica del Perú.
SFM: Algoritmo Movimiento de Estructuras.
SURF: Algoritmo de Funciones Sólidas Aceleradas.
SGM: Algoritmo Juntado Semi-Global.
VRIP: Algoritmo Procesamiento de Imágenes en el Rango Volumétrico.

Índice de figuras

1.1. Vista Aérea del Camino-PUCP: (a) Parte Uno y (b) Parte dos.	8
1.2. Flujo de trabajo para el desarrollo del proyecto de tesis	12
2.1. Algoritmo de actualización de sólidos (Adaptado de Zvietcovich <i>et al.</i> (2015))	14
2.2. Encapsulamiento de columnas (Adaptado de Chácara <i>et al.</i> (2014))	15
2.3. Reconstrucción 3D del monumento Otomano (Adaptado de Koutsoudis <i>et al.</i> (2014))	15
2.4. Reconstrucción 3D del esqueleto de un caballo (Adaptado de De Reu <i>et al.</i> (2013))	16
2.5. Representación 3D del brazo robótico utilizado en el experimento (Adaptado de Olague y Dunn (2007))	17
2.6. Comparación de las rigideces en roca a partir de mediciones manuales y mediciones con Escaner Láser Terrestre (ELT) (Adaptado de Khoshelham y Altundag (2010))	19
2.7. Algoritmo de Integración de malla Image Volumetric Integration (IVIA) (Adaptado de Santos Junior <i>et al.</i> (2012))	20
2.8. Proyección agujero de alfiler de un punto X sobre una imagen plana de la cámara (Adaptado de Robertson y Cipolla (2008))	25
2.9. Geometría epipolar para dos cámaras (Adaptado de Robertson y Cipolla (2008))	31
2.10. Ilustración del proceso de triangulación (Adaptado de Robertson y Cipolla (2008))	32
2.11. Descripción de los datos de tres niveles (Adaptado de Zvietcovich <i>et al.</i> (2015)).	37
2.12. Operaciones booleanas entre sólidos. Las primeras dos imágenes muestran $S_1 \cup S_2$ y $S_1 \cap S_2$ respectivamente. La tercera imagen $S_1 - S_2$ y $S_1 \uplus S_2$. (Adaptado de https://rhino4all.wordpress.com/cad-ii-2014-a/actividad-08/)	38
3.1. Modelo 3D georeferenciado del Camino-PUCP: (a) Levantamiento con ET a curvas de nivel, (b) Levantamiento con PG y ubicación de las distancias para las mediciones manuales, (c) Levantamiento con ELT Faro 3D y regiones para la transformada de Fourier 2D, (d) Levantamiento con ELT Leica ScanStation C10 y regiones para la Entropía de Shanon.	41
3.2. Detalle de 35 m en longitud del Camino-PUCP: (a) Kinect, (b) PG, (c) ELT Faro 3D, (d) ELT Leica ScanStation C10.	42
3.3. Diagrama de flujo para realizar reconstrucciones 3D a partir del estudio de Fotogrametría (PG).	45

3.4. Diagrama de flujo para realizar Reconstrucciones 3D a partir del estudio de Escáner Láser.	47
4.1. Curvas de nivel del Camino-PUCP (a) Curvas de nivel con 50,000 puntos, (b) Secciones transversales, (c) Curvas de nivel con todos los puntos.	53
4.2. Desviación de superficies en modelos 3D del Camino-PUCP, (a) PG y ELT Faro (referencia), (b) PG y ELT Leica (referencia), (c) ELT Faro y ELT Leica (referencia).	55
4.3. Desviación de superficies en modelos 3D de una sección de 35 m del Camino-PUCP, (a) Desviación de superficies entre modelos 3D, (b) Escala de errores de desviación.	56
4.4. Modelos 3D en Matlab del Camino-PUCP, (a) Primer tramo de PG, (b) Segundo tramo de PG, (c) Primer tramo de ELT Faro, (d) Segundo tramo de ELT Faro, (e) Primer tramo de ELT Leica, (f) Segundo tramo de ELT Leica.	57
4.5. Imágenes en escala de grises del Camino-PUCP, (a) Primer tramo de PG, (b) Primer tramo de ELT Faro, (c) Primer tramo de ELT Leica.	59
4.6. 2DIFT del Camino-PUCP. Primer tramo de comparaciones entre: (a) PG y ELT Faro (referencia), (b) PG y ELT Leica (referencia), (c) ELT Faro y ELT Leica (referencia).	60
4.7. Diagrama de flujo para la construcción de modelos sólidos.	63
4.8. Algoritmo para realizar modelos sólidos aplicados a un caso de prueba de una iglesia.	63
4.9. Diagrama de flujo para realizar planos de arquitectura.	65
4.10. Diagrama de flujo para realizar recorridos virtuales.	66
4.11. Recorrido virtual en un tramo del Qhapaq Ñan: a) A nivel de nube de puntos y b) A nivel de malla.	67
4.12. Evaluación de los elementos tridimensionales para el modelo de elementos finitos.	68
4.13. Primera forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.	69
4.14. Segunda forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.	69
4.15. Tercera forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.	70
4.16. Cuarta forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.	70
4.17. Diagrama de flujo para la comparación de metodologías de digitalización en el Camino Inca.	71

Índice de tablas

4.1. Comparación de distancias euclidianas entre el modelo real y los modelos 3D de PG, ELT Faro, ELT Leica.	51
4.2. Comparación de las curvas de nivel del estudio de ET y PG tomando como referencia el ELT.	52
4.3. Frecuencias y periodos de los primeros cuatro modos.	71
4.4. Comparación de precios para realizar los modelos con Estación Total (ET), PG con Drones, ELT (Faro y Leica) y el sensor Kinect. Precios de compra de equipos, dispositivos y software al año 2015.	72

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Bibliográficos

Koutsoudis *et al.* (2014), realizó un trabajo para medir la precisión de los datos obtenidos por PG del monumento Otomano ubicado en Xanthi-Grecia. Se compararon los modelos de mallas de PG y ELT, donde se obtuvieron errores desde 3mm hasta más de 0.5m de la PG con respecto al ELT.

De Reu *et al.* (2013), realizó reconstrucciones 3d por PG con el programa Agisoft. Concluyó que es una manera rentable, excelente y adecuada de realizar los procesos de grabación, visualización y documentación del patrimonio arqueológico durante el proceso de excavación. Su aplicación se ha mantenido a pequeña escala.

Cheng (2012), utilizó la nube de puntos del ELT para crear modelos sólidos de patrimonios arqueológicos utilizando conjuntamente los programas Rapidform XOR2 de ingeniería inversa y Catia. Los modelos sólidos fueron utilizados para su visualización en la web en entornos de realidad virtual.

Brune y Perucchio (2012), realizó un análisis estructural utilizando un modelo de elementos finitos (FEM) en el gran salón de los mercados de Trajano-Roma. La construcción de modelos sólidos no es un proceso automático, es más un trabajo manual que se realiza empleando un software para formar modelos sólidos definidos adecuadamente.

Zvietcovich *et al.* (2015), desarrolló una metodología para trabajar en modelos de mallas y modelos sólidos con la finalidad de formar modelos sólidos mostrando todas sus características geométricas captadas con un ELT. Esta metodología se aplicó al muro frontal de la plataforma principal, unidad 14 y 16 de la Huaca de la Luna ubicada en Trujillo-Perú. No se actualizó todo el monumento arqueológico.

Quintana *et al.* (2014) realizó un estudio en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) en un tramo de 35 metros del Camino Inca ubicado dentro de la PUCP. Se desarrolló una comparación empleando diversos dispositivos como el sensor Kinect, PG y ELT. Se concluyó que el sensor Kinect es más preciso que la PG pero demora más tiempo en estacionar y calibrar el equipo para tomar datos.

En el 2013, el Ministerio de Cultura del Perú puso en marcha un proyecto para realizar el levantamiento de monumentos arqueológicos prehispánicos del Perú. Los levantamientos fueron realizados para hacer Reconstrucciones 3D a partir de los estudios de PG. Los monumentos levantados fueron los siguientes: Avillay, Mateo Salado, Calle Norte - Sur (Pachacamac), Huaca La Merced, Huaca la Luz, Huallamarca, Huantinamarca, Monterrey 1, Monterrey 2, Recinto 47 (Pachacamac), Huaca San Borja, Huaca Santa Catalina, Taurichumpi (Pachacamac) y Templo del Sol (Pachacamac). La finalidad de este proyecto fue generar un Geoportal Web en el Sistema de Información Geográfica de Arqueología (SIGDA) disponible en la página web <http://sigda.cultura.gob.pe/>.

1.2. Descripción de la realidad problemática

Los monumentos arqueológicos y arquitectónicos de una nación forman una parte importante para preservar la historia, identidad y cultura de un país. A lo largo de los años los monumentos están sometidos a fenómenos naturales y antropogénicos que desgastan

la estructura deformando su geometría. Frente a esta situación, en los últimos años se han propuesto y desarrollado metodologías para preservar los monumentos. Estas metodologías consisten en digitalizar la estructura para representar la geometría del monumento como una serie de puntos que describen su superficie. Estos puntos forman la nube de puntos que son usados para construir modelos 3D (modelos de mallas). Actualmente, las metodologías que más destacan son el estudio con ELT y el estudio con PG. En el caso de monumentos arqueológicos de gran magnitud como el tramo elegido del Qhapaq Ñan o Camino Inca se debe establecer que tipo de estudio es el mas eficiente en función a la resolución, precisión, costo y tiempo de procesamiento.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema principal

¿Será posible construir modelos sólidos a partir de metodologías de digitalización en estructuras patrimoniales de gran magnitud como el Camino Inca?

1.3.2. Problema secundario

- a) ¿Es posible realizar la digitalización con Escáner Láser Terrestre en estructuras patrimoniales de gran magnitud como el Camino Inca?.
- b) ¿Es posible realizar la digitalización con Fotogrametría en estructuras patrimoniales de gran magnitud como el Camino Inca?.
- c) ¿Es posible realizar una comparación de los modelos de Fotogrametría y Escáner Láser Terrestre para el tramo del Camino Inca?.

- d) ¿Es posible realizar un análisis estructural del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización?.
- e) ¿Es posible realizar un recorrido virtual del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización?.
- f) ¿Es posible realizar planos de arquitectura del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización?.

1.4. Justificación e importancia

Una de las aplicaciones mas importantes de los modelos 3D son los modelos sólidos. No obstante, debido a la magnitud de la base de datos, estos no pueden ser usados directamente para construir modelos sólidos. Los sólidos pueden ser manipulados en cualquier programa CAD para hacer análisis de ingeniería.

Los modelos de mallas basados en estudios con PG, ELT y la fusión de ambos estudios son utilizados para construir modelos 3D. Estos modelos tienen una serie de aplicaciones en el estudio de estructuras patrimoniales. Estas aplicaciones son las siguientes: generar modelos digitales de monumentos arqueológicos y arquitectónicos (Rua y Alvito, 2011), generar paseos virtuales y entornos de realidad virtual (Carrozzino y Bergamasco, 2010; Rua y Alvito, 2011), construir modelos sólidos para realizar el análisis de ingeniería (Brune y Perucchio, 2012; Casciati y Borja, 2004), generar una base de datos 3D con información topológica, topográfica, geométrica y de textura para la documentación y preservación del patrimonio (Arbace *et al.*, 2013; Dellepiane *et al.*, 2013) y actualizar modelos 3D para obtener representaciones mas detalladas de la estructura (Zvietcovich *et al.*, 2015).

Los enfoques de modelamiento digital serán aplicados a una sección del Qhapaq Ñan

o Camino Inca en donde demostraremos la importancia de los modelos sólidos basados en estudios de PG y ELT.

1.5. Objetivos del trabajo

1.5.1. Objetivo general

Construir el modelo sólido del tramo del Camino Inca ubicado dentro del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Realizar la digitalización con Escáner Láser Terrestre el tramo del Camino Inca ubicado dentro del campus de la PUCP .
- b) Realizar la digitalización con Fotogrametría el tramo del Camino Inca ubicado dentro del campus de la PUCP.
- c) Desarrollar una metodología de comparación entre los estudios de Fotogrametría y Escáner Láser Terrestre para el tramo del Camino Inca.
- d) Evaluar estructuralmente un tramo del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización.
- e) Hacer un recorrido virtual del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización.
- f) Dibujar planos de Arquitectura del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización.

1.6. Hipótesis de la investigación

1.6.1. Hipótesis general

La fotogrametría y el escáner laser de tiempo de vuelo son útiles para hacer reconstrucciones 3d precisas, además es posible generar modelos sólidos a partir de la información recopilada para su posterior análisis estructural.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) El estudio de Escáner Láser Terrestre es el adecuado para digitalizar el tramo del Camino Inca ubicado dentro del campus de la PUCP.
- b) El estudio de Fotogrametría es el adecuado para digitalizar el tramo del Camino Inca ubicado dentro del campus de la PUCP.
- c) Se pueden comparar los estudios de Fotogrametría y Escáner Láser Terrestre.
- d) Se puede hacer una evaluación estructural del tramo del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización.
- e) Es posible desarrollar un recorrido virtual del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización.
- f) Se pueden dibujar planos de arquitectura del Camino Inca a partir de los estudios de digitalización.

1.7. Variables e indicadores

Las variables independientes de la tesis son los siguientes:

- Número de fotos para el estudio de Fotogrametría.
- Resolución de las fotos para el estudio de Fotogrametría.
- Número de estaciones de escaneo para el estudio de ELT.
- Magnitud de la nube de puntos para el estudio de ELT.
- Propiedades mecánicas de los muros del Camino Inca.
- Propiedades geométricas de los muros del Camino Inca.

Las variables dependientes de la tesis son los siguientes:

- Magnitud de la nube de puntos para el estudio de Fotogrametría.
- Resolución del modelo sólido.
- Formas modales de un tramo del Camino Inca.

1.8. Unidad de Análisis

El Qhapaq Ñan o Camino Inca es un patrimonio estructural de valor excepcional compartido por Argentina, Chile, Colombia, Ecuador y Perú. Fue usado para conectar los centros de producción y centros de poder político, económico, administrativo, ceremonial del Imperio Inca. Este patrimonio está compuesto por una red de caminos de alrededor de 30,000 km de longitud. Cada camino está compuesto por dos paredes de tierra paralelas, las cuales fueron construidas para el tránsito y transporte de productos y mensajes. Esta estructura fue construida entre los años 1000 D.C. y usada por las culturas Ichma (1100-1472 A.D.) e Incas (1472-1532 D.C.). En el año 2014, la UNESCO ha declarado el Qhapaq Ñan como patrimonio de la humanidad (UNESCO, 2015). En este Capítulo se analiza una sección de 450



(a)

(b)

Figura 1.1: Vista Aérea del Camino-PUCP: (a) Parte Uno y (b) Parte dos.

metros de longitud localizado dentro del campus de la PUCP, el cual sera llamada Camino-PUCP a lo largo de la tesis (ver Fig. 1.1). También se analiza una sección de 35 metros de longitud (ver Fig.3.2).

1.9. Tipo y nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo, porque se describen la construcción de modelos 3D a partir de estudios de PG y ELT. La presente investigación es del tipo analítico, porque se basa en el análisis geométrico del monumento para describir el estado de daño en que se encuentra a falta de observaciones e insuficientes datos experimentales. Es una investigación cuantitativa porque los resultados obtenidos se pueden medir como por ejemplo la magnitud de la nube de puntos del monumento a partir de los estudios de PG y ELT. Es una investigación cualitativa porque se mide la precisión de la nube de puntos del estudio de PG en términos de una precisión alta, media y baja de acuerdo a los estudios presentados hasta el día de hoy.

1.10. Periodo de análisis

El periodo de análisis es de tres meses.

1.11. Fuentes de información

Mediante la colaboración de la Pontificia Universidad Católica del Perú, se tiene acceso libre a las principales bibliotecas virtuales del mundo donde se publican papers reconocidas en la comunidad científica tales como: Science Direct y el Google Scholar. Es decir que al momento de la búsqueda de información se puede ahorrar el tiempo que toma en verificar la confiabilidad, la objetividad, precisión e importancia de la misma.

También es importante mencionar otras fuentes de información como son los siguientes:

- a) Repositorio de Tesis Digital PUCP.
- b) Libros impresos.
- c) Sitios Web.
- d) Otros.

1.12. Instrumentos utilizados

Para tomar las fotografías se utilizó un Dron con cámara (Sony, 2015). El Dron usado fue un DGI S800 EVO el cual tiene seis hélices. La cámara equipada en el Dron fue un Sony Nex 7 (Sony, 2015) de 24.3 megapíxeles con una lente de 18-55 mm. El gimbal que lleva la cámara en el Dron tiene la capacidad de rotar 360° alrededor de los ejes horizontal y vertical, además puede rodar en un ángulo de 60°. El modelo 3D de referencia se obtuvo del Escáner

Láser Terrestre de tiempo de vuelo Faro 3D. Las especificaciones del escáner indican que tienen una precisión de 0.005 pulgadas (FARO, 2015).

1.13. Técnicas de recolección

Se emplearon instrumentos cuantitativos para recolectar la base de datos.

1.14. Procesamiento de datos

El sistema para el procesamiento de datos estaba equipado con un procesador de 4 núcleos Intel Core i7 a 2.2GHz, 8 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica GeForce GT 540M (2 Cores @ 1344MHz, 1024 MB) con Microsoft Windows 7 de 64 bits. El otro sistema utilizado para el procesamiento de datos consta de un procesador de 24 núcleos Intel Xeon de 2.5GHz, 24 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica Matrox G200eR con Microsoft Windows 7 de 64 bits. Se instalaron cinco paquetes de cómputo: Agisoft PhotoScan (versión 1.1.3), Meshlab (versión 1.3.3), CloudCompare (versión 2.6.0), AutoCAD Civil 3D 2014 y Matlab. Una vez la computadora quedó definido, se procedió a evaluar las distintas metodologías empleando dispositivos como la ET, Kinect, PG con Drones y ELT (Faro 3D y Leica ScanStation C10).

1.15. Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en cuatro partes. La primera parte (capítulo 1) está centrada en los antecedentes y la metodología de la investigación. La segunda parte (capítulos 2 y 3) presenta el estado de arte, la parte teórica y los requisitos necesarios para obtener modelos 3D utilizando las tecnologías de digitalización 3D existentes hoy en día. La tercera parte

(capítulo 4) muestra el proceso para construir modelos sólidos y aplicaciones del modelo de mallas. La cuarta parte (capítulo 5) presenta las principales conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros. A continuación se detallan los principales puntos desarrollados en cada capítulo.

En el capítulo 1, se muestran los antecedentes bibliográficos, descripción del problema, objetivos, hipótesis, metodología y organización de la tesis.

En el capítulo 2, se presenta el estado de arte y los conceptos teóricos para desarrollar modelos sólidos y sus aplicaciones.

En el capítulo 3, se presenta el desarrollo del trabajo de la tesis. También se presentan los materiales y métodos para la metodología empleada.

En el capítulo 4, se muestra el análisis de los datos a partir de los estudios de PG, ELT. Los resultados de la investigación y la contrastación de la hipótesis en el que se incluye el proceso de construcción de modelos sólidos y aplicaciones desarrolladas en un tramo del Qhapaq Ñan o Camino Inca.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones del trabajo y recomendaciones para trabajos futuros.

Para un mejor entendimiento del flujo de trabajo en el desarrollo de la tesis, se ha construido un diagrama (ver Fig. 1.2) que muestra cada uno de los pasos que se han seguido.

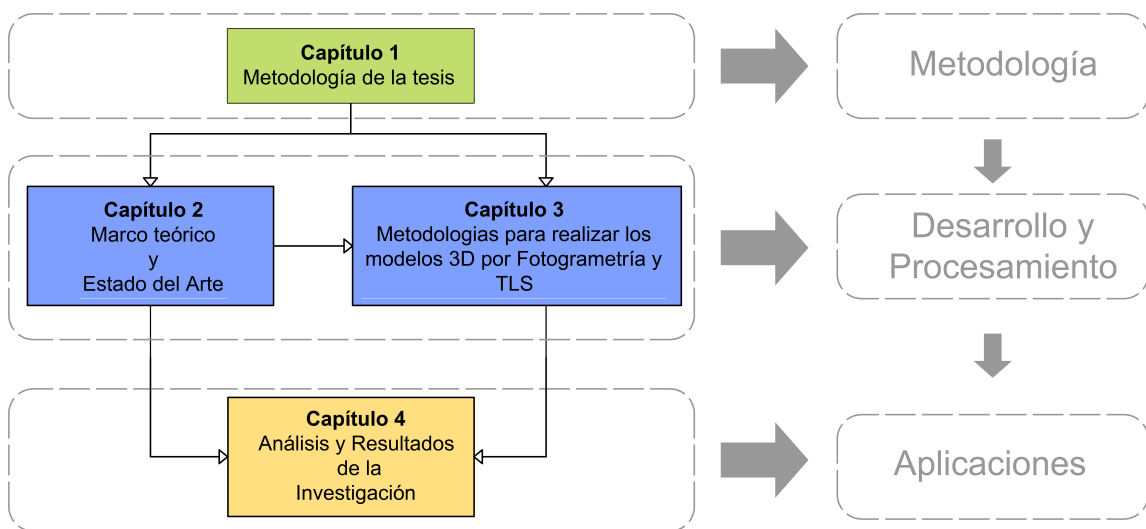


Figura 1.2: Flujo de trabajo para el desarrollo del proyecto de tesis

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

2.1. Estado del Arte

2.1.1. Estado del Arte en el Perú

Actualmente, uno de los monumentos más estudiados en el Perú es la Huaca de la Luna, ubicado en el departamento de Trujillo. La Huaca es una estructura masiva de tierra construida entre los años 200 - 850 D.C. al pie del cerro blanco por la civilización Moche y fue utilizado como un centro político - ceremonial (Morales, 2010). A lo largo de los años estuvo sometido a cambios en su geometría debido a causas naturales y antropogénicas. En este contexto se digitalizó la Huaca entre los años 2002 - 2004 por medio de un modelo sólido realizado en AutoCAD a partir del levantamiento con ET. En el año 2013 Zvietcovich *et al.* (2015) desarrolló una metodología para actualizar el modelo sólido de la Huaca (ver Fig. 2.1). Los datos empleados en la actualización fueron obtenidos de un estudio de PG del muro frontal, unidad 16, sala Hipóstila y un pequeño altar ubicado en la plaza central de la Huaca de la Luna. Los datos de PG se procesaron en el programa Agisoft PhotoScanner (Agisoft, 2015). Esta metodología de actualización consta de ocho etapas. En las primeras dos, se carga y transforma el modelo sólido de la Huaca de la Luna a un modelo de mallas en el programa Ansys. En las siguientes etapas se generó el modelo sólido a partir del levantamiento

con PG en el programa Matlab para actualizar el modelo.

En la campaña de recolección de datos de Zvietcovich *et al.* (2015), se realizó el levantamiento de cuatro sectores empleando el ELT de tiempo de vuelo Faro Focus 3D (FARO, 2015). se ubicaron cuatro columnas ubicadas en las salas hipóstilas y la unidad 16. Cada sesión de escaneo generó una nube de puntos, las cuales fueron alineados empleando el algoritmo Iterative Closest Point (ICP) incluida en el programa Meshlab. Esta nube de puntos se segmentó manualmente en el programa CloudCompare (CloudCompare, 2014) para convertirla en un modelo de mallas basado en triángulos usando el algoritmo Poisson Surface Reconstruction (PSR). Para convertir los modelos de mallas a modelos sólidos se han empleado un algoritmo de encapsulación que consta de cuatro etapas (ver Fig. 2.2) desarrolladas en Matlab (Matlab, 2015). Chácara *et al.* (2014) realizó un análisis de ingeniería a los modelos sólidos de las cuatro columnas de la Huaca de la Luna. Del estudio se concluyó que trabajar con la geometría original del modelo influye en los resultados. La desventaja de realizar el análisis de ingeniería en modelos sólidos detallados reside en la capacidad y cantidad de memoria del equipo de cómputo.

2.1.2. Estado del Arte en el Mundo

2.1.2.1. Estudio de Fotogrametría

Los estudios de PG están basados generalmente en los algoritmos Structure From Motion (SFM) y Dense Multi-View 3D Reconstruction (DMVR) que permiten generar modelos

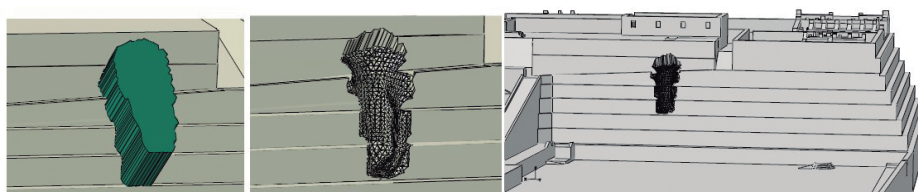


Figura 2.1: Algoritmo de actualización de sólidos (Adaptado de Zvietcovich *et al.* (2015))

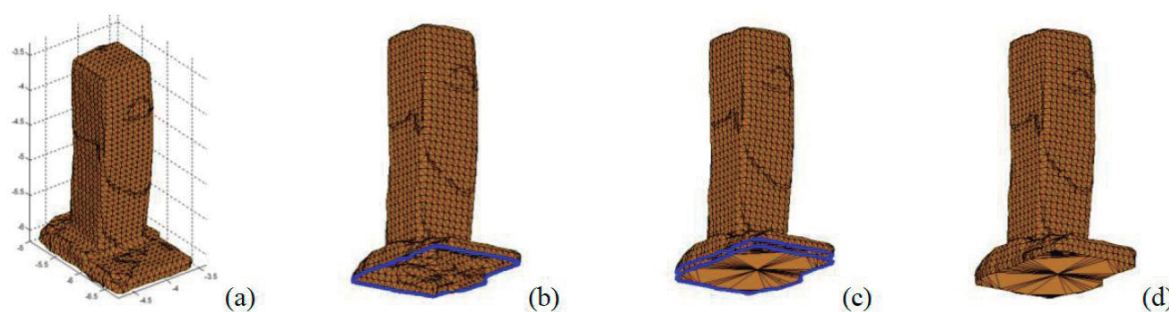


Figura 2.2: Encapsulamiento de columnas (Adaptado de Chácara *et al.* (2014))

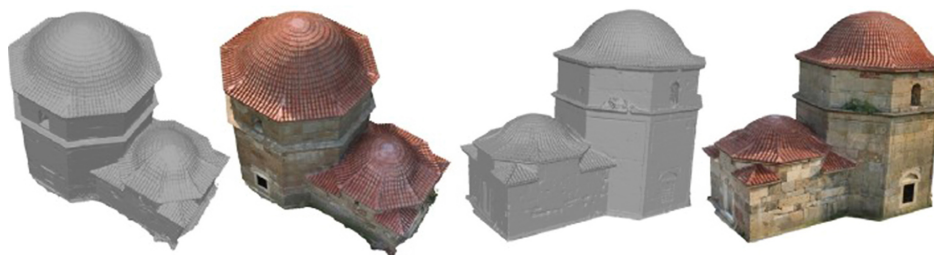


Figura 2.3: Reconstrucción 3D del monumento Otomano (Adaptado de Koutsoudis *et al.* (2014))

3D de alta resolución (ver Fig. 2.3). Este estudio se realizó en el monumento otomano de Xanthi-Grecia tuvo como finalidad realizar una reconstrucción 3D a partir de un levantamiento con PG que fue comparado con un modelo de ELT. Se llegaron a obtener desviaciones estándar de hasta 3mm (Koutsoudis *et al.*, 2014). El algoritmo SFM tiene diversas aplicaciones como son los siguientes: levantamiento con PG (Kraus, 2007), reconstrucción automática de modelos de realidad virtual desde una secuencia de vídeo (Zisserman *et al.*, 1999), determinación del movimiento de la cámara (Kutulakos y Vallino, 1998).

El modelamiento 3D basado en imágenes y dirigida a excavaciones arqueológicas ha permitido entender la naturaleza de los restos arqueológicos de nuestros antepasados. Una investigación desarrollada en la abadía de Boudelou (De Reu *et al.*, 2014), ubicada al norte de Bélgica, presentó un flujo de trabajo para realizar modelos 3D de manera rápida. La finalidad fue grabar, visualizar y documentar la base de datos durante el proceso de excavación. El modelo 3D se hizo utilizando el software Agisoft PhotoScanner. La reconstrucción se integró al sitio georreferenciando el modelo, luego se proyectó la abadía con ayuda del programa

ARCGIS (ArcMap y ArcScene). Se obtuvieron diferencias de mas de 1cm utilizando como referencia medidas hechas con una cinta métrica. Por lo tanto, los modelos desarrollados en Agisoft son herramientas adecuadas para la grabación, documentación y visualización en el proceso de excavación de monumentos arqueológicos (De Reu *et al.*, 2014).

La reconstrucción 3D por PG viene a ser una manera rentable de registrar el patrimonio tal como muestra una investigación sobre tres excavaciones del periodo romano y medieval (De Reu *et al.*, 2013). Los objetos de estudio fueron la Abadía de Boudelo, la vicus romana de Harelbeke, la bodega de Hopmarkt en Aalst y el esqueleto de un caballo de la era medieval (ver Fig. 2.4). La finalidad fue buscar un paquete de cómputo de bajo costo para registrar las excavaciones arqueológicas. Generalmente, los restos arqueológicos son registrados como un archivo 2D constituido por descripciones, fotografías, etc. Por lo tanto, se pierde gran parte de la información arqueológica. En este contexto, el Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2015) permite registrar el patrimonio de manera rentable, eficiente y con una precisión de pocos centímetros (De Reu *et al.*, 2013).

El diseño de redes para estudios de PG permite optimizar la posición de los puntos que describen un objeto. Se realizó un estudio en Baja California - México para diseñar una red práctica usando un sistema robótico (ver Fig. 2.5) y que consta de dos etapas (Olague y Dunn, 2007). Primero se revisó el modelo de cámara montada sobre el brazo robótico. La calibración de la cámara y el ajuste de paquetes se realizó empleando una grilla de calibración. En la

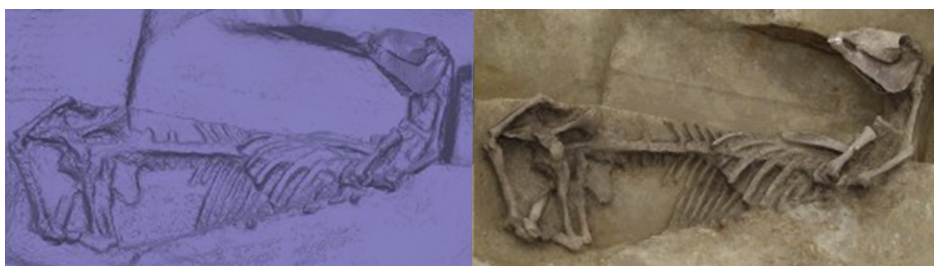


Figura 2.4: Reconstrucción 3D del esqueleto de un caballo (Adaptado de De Reu *et al.* (2013))

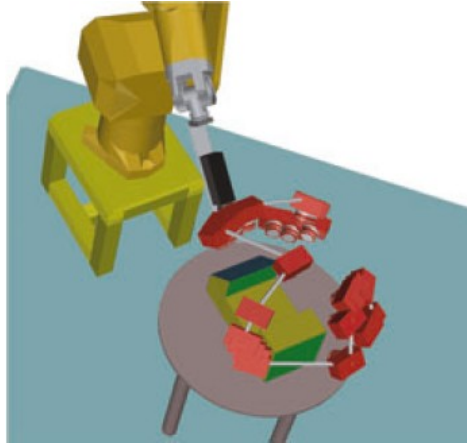


Figura 2.5: Representación 3D del brazo robótico utilizado en el experimento (Adaptado de Olague y Dunn (2007))

segunda etapa se trabajó en un algoritmo evolucionado para el sistema de medición robótico. Este proceso busca integrar un diseño de redes basado en simulación dentro de un sistema metrológico. La simulación por ordenador de procesos evolucionados son un conjunto de técnicas de optimización conocidos como algoritmos evolucionados. El enfoque propuesto usa un criterio analítico que busca un diseño adecuado en una fracción del tiempo requerido por el enfoque evolutivo usando un ajuste de paquetes rigurosos. La combinación de un algoritmo de simulación evolutiva con un paquete de ajustes proporciona un enfoque sencillo para el diseño de redes en estudios de PG. El Envolving Positions of Cameras (EPOCA) es un ejemplo sencillo que ha sido desarrollado usando un diseño de redes para PG, esta basado en CAD e incorpora algoritmos de diseño de redes con simulación 3D. El sistema toma como entrada un modelo 3D del objeto y determina automáticamente la localización y altitud de un conjunto de cámaras que convergen al objeto (Olague y Dunn, 2007).

Otro estudio muestra la precisión de los procesos de reconstrucción utilizando dos parámetros (Ahmadabadian *et al.*, 2013). El primer parámetro es la habilidad de generar un modelo 3D escalado y el otro es la capacidad para entregar datos de alta calidad que proporcionan una buena aproximación a la superficie de referencia. Una solución para determinar la escala es la introducción de distancias conocidas entre objetos en el espacio como son las

líneas base entre las estaciones de las cámaras o puntos de control. Se estudió cuatro métodos de correspondencia de superficie para la obtención de una nube de puntos densa: dos implementaciones del método semi-global, el MicMac y Patch Multi View Stereo (PMVS). El Semi-Global Matching (SGM) (Hirschmuller, 2005) es un método para un juego de pares de imágenes que usan una aproximación del modelo global. El SGM permite estimar la profundidad de los puntos sin información inicial de la escena y consta de cuatro etapas: costo computacional del pixel, costo de agregar cada pixel, calcular la disparidad y el refinamiento de la disparidad. El PMVS utiliza un ajuste de paquetes y una matriz de proyección para orientar las imágenes. El MicMac se basa en utilizar programas para generar la nube de puntos densa. Los objetos de estudio fueron un cubo, una esfera pequeña y una esfera grande. Se comparó la nube de puntos de los distintos métodos en el cual los algoritmos SGM y PMVS ofrecen mayor precisión respecto a los otros métodos (Ahmadabadian *et al.*, 2013).

2.1.2.2. Estudio con Escáner Láser Terrestre

El ELT es otra alternativa más eficiente como técnica de medición debido a que ofrece más cobertura y resolución para llegar a zonas inaccesibles. Un estudio en el río Meuse al sur de Bélgica fue destinado a conocer la caracterización de rigideces en una roca (Khoshelham y Altundag, 2010). Se realizaron dos tipos de mediciones sobre las superficies de las rocas. Primero, se emplearon herramientas manuales como los peines de carpinteros, compás e inclinómetros. Segundo, las mediciones se realizaron con un ELT Faro LS880 el cual siempre presenta ruido. Para eliminar el ruido se empleó la transformada de Wavelet (Strang y Nguyen, 1996) que descompone la señal en diferentes componentes de escala y resolución. Estos componentes fueron evaluados por valores umbrales que dependen del nivel de ruido. Las mediciones con ELT y mediciones manuales se hicieron con una resolución de 1mm para

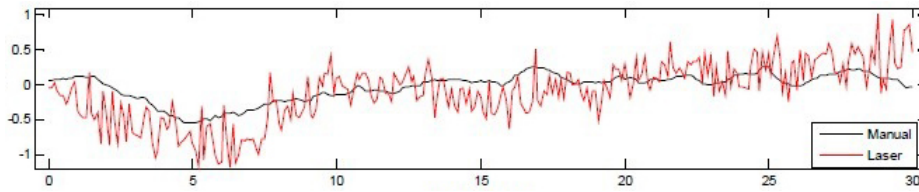


Figura 2.6: Comparación de las rigideces en roca a partir de mediciones manuales y mediciones con ELT (Adaptado de Khoshelham y Altundag (2010))

ser comparadas. Se compararon las rigideces en perfiles sobre la superficie de las rocas (ver Fig. 2.6) entre ambas mediciones obteniéndose variaciones de 1 cm. Los datos del estudio de ELT tienen la desventaja de presentar ruido, tal como muestra la transformada de Wavelet (Khoshelham y Altundag, 2010).

Existen algoritmos que realizan la integración de múltiples rangos de escaneo para realizar un modelo de mallas triangular. Para este propósito se realizó una investigación en la Universidad de Curitiba - Brasil basado en Reconstrucciones 3D con ELT (Santos Junior *et al.*, 2012). El proceso de reconstrucción está compuesto por una secuencia de etapas. Primero, los datos fueron adquiridos desde diferentes puntos de vista con un Escáner Láser Vivid 990 de Konica Minolta. Segundo, los datos son alineados en marcos de referencia comunes. Después del alineamiento sigue la integración que consiste en formar mallas. Finalmente se genera un modelo 3D con textura. En el proceso de integración se evalúan y modifican dos enfoques volumétricos, el Volumetric Range Image Processing (VRIP) y Consensus Surface (CS). El VRIP calcula la distancia de cada voxel al modelo de mallas (Curless y Levoy, 1996). Mientras que el algoritmo CS (Wheeler *et al.*, 1998) usa un campo de distancias señalado para extraer la malla resultante con el algoritmo Matching Cube (MC) (Cubes, 1995) (Lorensen y Cline, 1987). Además, se desarrolla un método de integración híbrida, llamado IVIA que mejora la fidelidad de los modelos 3D. El IVIA se usa para remover valores atípicos que ayudan en el proceso de llenado de agujeros (ver Fig. 2.7). Finalmente se comparan los algoritmos en términos de resolución y exactitud. En este proceso se utilizó el algoritmo

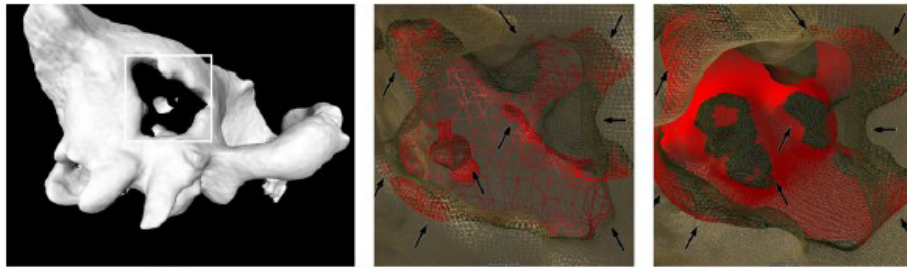


Figura 2.7: Algoritmo de Integración de malla IVIA (Adaptado de Santos Junior *et al.* (2012))

PSR que es el método principal para realizar modelos de mallas. El PSR tiene la ventaja en términos de memoria y tiempo de procesamiento, pero puede causar conexiones incorrectas de algunas regiones (Kazhdan *et al.*, 2006). El IVIA propone un mejor reconocimiento de datos en comparación con el VRIP, CS y el PSR. Este reconocimiento permite rellenar mas agujeros durante el proceso de llenado de agujeros. El IVIA presenta bordes mas suaves respecto al VRIP, CS y PSR. Una desventaja de estos algoritmos de integración de mallas es la presencia del ruido (Santos Junior *et al.*, 2012).

Existen herramientas de cómputo que son usadas para analizar la superficie de las imágenes y extraer las características mas relevantes. Un estudio de la Universidad de California de EE.UU. mostró como usar herramientas para caracterizar superficies (Palazoglu *et al.*, 2010). En el análisis de imágenes de superficies existen tres componentes principales que están aisladas y cuantificadas que son la rugosidad, ondulación y forma de la superficie. Se tomaron datos que constan de películas finas inorgánicas e interfaces de sólidos con equipos de escáner de sonda microscópica. Estos equipos están constituidos por un microscopio de fuerza atómica, microscopio electrónico y un escáner electrónico microscópico. La caracterización de las superficies se puede realizar a menudo utilizando la transformada de Fourier y la transformada de Wavelet. La transformada de Fourier tiende a dar resultados incompletos debido a que en el dominio de las frecuencias se asume que las superficies son infinitamente continuas. Por lo tanto se usó la teoría de Wavelet para separar eficientemente las componen-

tes significativas de ruido. El enfoque de Wavelet es usado para un análisis microestructural. Esta información fue usada para la remoción de características en la pantalla, remoción del ruido, mejorar la resolución de la imagen, aislar e identificar patrones que pueden no ser visibles y no pueden ser detectadas por otras técnicas de análisis de imágenes (Palazoglu *et al.*, 2010).

Caracterizar la topografía de la superficie de un río juega un papel importante en el análisis de sedimentación de rocas. Se realizó una investigación en un canal trapezoidal de concreto construido de manera experimental por la Universidad de Glasgow y la Universidad de Aberdeen en Reino Unido (Nyander *et al.*, 2003). Esta investigación fue conducida a estudiar la aplicación de la transformada discreta de Wavelet para la caracterización en dos dimensiones de la superficie de sedimentos en la superficie del canal. Se tomaron datos con un ELT de la superficie para distintos grados de sedimentación. Se estudió la rugosidad de la superficie la cual consta de partículas de distintos tamaños. Esta superficie fue procesada con los umbrales de Wavelet en 2D, la transformada estacionaria de Wavelet y el método espectral de Fourier. Un Wavelet es una pequeña ola o pulso que puede ser comprimido o ajustado a diferentes escalas. La función Wavelet conocida como análisis multiresolución permite la separación en detalles, aproximaciones y el escalamiento de la superficie. El análisis de Wavelet sirve para analizar superficies Brownianas, el agrietamiento de las superficies de concreto, corrosiones por picaduras, prótesis de juntas ortopédicas y análisis de la rugosidad de las superficies (Nyander *et al.*, 2003).

Existen tecnologías de teledetección utilizadas para la preservación del patrimonio cultural de una nación como muestra un estudio en la Domus Tiberiana, al lado norte de la colina de Palatino en Roma-Italia (Tapete *et al.*, 2013). El estudio propuso la combinación del radar de teledetección y el escáner láser para el control de deformaciones estructurales en

tiempo real de los monumentos arqueológicos. Dicha estructura fue monitoreada por un año con el radar y ELT. El radar ofrece la posibilidad de visualizar las deformaciones de superficies naturales y artificiales con extensión de hasta unos pocos kilómetros. Estos datos tienen la ventaja de proyectarse sobre modelos de elevación digital, modelos digitales del terreno, nube de puntos LiDAR y nube de puntos del ELT. Ambos métodos fueron integrados para ver los desplazamiento por el radar en la geometría 3D. El problema en este estudio fue la gestión de grandes cantidades de datos (Tapete *et al.*, 2013).

Técnicas de agrimensura como el ELT y PG han sido utilizados para representar superficies. En este estudio (Lague *et al.*, 2013) se realizaron dos enfoques, el primero se concentro en el rastreo de partes homólogas de la superficie y el segundo en el cálculo de las distancias entre dos nubes de puntos cuando las partes homólogas no podían ser definidas. Además, se presenta un algoritmo que realiza directamente la comparación de la nube de puntos en 3D denominado MultiScale Model to Point Cloud (M3C2) que presenta dos etapas. En la primera etapa se estima la normal de la superficie y orientación de una superficie local. En la segunda etapa se realiza las mediciones de la superficie normal elegida a lo largo de la dirección normal con cálculos explícitos de un intervalo de confianza local. El objeto de estudio fue la superficie del cañon del río Rangitikei en la isla norte de Nueva Zelanda. Los datos se tomaron empleando un ELT Leica Scanstation 2. Se hicieron tres muestras de distintas aspe- rezas; la primera, fue el acantilado plano; la segunda, fue la cama de adoquines y finalmente los escombros de las rocas. Como resultado, el algoritmo se implementó al software libre denominado CloudCompare para realizar comparaciones entre modelos 3D. Este enfoque presenta niveles de detección debajo de los 6mm (definidos al 95 % de confianza) entre dos superficies (Lague *et al.*, 2013).

2.1.2.3. Modelos Sólidos

La magnitud de la nube de puntos de un monumento definirá la calidad de la reconstrucción 3D. En este estudio (Cheng, 2012), se utilizó el LiDAR para tomar datos y grabarlos como una nube de puntos. La nube de puntos del ELT fue utilizada para generar modelos sólidos de monumentos arqueológicos con la ayuda del programa Rapidform XOR2 de ingeniería inversa y Catia. Los modelos sólidos fueron utilizados para ser visualizadas en la web en entornos de realidad virtual. Estos entornos de realidad virtual también son usados en museos digitales para la preservación del patrimonio. Los flujos de trabajo adoptados para realizar la reconstrucción 3D juega un papel importante para la calidad de los modelos sólidos. El ELT tiene la ventaja de cubrir distancias de hasta 1000 m con una precisión menor de 5 mm. Los datos con textura tomados del estudio con Lidar también son utilizados para documentar monumentos históricos (Cheng, 2012).

Los modelos sólidos obtenidos del estudio de PG y ELT pueden ser usados para realizar un análisis estructural utilizando un modelo de elementos finitos. Este estudio (Brune y Perucchio, 2012), se realizó en el gran salón de los mercados de Trajano-Roma en el que se realizó un análisis del modelo de elementos finitos de la estructura para medir la respuesta en desplazamientos. La construcción de modelos sólidos no es un proceso automático, es más un trabajo manual que utiliza modelos sólidos definidos adecuadamente. Se debe destacar que el flujo de trabajo seguido para realizar modelos 3D definirá la calidad del modelo sólido (Brune y Perucchio, 2012).

2.2. La Fotogrametría como herramienta de digitalización 3D

En esta sección se explica el proceso de generación de modelos 3D a partir de estudios de PG. Además, se presentan los conceptos teóricos existentes para medir la precisión de modelos 3D.

2.2.1. Proyección de imágenes

2.2.1.1. Notación

En lo que sigue, será conveniente trabajar con coordenadas homogéneas y euclidianas. En coordenadas homogéneas, un punto en el espacio N -dimensional es expresado por un vector con $N + 1$ elementos que está definido así solo hasta escalar, multiplicando el vector por un factor de escala arbitrario distinto de cero que no cambiará su significado. Proporcionando el elemento $N + 1$, una coordenada homogénea que puede ser relacionada a su equivalente Euclidiana dividiendo el primer elemento N por el elemento $N + 1$. De otra forma, la coordenada describe un punto al infinito. Por ejemplo, un punto 3D homogéneo tiene la forma $\mathbf{X} \sim [\tilde{X} \ \tilde{Y} \ \tilde{Z} \ \tilde{W}]^T$ (donde \sim significa igualdad hasta escalar). Proporcionando $\tilde{W} \neq 0$, \tilde{X} que está relacionado a su equivalente Euclidiana $\mathbf{X} = [X \ Y \ Z]^T$ por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{X} = [\tilde{X}/\tilde{W} \ \tilde{Y}/\tilde{W} \ \tilde{Z}/\tilde{W}]^T \quad \mathbf{X} \sim [X \ Y \ Z \ 1]^T \quad (2.1)$$

2.2.1.2. Modelo de cámara agujero de alfiler

Este modelo es una aproximación del comportamiento de muchas cámaras reales, aunque en algunos casos puede mejorarse tomando en cuenta los efectos no-lineales (como son las

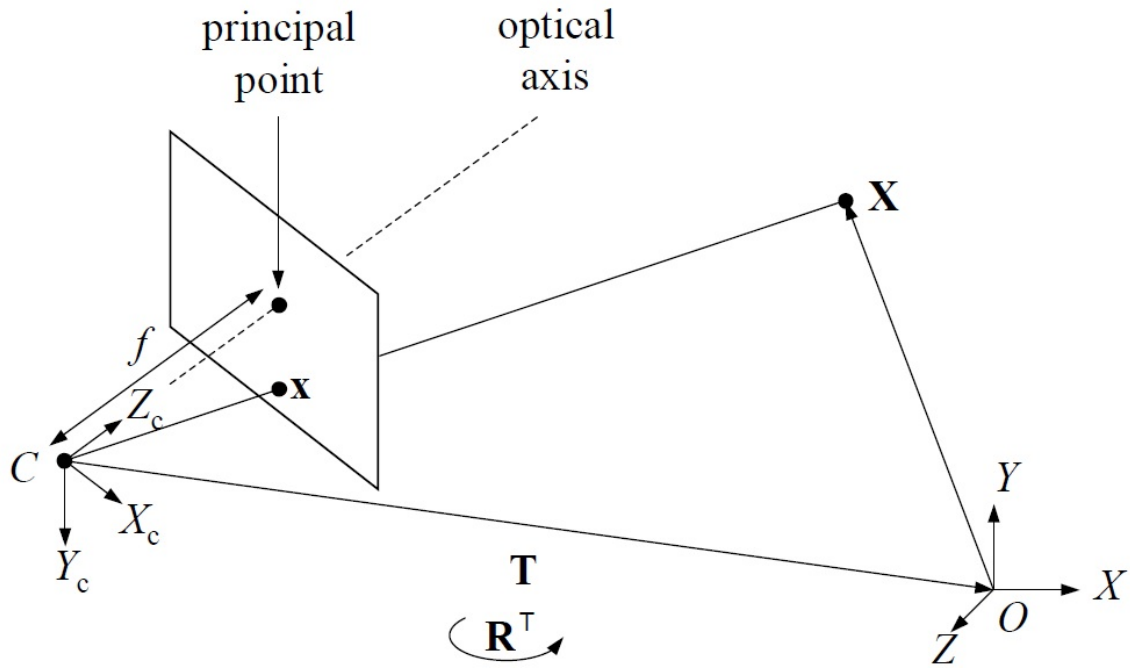


Figura 2.8: Proyección agujero de alfiler de un punto X sobre una imagen plana de la cámara (Adaptado de Robertson y Cipolla (2008))

distorsiones radiales). De acuerdo al modelo de proyección agujero de alfiler, la relación entre un punto 3D y su correspondiente punto en una imagen 2D tiene tres componentes, las cuales son descritas abajo como:

1. El primer componente es la transformación de cuerpo rígido que relaciona puntos $X \sim [X \ Y \ Z \ 1]^T$ en el sistema de coordenadas reales a puntos $X_c \sim [X_c \ Y_c \ Z_c \ 1]^T$ en el sistema de coordenadas de la cámara (ver Fig. 2.8). Esta transformación puede ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde \mathbf{R} es una matriz de rotación de 3×3 que representa la orientación de la cámara y \mathbf{T} es un tri-vector que representa el vector de traslación de la cámara. La posición real del

origen es \mathbf{O} en el sistema de coordenadas de la cámara. Estos parámetros son conocidos como parámetros extrínsecos y describen la postura de la cámara.

2. El segundo componente es la transformación 3D a 2D que relaciona puntos 3D $X_c \sim [X_c \ Y_c \ Z_c \ 1]^T$ (en el sistema de coordenadas de la cámara) a puntos 2D $x \sim [x \ y \ 1]^T$ sobre la imagen plana de la cámara. Mediante el uso similar de triángulos (ver Fig. 2.8), se obtiene la siguiente relación:

$$x = f \frac{X_c}{Z_c} \quad y = f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (2.3)$$

Donde f es la longitud focal. Cambiando el valor de f podemos escalar la imagen, se puede reemplazar $f = 1$ pero sin la matriz de calibración de la cámara (Abajo). Entonces, usando coordenadas homogéneas, la relación puede ser expresada por la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Porque \tilde{x} solo esta definido hasta escalar, es independiente de la magnitud de X_c , depende solo sobre la dirección del punto 3D relativo a la cámara.

3. El componente final es la transformación 2D a 2D que relaciona los puntos \tilde{x} sobre la imagen plana de la cámara a la coordenada en pixeles $\tilde{u} \sim [u \ v \ 1]^T$. Esto queda escrito como sigue:

$$\tilde{u} \sim K\tilde{x} \quad (2.5)$$

Donde K es una matriz triangular superior de calibración de la cámara de la forma:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & u_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Donde α_u y α_v son los factores de escala, s es el factor de oblicuidad, y $\mathbf{u}_0 = [u_0 \ v_0]^T$ es la posición del punto principal. Estos son los parámetros intrínsecos de la cámara. Usualmente los píxeles son asumidos para ser cuadrados en el caso $\alpha_u = \alpha_v = \alpha$ y $s = 0$. Por lo tanto, α puede ser considerada como la distancia focal de la lente expresada en unidades de píxeles. El punto principal es donde el eje óptico intersecta el plano de la imagen de la cámara.

Finalmente, es conveniente combinar las ecuaciones (2.1), (2.4) y (2.5) en una simple ecuación lineal. Usando coordenadas homogéneas, un punto 3D X es relacionado a su posición en píxeles u a través de un arreglo en la imagen 2D por la siguiente relación:

$$\tilde{u} \sim P\tilde{X} \quad (2.7)$$

Donde $P \sim K[R \ T]$ es una matriz de proyección de 3 X 4 elementos.

2.2.1.3. Distorsión radial

La distorsión de la lente significa que algunos puntos de la imagen están desplazados de su posición predicha por el modelo de proyección agujero de alfiler. Bajo la distorsión

radial, los puntos de la imagen son desplazados en una dirección radial desde el centro de distorsión. En muchos casos, el modelo de proyección lineal en la ecuación (2.7) puede ser mejorado tomando en cuenta este efecto. Dejando $x \sim [x \ y \ 1]^T$ que indica el punto asociado a la imagen con la posición del píxel $u \sim [u \ v \ 1]^T$, es decir $\tilde{x} \sim K^{-1}\tilde{u}$. Bajo la asunción que el centro de distorsión es el mismo que el punto principal, la distorsión puede ser corregida usando la ecuación (2.8) (Weng *et al.*, 1992).

$$\hat{x} = x + L(r)x \quad \hat{y} = y + L(r)y \quad (2.8)$$

Donde $[\hat{x} \ \hat{y}]^T$ es el punto corregido para $[x \ y]^T$ y $r^2 = x^2 + y^2$. $L(r)$ es la función de distorsión y puede ser aproximada por $L(r) \approx k_1 r^2 + k_2 r^4$. k_1 y k_2 , los coeficiente de distorsión radial son considerados como parámetros intrínsecos de la cámara. En muchos casos, la distorsión radial será asumida como $k_1 = k_2 = 0$. A veces es necesario encontrar un inverso de la relación de la ecuación (2.8) para la corrección de distorsión radial. Sin embargo, la función inversa no es fácil de expresar matemáticamente. Por lo tanto, bajo la asunción que la distorsión radial es pequeña, a menudo se usa la siguiente aproximación:

$$x \approx \hat{x} - L(r)\hat{x} \quad y \approx \hat{y} - L(r)\hat{y} \quad (2.9)$$

2.2.1.4. Modelo de distorsión de Brown

Es un modelo de distorsión no-lineal que permite una gran aproximación del campo de distorsión real asumiendo una proyección central de la cámara. Este algoritmo esta implementado en el programa Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2015) y cuenta con un conjunto de ecuaciones descritas abajo.

$$x = X/Z \quad (2.10)$$

$$y = Y/Z \quad (2.11)$$

$$r = \text{sqrt}(x^2 + y^2) \quad (2.12)$$

$$x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy \quad (2.13)$$

$$y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \quad (2.14)$$

$$u = c_x + x'f_x + y'skew \quad (2.15)$$

$$v = c_y + y'f_y \quad (2.16)$$

Donde (X, Y, Z) son las coordenadas de los puntos en el sistema de coordenadas local de la cámara. (u, v) son las coordenadas de los puntos en el sistema de coordenadas de la imagen y están en píxeles. (f_x, f_y) son la distancia focal. (c_x, c_y) son las coordenadas del punto principal. K_1, K_2, K_3, K_4 son los coeficientes de distorsión radial de la cámara. P_1, P_2 son los coeficientes de distorsión tangencial de la cámara. Finalmente, *skew* viene a ser el factor de oblicuidad entre los ejes x, y .

2.2.2. Geometría de dos vistas

Conseguida la proyección de un punto 3D en una imagen, su proyección en una segunda imagen esta restringida a una línea epipolar correspondiente como muestra la Fig. 2.9. La línea epipolar \tilde{l}' puede ser visto como la proyección del rayo que va desde el centro óptico C a través del punto de la imagen \tilde{x} sobre el plano de la primera imagen. Esto es equivalente a intersectar el plano generado por los centros ópticos C, C' y el punto de la imagen \tilde{x} (plano epipolar) con el plano de la segunda imagen. Notar que las líneas epipolares en una imagen tienen un punto común que es la proyección del segundo centro óptico. Este punto es llamado el epipolo y esta denotado por \tilde{e} y \tilde{e}' para la primera y segunda cámara como muestra la figura 2.9. La restricción epipolar puede ser formulada algebraicamente usando la matriz esencial E , la cual relaciona puntos sobre la imagen correspondiente a dos vistas. Considerando dos modelos de cámara con matrices de proyección P y P' . Conseguido un punto Euclidiano X' en el sistema de coordenadas de la cámara C' , su posición X en el sistema de coordenadas de C es conseguida por:

$$X = RX' + T \quad (2.17)$$

Donde R es una matriz de rotación de 3×3 y T es un 3-vector. Pre-multiplicando ambos lados por $X^T [T]$, conseguimos la siguiente relación:

$$\tilde{X}^T E \tilde{X}' = 0 \quad (2.18)$$

Hay que notar que E depende solo de R y T . Por lo tanto, esta definido solo hasta un factor de escala. Así, se tiene cinco parámetros.

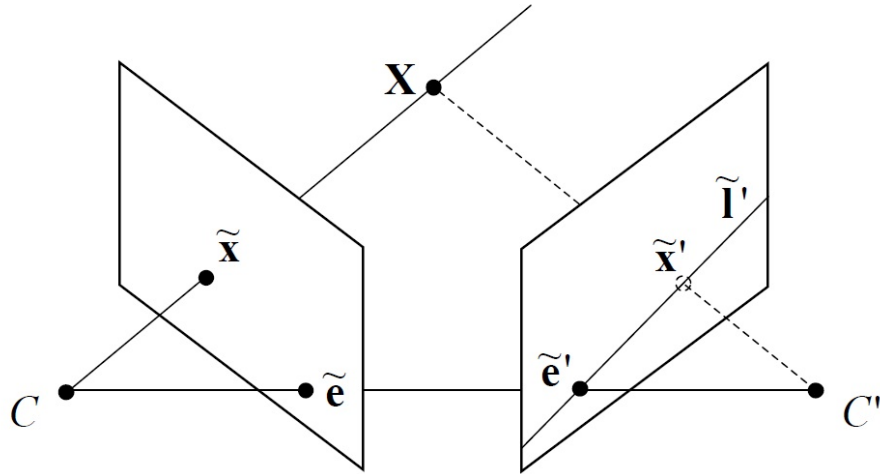


Figura 2.9: Geometría epipolar para dos cámaras (Adaptado de Robertson y Cipolla (2008))

2.2.3. Triangulación

Conseguida las matrices de proyección, los puntos 3D pueden ser calculados a partir de la posición de las imágenes en dos o mas vistas. Esto es conocido como el proceso de triangulación (Hartley y Sturm, 1997). Un punto 3D corresponde a un punto de intersección de los rayos proyectados atrás. Sin embargo, por el ruido de medición, los rayos proyectados no se intersectan generalmente. Así los puntos 3D deben ser considerados como un camino para minimizar un error métrico. La regla de oro estándar del algoritmo de reconstrucción minimiza la suma de errores cuadrados entre la posición de la imagen predicha y medida de los puntos 3D en todas las vistas en las cuales es visible.

$$\mathbf{X} = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \sum_i \| u_i - \hat{u}_i(P_i, X) \|^2 \quad (2.19)$$

Donde u_i y $\hat{u}_i(P_i, X)$ son la posición de la imagen medida y predicha para la vista i (ver Fig. 2.10). Bajo la asunción que el ruido de medición de la coordenada de la imagen es Gaussiana-distribuida, este enfoque da la máxima probabilidad de solución para X . Hartley y Sturm (1997) describen una solución no-interativa para dos vistas. Para mas que dos vistas, la minimización puede ser lograda iterativamente por una optimización no-lineal. Sin embargo,

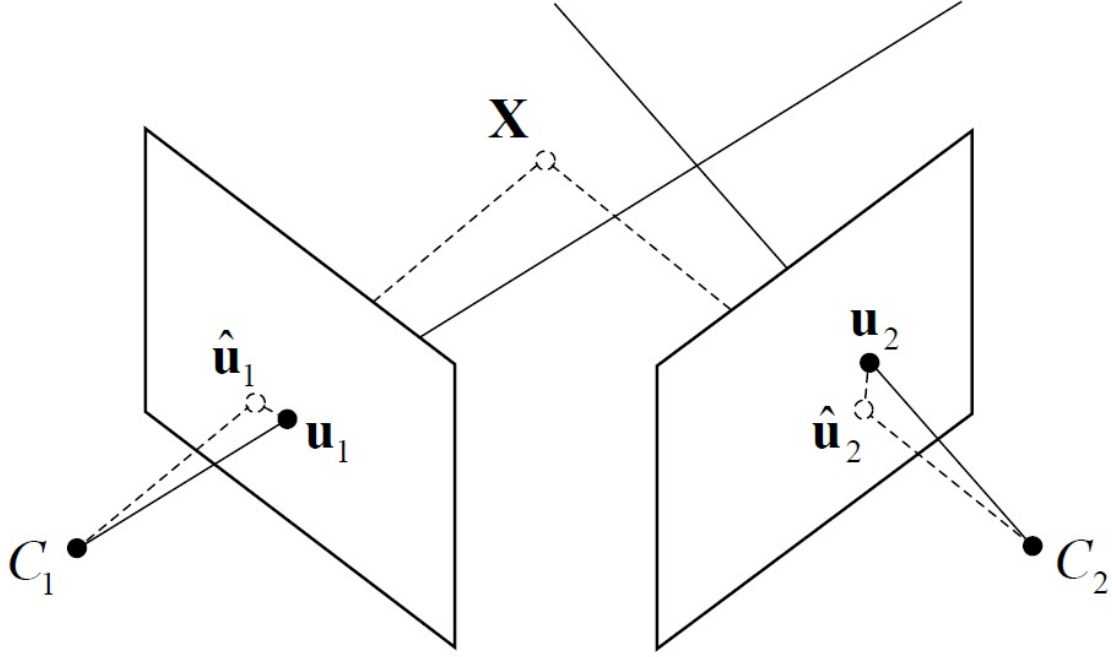


Figura 2.10: Ilustración del proceso de triangulación (Adaptado de Robertson y Cipolla (2008))

este enfoque necesita una buena inicialización, de otra forma se podría fallar por encontrar un mínimo local de costo-solución. Una estrategia popular trabaja usando la ecuación (2.7). Considerando el tri-vector homogéneo u_i y $P_i\tilde{X}$ que son paralelos, es posible escribir:

$$[\tilde{u}_i](P_i\tilde{X}) = 0 \quad (2.20)$$

Esta ecuación tiene tres filas pero proporciona solo dos restricciones sobre \tilde{X} desde cada fila pero puede ser expresado como una combinación lineal de las otras dos. Todas las otras restricciones pueden ser ordenadas en una ecuación matricial de la forma.

$$A\tilde{X} = 0 \quad (2.21)$$

Donde A es una matriz de $3n \times 4$ y n es el número de vistas en la cual los puntos reconstruidos son visibles. La solución requerida para el punto 3D homogéneo \tilde{X} minimiza $\|A\tilde{X}\|$ sujeto a $\|\tilde{X}\| = 1$ y esta dada por el eigen-vector de $A^T A$ correspondiente a pequeños eigen-

valores. Se puede encontrar por el valor singular de descomposición de la matriz simétrica $A^T A$.

2.2.4. Ajuste de paquetes

A partir de las características de la imagen u_{ij} , el algoritmo SFM da un estimado inicial de las matrices de proyección P_i y puntos 3D X_j . Usualmente sera necesario refinar este estimado usando una optimización iterativa no-lineal para minimizar una apropiada función de costo. Este proceso es conocido como un ajuste de paquetes (Brown, 1976). El ajuste de paquetes trabaja minimizando una función costo que esta relacionado a una suma de pesos de errores de re-proyección cuadrada. En este proceso se utiliza usualmente la iteración de Gauss-Newton considerando un paso apropiado para una convergencia rápida.

2.2.5. Técnicas de integración de mallas

La integración de mallas vienen a ser el proceso de construir el modelo 3D de mallas. Existen cuatro métodos para lograr este propósito que son los métodos basados en: Delaunay, superficies, superficies paramétricas y superficies volumétricas.

2.2.5.1. Métodos basados en Delaunay

Estos métodos usan el complejo de Delaunay $D(S)$ asociado a un conjunto de puntos S en \mathbb{R}^3 . Esta variable impone una estructura de conectividad de los puntos y los métodos extraídos a sub-complejos de $D(S)$ para representar la superficie. Esta clase de algoritmos trabaja sobre una nube de puntos, Edelsbrunner (1998) presenta una revisión de ellos. La limitación de estos algoritmos es que son sensitivos al ruido porque interpolan los datos. Estos algoritmos son costosos en rendimiento, ya que usualmente limitan el tamaño de los

datos que pueden ser procesados (Santos Junior *et al.*, 2012).

2.2.5.2. Métodos basados en superficie

Estos métodos crean o manipulan directamente las superficies. En cada rango de vista se define una superficie parcial del objeto, construido a partir del proceso de triangulación de los puntos vecinos en la malla del rango de vista. Estos algoritmos pueden fallar en regiones de alta curvatura. Estos métodos usan fragmentos de los modelos 3D de cada vista. Por lo tanto, genera ruido en cada vista (Santos Junior *et al.*, 2012).

2.2.5.3. Superficies paramétricas

Están basados en deformar una aproximación inicial del objeto a través del uso de fuerzas externas, reacciones internas y constantes. Se puede imaginar que esto es como un balón al que inflamos o desinflamos para asumir la forma del objeto. Otros enfoques utilizan uno o mas superficies generadas automáticamente para representar el modelo integrado. Una limitación del método es la dificultad en representar la forma de las esquinas, ya que la mayoría de los métodos asume una función diferenciable continua para representar la superficie. Otro problema es encontrar el balance entre los efectos de suavizado y la no eliminación del ruido superficial que pueden llenar agujeros incorrectamente (Santos Junior *et al.*, 2012).

2.2.5.4. Métodos volumétricos

La idea básica de estos métodos es crear una representación volumétrica del modelo final basado en vóxels. Cada vóxel tiene un valor que corresponde a la distancia entre el vóxel y la superficie integrada. El signo de la distancia indica si el vóxel está dentro o fuera del objeto. La superficie del objeto es definida por la iso-superficie con un valor de distancia 0. Esta iso-superficie es extraída con el algoritmo MC (Cubes, 1995; Lorensen y Cline, 1987). Esta

representación es también llamada campo de distancia señalada y es ampliamente usada en computadoras gráficas. La limitación principal de estos métodos es su rendimiento en términos de uso de memoria y tiempo de procesamiento (Santos Junior *et al.*, 2012).

2.2.6. Texturado del modelo de mallas

La textura del modelo 3D en el estudio de PG es producida mediante un atlas de texturas (Lévy *et al.*, 2002). La generación del atlas de texturas esta compuesto por las siguientes etapas:

1. Segmentación en gráficos: La segmentación es el proceso de partir el modelo en un conjunto de gráficos. Esta segmentación puede ser realizado por el usuario (Krishnamurthy y Levoy, 1996; Pedersen, 1995) o de forma automática tomando en cuenta las normales de las caras de la reconstrucción 3D (Maillot *et al.*, 1993), distintos métodos multi-resolución (Guskov *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 1998) relacionan gráficos correspondientes a bases complejas simples (Sander *et al.*, 2001).
2. Parametrización de los gráficos: La parametrización es el proceso de desplegar cada gráfico, las cuales serán puestos en correspondencia con un subconjunto de \mathbb{R}^2 . Este proceso esta basado en mapas armónicos discretos que son ampliamente usados (Eck *et al.*, 1995). Ellos son aproximaciones de mapas armónicos continuos que minimizan el criterio de dispersión métrica (Eells y Lemaire, 1988).
3. Empaquetamiento de gráficos en un espacio de texturas: El empaquetamiento es el proceso de juntar los gráficos en un mapa de texturas. Encontrar el empaquetamiento óptimo del gráfico en el espacio de texturas es conocido como el problema de empaquetamiento bin. Los algoritmos para este problema toman una gigantesca cantidad de tiempo debido a

que es un problema NP-completo. El problema NP-completo es un problema de decisión en la teoría de la complejidad computacional. El empaquetamiento puede ser realizado por triángulos individuales o rectángulos delimitadores (Lévy *et al.*, 2002).

2.3. Escáner Láser Terrestre como herramienta de digitalización 3D

El ELT utiliza el principio de tiempo de vuelo para grabar la posición en coordenadas de millones de puntos que describen la superficie de la estructura (Haddad, 2011) usando pulsos de luz. Este principio mide el tiempo que demora el pulso de luz en recorrer la distancia entre el dispositivo y el objetivo. Este dispositivo tiene la desventaja de tener un alto costo pero tiene la ventaja de coleccionar datos con alta precisión ($\pm 1mm$) y velocidad con un radio de adquisición de hasta 962,000 puntos por segundo.

La ET es un instrumento que combina un teodolito electrónico con un dispositivo electrónico medidor de distancias. Este instrumento usa un láser infrarrojo para medir distancias y el teodolito electrónico para calcular ángulos basados en puntos de referencia. El dispositivo colecciona datos geográficos con una precisión de 1 mm sobre distancias de varios cientos de metros (Schneider y Panich, 2008) con un ratio de un punto coordenada por pulso de luz restringiéndose a una cantidad limitada de información.

2.4. Modelos sólidos

Los modelos sólidos son datos de tres niveles que presentan información geométrica y topológica de un objeto (Farin *et al.*, 2002). Dentro del primer nivel se encuentran los puntos, en el segundo nivel los segmentos y en el tercer nivel las caras triangulares tal como muestra

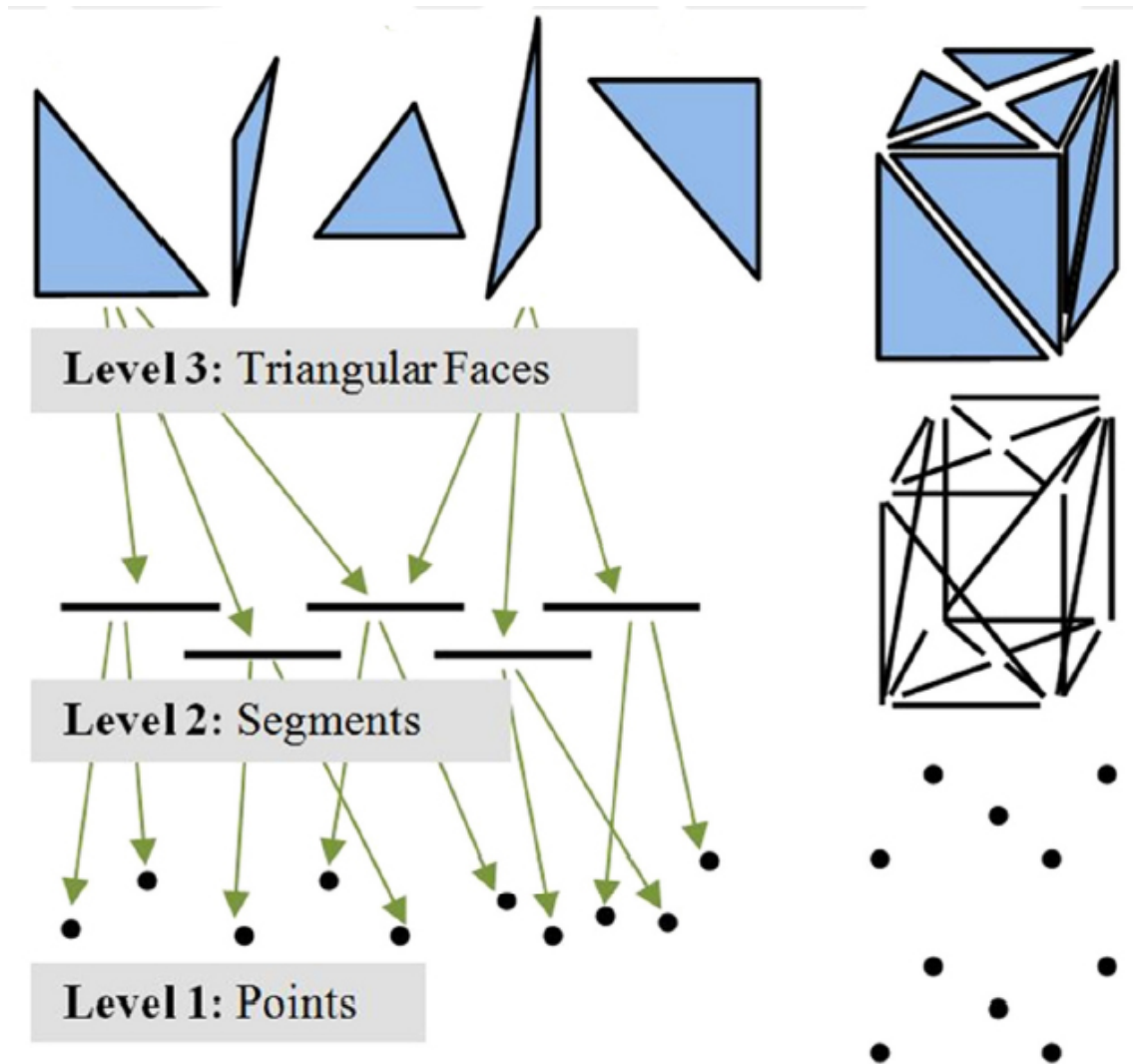


Figura 2.11: Descripción de los datos de tres niveles (Adaptado de Zvietcovich *et al.* (2015)).

la Fig. 2.11. Estos modelos son desarrollados y manipulados en espacios de modelamiento sólido o espacios Euclidianos \mathbb{R}^3 . Además, es posible realizar operaciones entre modelos sólidos como las operaciones Booleanas las cuales están implementadas en programas CAD. Considerando dos sólidos S_1 y S_2 , las operaciones booleanas pueden ser $S_1 \cup S_2$, $S_1 \cap S_2$, $S_1 - S_2$ y $S_1 \uplus S_2$ tal como muestra la Fig. 2.11.

Matemáticamente, un sólido se puede representar como un conjunto de puntos S que tienen que satisfacer que para cada punto p , los puntos alrededores de p quedan definidos como un balón abierto y centrado en p , estos puntos tienen que ser tri-dimensionales y pertenecer al espacio \mathbb{R}^3 .

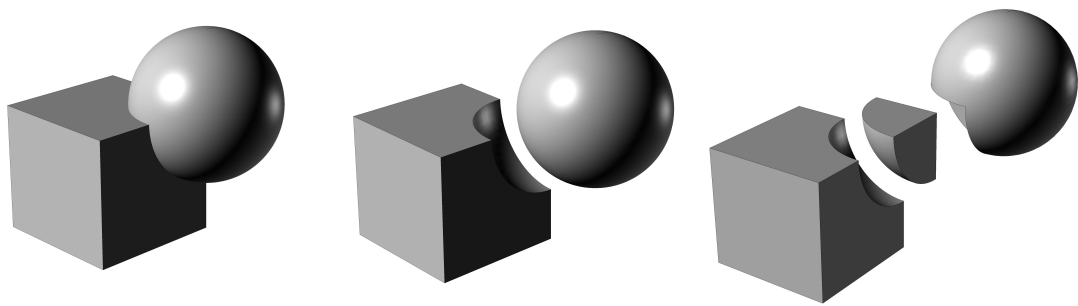


Figura 2.12: Operaciones booleanas entre sólidos. Las primeras dos imágenes muestran $S_1 \cup S_2$ y $S_1 \cap S_2$ respectivamente. La tercera imagen $S_1 - S_2$ y $S_1 \uplus S_2$. (Adaptado de <https://rhino4all.wordpress.com/cad-ii-2014-a/actividad-08/>)

Capítulo 3

Metodologías de digitalización

3.1. Materiales y métodos

En los últimos años han aparecido una serie de metodologías de digitalización que permiten construir modelos 3D. Estas metodologías se diferencian por el dispositivo empleado en el estudio. Los dispositivos utilizados pueden ser ELT, ET, sensor Kinect, cámara fotográfica y Drones.

El ELT esta basado en el principio de tiempo de vuelo, los cuales fueron explicados en el capítulo 2.

El estudio de PG esta principalmente basado en los algoritmos SFM y DMVR, los cuales fueron explicados en el capítulo 2.

El Kinect es un sensor 3D de profundidad que esta basado en técnicas de luz para obtener el rango y color de las imágenes en una alta variedad de escenarios con una gran velocidad de adquisición. Este dispositivo puede ser utilizado para generar modelos 3D completos de estructuras aplicando un flujo de trabajo para registrar automáticamente la nube de puntos (Weber *et al.*, 2015). La digitalización de estructuras basado en el sensor Kinect proporciona errores de 6.3 mm en exactitud y de 2.2 mm en precisión el cual fue reportado por Quintana *et al.* (2014). Este enfoque es potencialmente conveniente porque no es caro y tiene una fácil operación.

A partir de estas metodologías de digitalización se pueden obtener modelos de mallas trianguladas que representan la superficie con un alto nivel de detalle dependiendo de la cantidad de puntos adquiridos y la precisión de la técnica o dispositivo. La nube de puntos de estos estudios son utilizados para crear mallas, superficies y curvas de nivel. La ET fue creada para construir curvas de nivel pero su aplicación es limitada debido a la baja cantidad de puntos que se obtiene y el demasiado tiempo que se emplea en la sesión de trabajo (Schneider y Panich, 2008).

3.2. Levantamiento digitalización con estación total

El levantamiento con ET fue llevado a cabo para generar planos topográficos del Camino-PUCP basados en planos de curvas de nivel. El departamento de Arqueología de la PUCP fue el que dirigió el levantamiento con ET en el año 2013. El modelo 3D fue construido usando el programa AutoCAD en el cual se tuvo que extrapolar los datos de los planos de curvas de nivel al modelo de mallas. Este modelo 3D se tuvo que exportar al programa Meshlab para generar el modelo final 3D que estuvo compuesto por 59,399 vértices y 111,780 caras. La Figura 3.1.a muestra el levantamiento con ET sobre la base de curvas de nivel. La construcción del modelo 3D final tomó 1 hora de tiempo.

3.3. Levantamiento y digitalización con Kinect

La reconstrucción 3D del muro del Camino-PUCP fue realizado usando el sensor Kinect (Kinect para Microsoft XBOX 360). El Kinect fue localizado a un metro del muro y estuvo sostenido por un trípode ubicado adecuadamente. Durante el proceso de adquisición el dispositivo fue desplazado en forma paralela a los muros. Quintana (Quintana *et al.*, 2014)

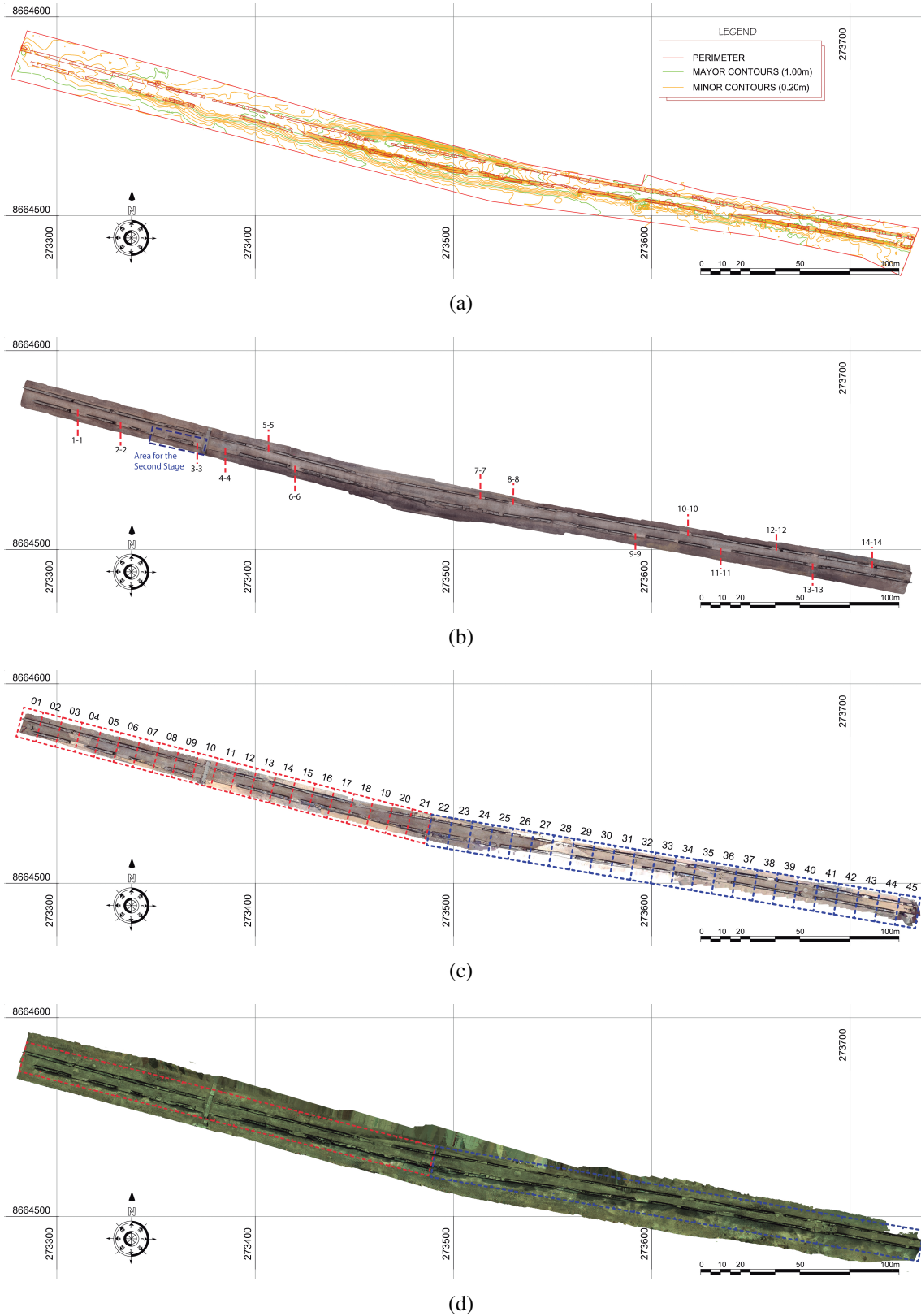


Figura 3.1: Modelo 3D georeferenciado del Camino-PUCP: (a) Levantamiento con ET a curvas de nivel, (b) Levantamiento con PG y ubicación de las distancias para las mediciones manuales, (c) Levantamiento con ELT Faro 3D y regiones para la transformada de Fourier 2D, (d) Levantamiento con ELT Leica ScanStation C10 y regiones para la Entropía de Shanon.

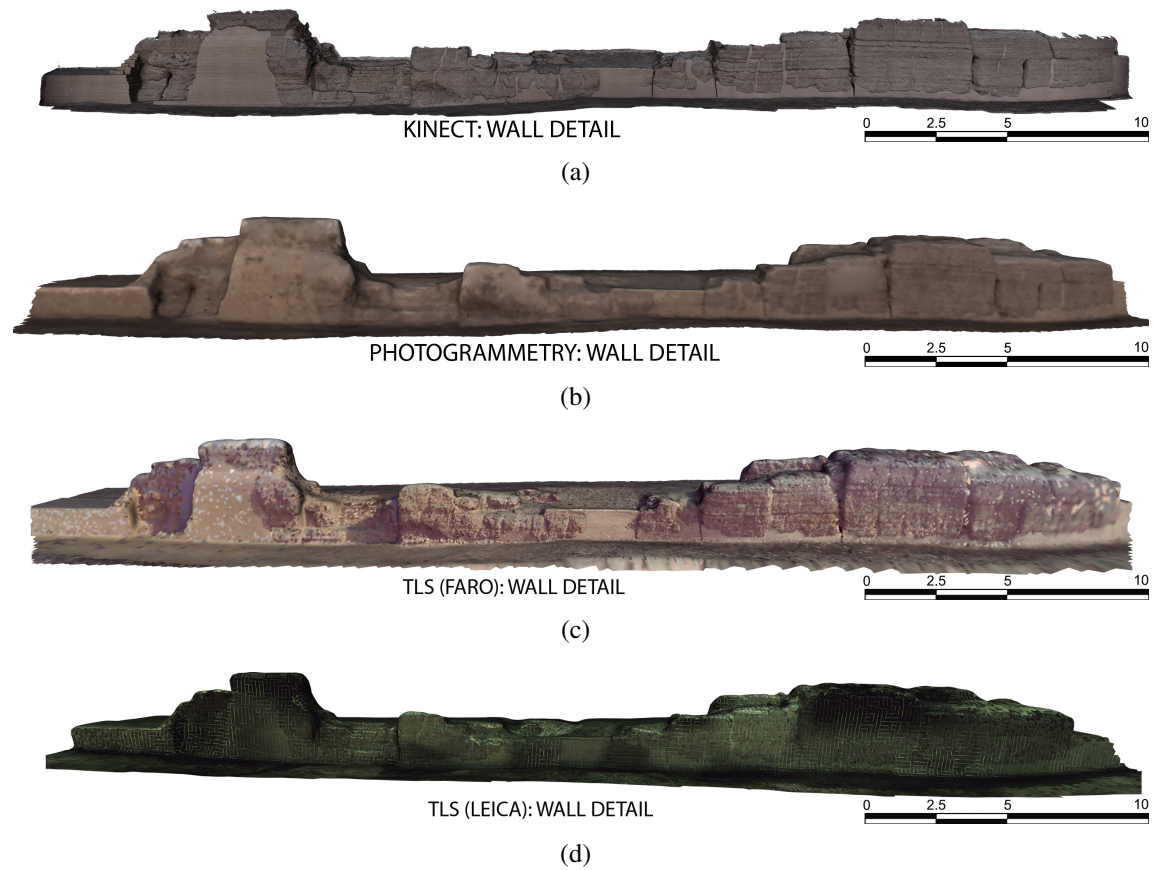


Figura 3.2: Detalle de 35 m en longitud del Camino-PUCP: (a) Kinect, (b) PG, (c) ELT Faro 3D, (d) ELT Leica ScanStation C10.

ha juntado un rango de 183 imágenes y 200 muestras consecutivas en un rango de 35 m de longitud. Estas muestras fueron alineadas usando el algoritmo Speeded up Robust Features (SURF) (Bay *et al.*, 2008) y refinadas con el algoritmo ICP (Almhdie *et al.*, 2007) implementados en el programa Meshlab. El rango de profundidad de imágenes fue transformado en una nube de puntos en que la relación entre cada coordenada del punto y su color fueron preservados. La Figura 3.2 muestra la reconstrucción 3D usando los datos del Kinect. El modelo representa una sección de 35 m del Camino-PUCP que tiene 1,610,345 vértices y 811,444 caras.

3.4. Levantamiento y digitalización con fotogrametría

En esta sección se van a detallar el proceso de recolección de datos y la construcción del modelo 3D a partir del estudio de Fotogrametría.

3.4.1. Recolección de datos

En esta etapa se tomaron fotos aéreas del Camino-PUCP usando un Vehículo Aéreo no Tripulado (Dron). Se tomaron 1102 fotografías aéreas donde la distancia promedio entre la cámara y el Qhapaq Ñan fue de 10 m a lo largo de todo el camino inca. Las fotografías fueron tomadas en cuatro líneas a lo largo de los dos muros del Camino Inca. En cada línea de fotografías se capturaron las caras y la parte superior de cada muro.

3.4.2. Digitalización y reconstrucción 3D

En esta sección se analiza el modelo 3D obtenido con el Programa Agisoft PhotoScan. El programa permite realizar reconstrucciones 3D a partir de un conjunto de fotografías que describen un objeto. El sistema calibra automáticamente la posición de las fotos basándose en información Exchangeable Image File Format (EXIF) almacenadas en las imágenes. El Agisoft PhotoScan es un software autónomo que realiza procesamiento de imágenes digitales para generar modelos 3D. Esta data puede ser utilizada en aplicaciones GIS, documentación del patrimonio cultural y producción de efectos visuales como mediciones indirectas de objetos de varias escalas (Agisoft, 2015). Las reconstrucciones 3D en el programa Agisoft se desarrollan siguiendo cuatro pasos las cuales son los siguientes:

1. Alinear las fotografías y construir la nube de puntos esparcida, existen tres niveles de detalle: Alta, Media y Baja. En la calidad Alta se trabaja con las fotografías originales.

En la calidad Media, las imágenes se reducen por un factor de cuatro. Finalmente, en la calidad Baja las imágenes son reducidas por un factor de cuatro a partir de la calidad Media.

2. Construir la nube de puntos densa, existen cinco niveles de detalle: Super-Alta, Alta, Media, Baja, Inferior. En la calidad Super-Alta se trabaja con las fotos originales, mientras cada etapa siguiente implica una reducción de la imagen por un factor de cuatro.
3. Construir el modelo de mallas, existen tres niveles de detalle: Alto, Medio y bajo. Estos niveles de detalle son calculados a partir de la nube de puntos densa. El ratio con el que trabaja cada nivel de detalle es $1/5$, $1/15$ y $1/45$ respectivamente.
4. Agregar textura al modelo de mallas, se determina la forma como la textura del objeto será empaquetada en el mapa de texturas llamado Atlas. El Atlas es una imagen larga que cuenta con sub-imágenes, cada una de las cuales es la textura para cada parte del objeto 3D.

El proceso de construcción del modelo de Reconstrucción 3D a partir del estudio de PG consta de ocho etapas tal como muestra el flujo de trabajo de la Fig. 3.3.

1. Se toman las fotografías aéreas del Camino Inca. Además, se toman las medidas de objetos o lados conocidos.
2. Se cargan las fotografías al programa Agisoft PhotoScan.
3. Se genera la nube de puntos esparcida considerando un nivel de detalle mayor o igual a MID.
4. Se genera la nube de puntos densa considerando un nivel de detalle mayor o igual a MID.

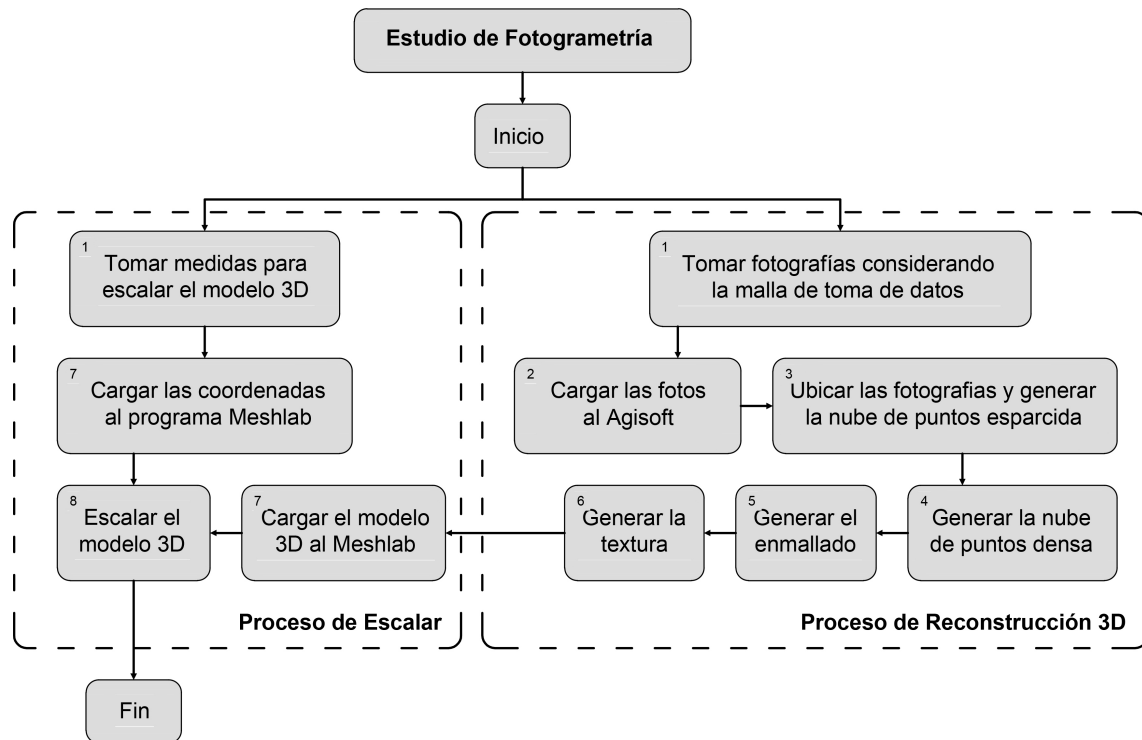


Figura 3.3: Diagrama de flujo para realizar reconstrucciones 3D a partir del estudio de PG.

5. Se genera el enmallado con un nivel de detalle mayor o igual a MID. Esto permitirá obtener el modelo de mallas que puede ser reducido en términos de caras y vértices.
6. Se genera la textura del modelo, el cual será cargado a un mapa Atlas. El tamaño en píxeles de este mapa determinará en gran parte la magnitud del proyecto.
7. Se exporta el modelo 3D del Agisoft al Meshlab.
8. Tomando en consideración las medidas tomadas en el paso 1 se escala el modelo 3D.

La Figura 3.1.b muestra el modelo 3D del Camino Inca a partir de los datos del Dron, las cuales fueron realizadas con un nivel de detalle Medio. Este modelo tiene 743,924 vértices y 3,477,317 caras. El modelo de la Figura 3.2.b corresponde a una sección de 35 m del Camino-PUCP. Este modelo está conformado por 110,975 vértices y 55,987 caras. No se utilizó un nivel de detalle Alto debido a que la capacidad de cómputo era limitada.

3.5. Levantamiento y digitalización con escáner láser terrestre Faro

En esta sección se va a detallar el proceso de recolección de datos y la construcción del modelo 3D a partir del estudio de ELT Faro 3D.

3.5.1. Recolección de datos

El levantamiento del Camino-PUCP fue ejecutado con 29 sesiones, estas sesiones fueron separadas con distancias de 5-70 m entre puntos de escaneo. La distancia del ELT Faro al monumento fueron de 2-80 m, mientras la distancia promedio entre dos puntos consecutivos dentro de la nube de puntos fue de 1 mm. Las estaciones de escaneo fueron ubicadas en tres líneas del Qhapaq Ñan. La primera y tercera línea fue localizada a cada lado exterior del Camino-PUCP, mientras la segunda línea fue ubicada en el centro del Qhapaq Ñan, entre los dos muros. La base de datos total fue juntado en ocho horas a lo largo de dos días y tiene 800 millones de puntos.

3.5.2. Digitalización y reconstrucción 3D

Para construir el modelo de superficies se empleará el algoritmo PSR porque presenta modelos más prácticos y esta implementada en el Meshlab. El software libre llamado Meshlab permite administrar y editar nube de puntos densa compuesto de millones de puntos (Gruber *et al.*, 2004); además es posible generar modelos 3D de superficies. El proceso de construcción del modelo de reconstrucción 3D a partir del estudio de Escáner Láser consta de cinco etapas tal como muestra el flujo de trabajo de la Fig. 3.4.

1. Juntar las 29 sesiones de escaneo dentro de una nube de puntos densa con el software

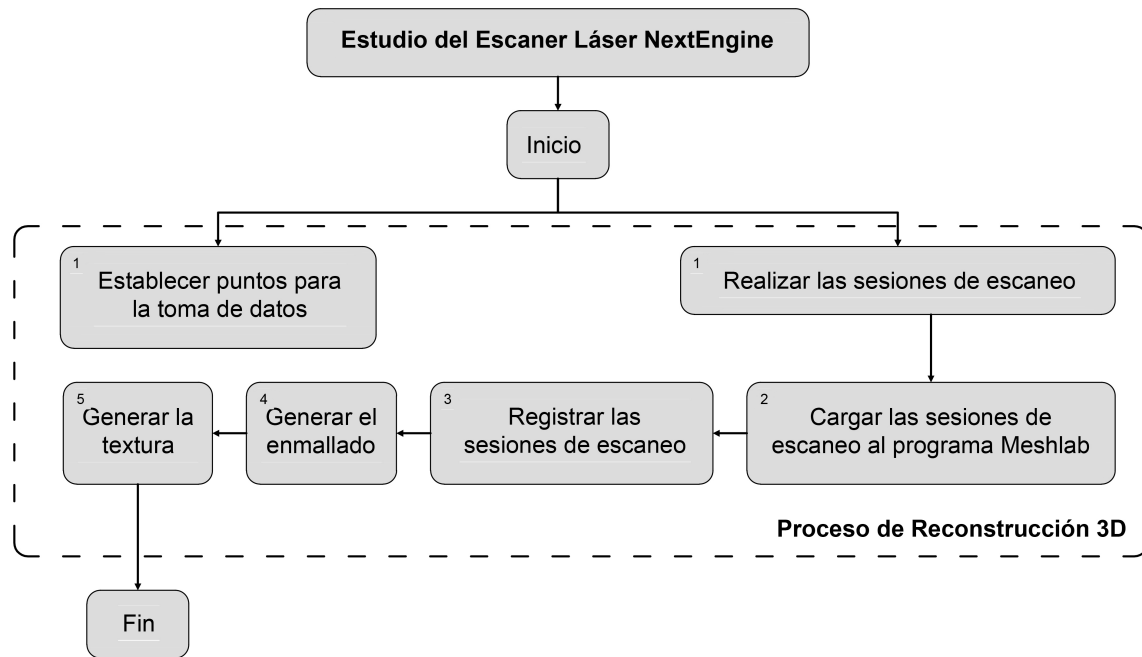


Figura 3.4: Diagrama de flujo para realizar Reconstrucciones 3D a partir del estudio de Escáner Láser.

Faro Scene (FARO, 2015).

2. Cargar la base de datos en el Meshlab para limpiar el ruido de la nube de puntos densa.
3. Construir un modelo 3D de superficies a partir de la nube de puntos densa usando el algoritmo Poisson Surface Reconstruction (Kazhdan *et al.*, 2006) implementado en el Meshlab.
4. Se juntan los modelos a nivel de mallas empleando puntos en común en ambos modelos. Este proceso utiliza el algoritmo ICP que es una herramienta incluida en el programa Meshlab.
5. Georeferenciar el modelo usando cuatro puntos de referencia en el Meshlab.

La Figura 3.1.c muestra la reconstrucción 3D del Camino-PUCP a partir de los datos del ELT Faro. El modelo de la Figura 3.1.c tiene 3,831,299 vértices y 7,654,371 caras. El modelo de la Figura 3.2.c corresponde a una sección de 35 m del Camino-PUCP y tiene 3,285,301 vértices y 6,564,513 caras.

3.6. Levantamiento digitalización con escáner láser terrestre Leica

En esta sección se realizó un levantamiento con el ELT de tiempo de vuelo Leica ScanStation C10 (GEOSYSTEMS, 2015a). Las especificaciones son parecidas que el ELT Faro. La cámara digital de color integrada tiene 4Mpxs de resolución. El levantamiento del Camino-PUCP fue realizado en 41 sesiones de escaneo, estas fueron separadas con distancias de 5-50m entre cada uno. La distancia del ELT al monumento está en un rango de 2-100m, mientras la distancia promedio entre dos puntos consecutivos fue menos de 1mm. Las estaciones de escaneo fueron localizadas en tres líneas del Qhapaq Ñan al igual que el ELT Faro. La base de datos total fue reunida en 15 horas a lo largo de tres días y tuvo 300 millones de puntos. La reconstrucción 3D del ELT Leica fue ejecutada en cinco etapas tal como muestra el flujo de trabajo de la Fig. 3.4 y que son las siguientes:

1. Juntar las 41 sesiones de escaneo dentro de una nube de puntos densa con el programa Cyclone (GEOSYSTEMS, 2015b).
2. Cargar la base de datos en el Meshlab para limpiar el ruido de la nube de puntos densa.
3. Construir un modelo 3D de superficies a partir de la nube de puntos densa usando el algoritmo PSR (Kazhdan *et al.*, 2006) que está implementado en el Meshlab.
4. Se juntan los modelos a nivel de mallas empleando puntos en común de ambos modelos. En este proceso se utiliza el algoritmo ICP que es una herramienta incluida en el programa Meshlab.
5. Georreferenciar el modelo usando cuatro puntos de referencia en el Meshlab.

La Figura 3.1.d muestra la reconstrucción 3D del Camino-PUCP a partir de los datos del ELT Leica. Este modelo tiene 744,737 vértices y 1,486,266 caras. El modelo 3D de la Figura 3.2 corresponde a una sección de 35 m del Camino-PUCP y tiene 20,542 vértices y 40,384 caras.

Capítulo 4

Análisis y resultados de la investigación

4.1. Evaluación de la precisión en modelos 3D

4.1.1. Medición de distancias euclidianas

Durante esta etapa, se midió el espesor de los muros del Camino-PUCP para comparar su precisión con los otros modelos. Se tomaron catorce distancias sobre diferentes puntos las cuales fueron numeradas en la Figura 3.1.a. Todas las mediciones fueron realizadas con una cinta métrica y están enumeradas como muestra la Tabla 4.1. La comparación entre las distancias euclidianas y el estudio de PG muestran un error medio de 1.6 cm con un error de desviación estándar de 1.7 cm. La comparación entre las distancias euclidianas y el estudio con ELT Faro muestra un error medio de 1 cm con una desviación estándar de 1.2 cm. La comparación entre las distancias euclidianas y ELT Leica muestra un error medio de 0.7 cm con una desviación estándar de 0.7 cm. Las diferencias entre los modelos 3D respecto a las distancias euclidianas comprueban que esta metodología es una alternativa para evaluar la precisión de modelos 3D.

Tabla 4.1: Comparación de distancias euclidianas entre el modelo real y los modelos 3D de PG, ELT Faro, ELT Leica.

Espesor de Muro	Modelo Real	Modelo PG	Modelo Faro	Modelo Leica	Error PG	Error Faro	Error Leica
1-1	1.406	1.402	1.404	1.394	0.004	0.002	0.012
2-2	1.330	1.261	1.355	1.355	0.069	0.025	0.025
3-3	1.916	1.902	1.922	1.926	0.014	0.006	0.010
4-4	1.759	1.756	1.759	1.771	0.003	0.000	0.012
5-5	0.391	0.362	0.380	1.396	0.029	0.011	0.005
6-6	1.729	1.719	1.744	1.732	0.010	0.015	0.003
7-7	0.930	0.937	0.912	0.916	0.007	0.018	0.014
8-8	0.819	0.793	0.773	0.803	0.026	0.046	0.016
9-9	1.146	1.163	1.144	1.153	0.017	0.002	0.007
10-10	1.222	1.243	1.239	1.223	0.021	0.017	0.001
11-11	1.220	1.191	1.212	1.224	0.029	0.008	0.004
12-12	1.335	1.345	1.323	1.328	0.010	0.012	0.007
13-13	1.202	1.197	1.205	1.205	0.005	0.003	0.003
14-14	1.423	1.448	1.416	1.418	0.025	0.007	0.005
Error Promedio (m)					0.016	0.010	0.007
Desviación Estándar (m)					0.017	0.012	0.007

4.1.2. Curvas de nivel

Una segunda fase de comparaciones entre modelos 3D se hizo en el programa AutoCAD Civil 3D analizando las curvas de nivel obtenidas a partir de cada modelo 3D. Para realizar esta fase de comparaciones la nube de puntos de cada modelo se tuvo que reducir a 50,000 puntos debido a la nube de puntos del levantamiento topográfico con ET. De esta manera se pueden comparar los modelos 3D en las mismas condiciones. Las Figuras 4.1.a y 4.1.b muestran la comparación de las curvas de nivel y la secciones transversales de cada modelo 3D considerando una nube de puntos de 50,000 puntos. La sección transversal H-H (Fig. 4.1.b) muestra diferencias de hasta 2 m entre los modelos de ELT (Faro y Leica) y ET. Estas diferencias ocurren debido a la falta de datos en el levantamiento con ET. Los modelos del ELT (Faro y Leica) y PG presentan diferencias de 0.80 m como muestran las secciones transversales C-C y D-D (Fig. 4.1.b). El ELT Faro y ELT Leica muestran diferencias de 5cm en distancia euclidiana debido a la cantidad de puntos reconstruidos. Esta metodología de comparaciones confirma que es posible evaluar la precisión de modelos en función a

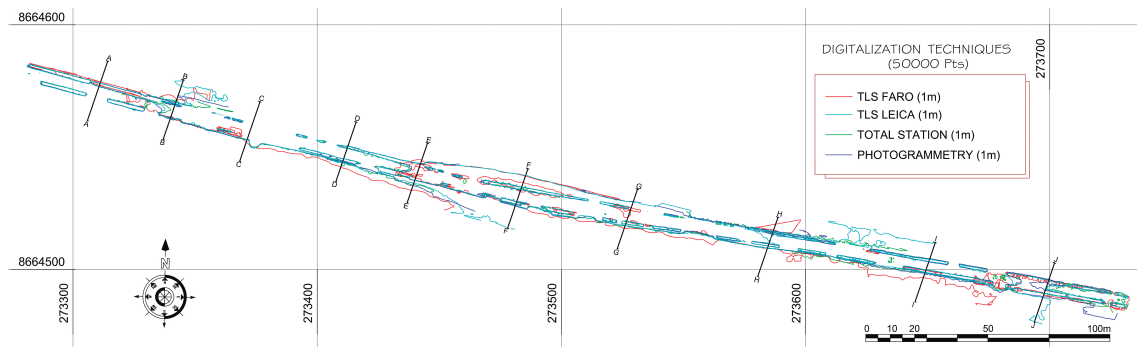
Tabla 4.2: Comparación de las curvas de nivel del estudio de ET y PG tomando como referencia el ELT.

SECCIÓN	ESTACIÓN TOTAL				FOTOGRAMETRÍA			
	MÁX. (m)	MÍN. (m)	PROM. (m)	DESV. (m)	MÁX. (m)	MÍN. (m)	PROM. (m)	DESV. (m)
A-A	1.99	0.30	1.17	0.58	0.85	0.04	0.38	0.26
B-B	2.57	0.02	0.82	0.81	1.93	0.17	0.61	0.60
C-C	0.96	0.04	0.42	0.29	0.58	0.02	0.27	0.18
D-D	1.94	0.24	0.76	0.60	1.85	0.00	0.50	0.54
E-E	2.67	0.02	0.99	0.83	1.58	0.08	0.70	0.42
F-F	3.21	0.24	1.31	0.95	0.71	0.00	0.34	0.22
G-G	3.12	0.04	1.06	0.97	0.99	0.25	0.51	0.27
H-H	3.92	0.20	1.31	1.01	2.02	0.19	0.65	0.59
I-I	2.29	0.04	0.99	0.68	1.25	0.13	0.60	0.34
J-J	3.92	0.01	0.94	0.24	2.02	0.00	0.53	0.16

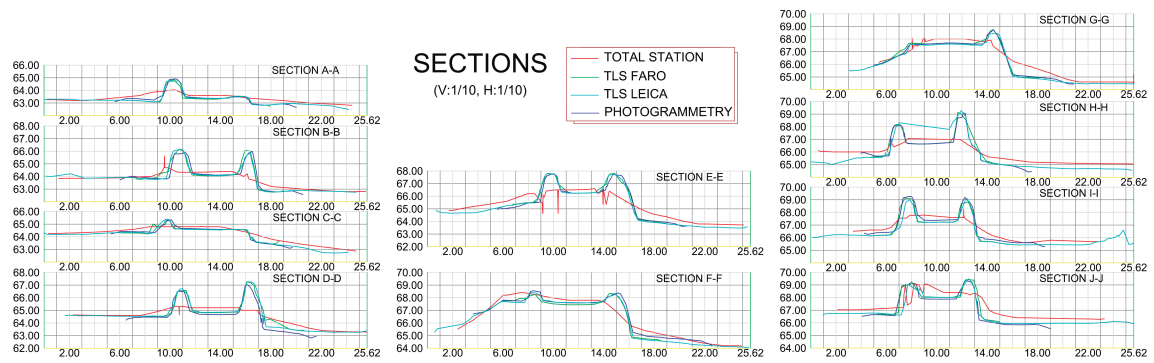
curvas de nivel y secciones transversales. La Fig. 4.1.c muestra la comparación de las curvas de nivel obtenidas a diferentes alturas de cada metodología de digitalización tomando en cuenta todos los puntos de la nube de puntos. Las curvas de nivel del levantamiento con ET muestran diferencias notables comparadas con los modelos del estudio de PG y ELT (Faro y Leica) debido a la falta de datos en el levantamiento con ET. Las curvas de nivel de PG y ELT muestran diferencias de hasta 0.20m de distancias euclidianas entre cada uno de estos estudios. Las curvas de nivel del ELT Faro y Leica muestran diferencias de hasta 0.10m en distancias euclidianas. Las comparaciones realizadas en cada sección se pueden resumir en la Tabla 4.2. Esta tabla fue elaborada realizando la diferencia de secciones punto a punto. Por lo tanto, se puede mostrar todos los valores estadísticos para cada sección.

4.1.3. Desviación de superficies

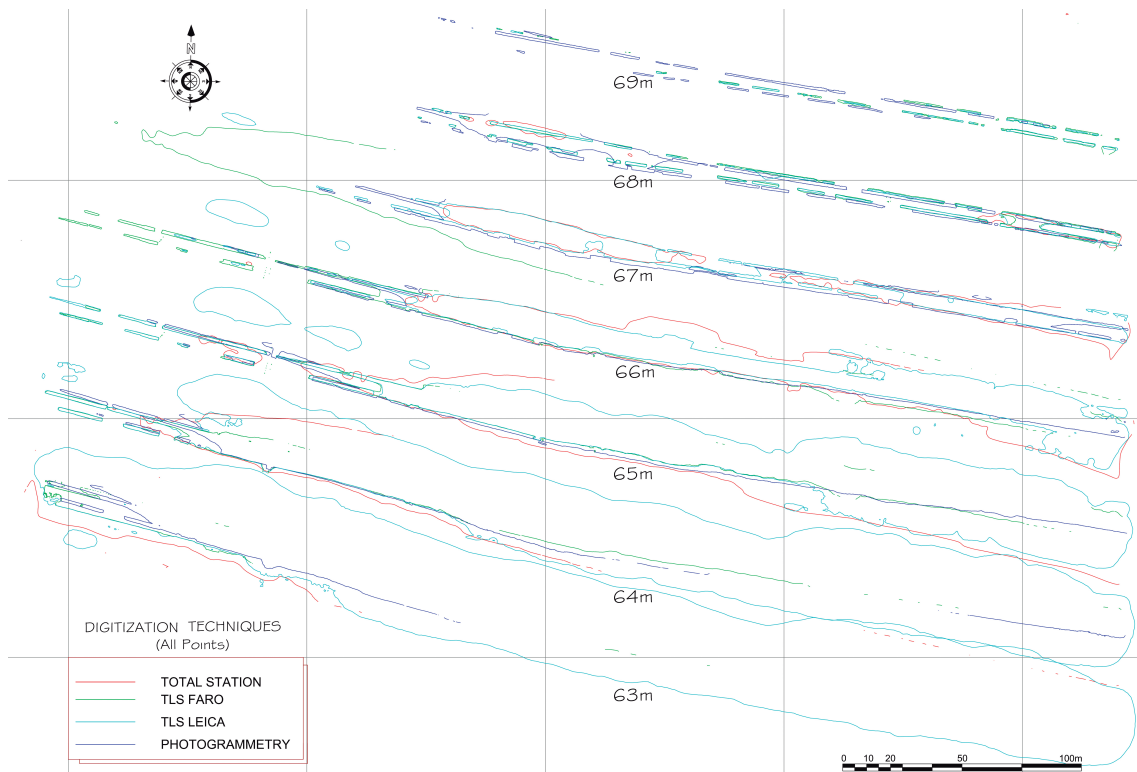
En esta sección se realizó una comparación basada en superficies 3D de cada técnica de digitalización utilizando el programa CloudCompare (CloudCompare, 2014) que permite trabajar con todos los puntos de la nube de puntos de cada base de datos. La comparación realizada, en el CloudCompare, calcula la distancia entre cada vértice de un punto de la nube al triángulo vecino más cercano de otra superficie triangular. Esta metodología fue aplicada



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1: Curvas de nivel del Camino-PUCP (a) Curvas de nivel con 50,000 puntos, (b) Secciones transversales, (c) Curvas de nivel con todos los puntos.

en dos etapas. En la etapa 1, se hicieron comparaciones a todo lo largo del Camino-PUCP. En la etapa 2 se hicieron comparaciones en una sección de 35 m del Camino-PUCP las cuales están mostradas en la Figura 3.1.b. La primera etapa de comparaciones se centró en los modelos de ELT (Faro y Leica) generados del Camino-PUCP. El modelo de PG fue escalado en el programa Meshlab usando como referencia las mediciones manuales realizadas al principio. La Figura 4.2.a muestra la comparación del modelo de PG con el modelo de ELT Faro usando la metodología de desviación de superficie y su escala de desviaciones. La Figura 4.2.b muestra la comparación del modelo de PG y el ELT Leica y su escala de desviaciones. La Figura 4.2.c muestra la comparación del modelo de ELT Faro y ELT Leica, también se incluyen la escala de desviaciones para cada caso.

En la segunda etapa, se comparó modelos 3D de una sección de 35m del Camino-PUCP obtenidos de los levantamientos geométricos de ELT (Faro y Leica), PG y Kinect. La sección analizada está indicada en la Figura 4.3. En esta sección el modelo 3D basado en Kinect fue alineado en el programa Meshlab. Los modelos fueron comparados en el programa CloudCompare tomando como referencia el modelo 3D del ELT. La Figura 4.3.a muestra la comparación de los modelos de Kinect tomando como referencia los modelos 3D de PG y ELT (Faro y Leica) respectivamente. Estas figuras muestran la precisión en términos de desviación de superficies de una sección de 35 m del modelo 3D realizado con el Kinect.

4.2. Evaluación de la precisión en modelos 3D basado en imágenes

Se ha usado la base de datos del levantamiento geométrico con ELT (Faro y Leica) y PG. El procedimiento seguido es el mismo para ambos levantamientos geométricos. La base

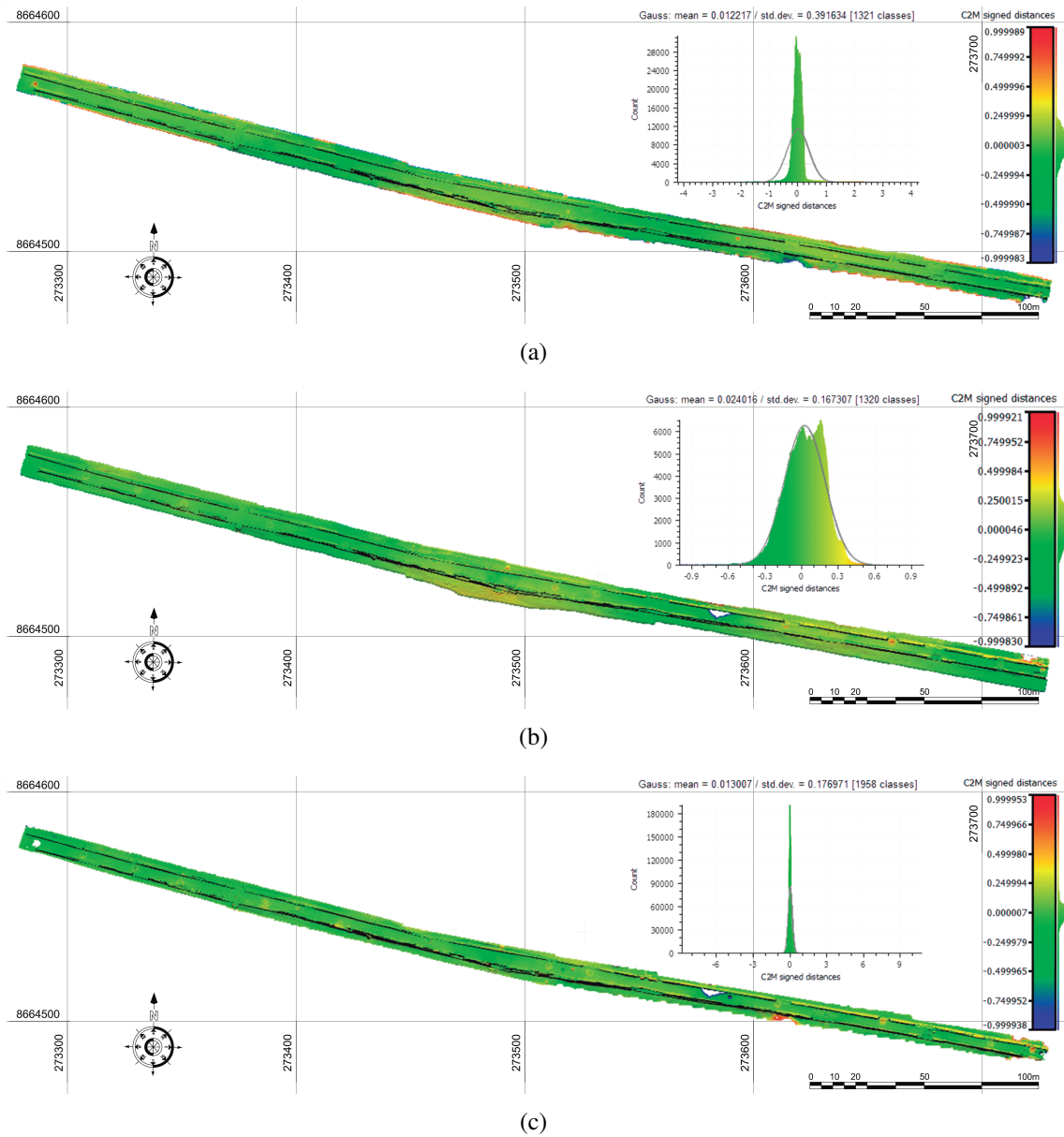


Figura 4.2: Desviación de superficies en modelos 3D del Camino-PUCP, (a) PG y ELT Faro (referencia), (b) PG y ELT Leica (referencia), (c) ELT Faro y ELT Leica (referencia).

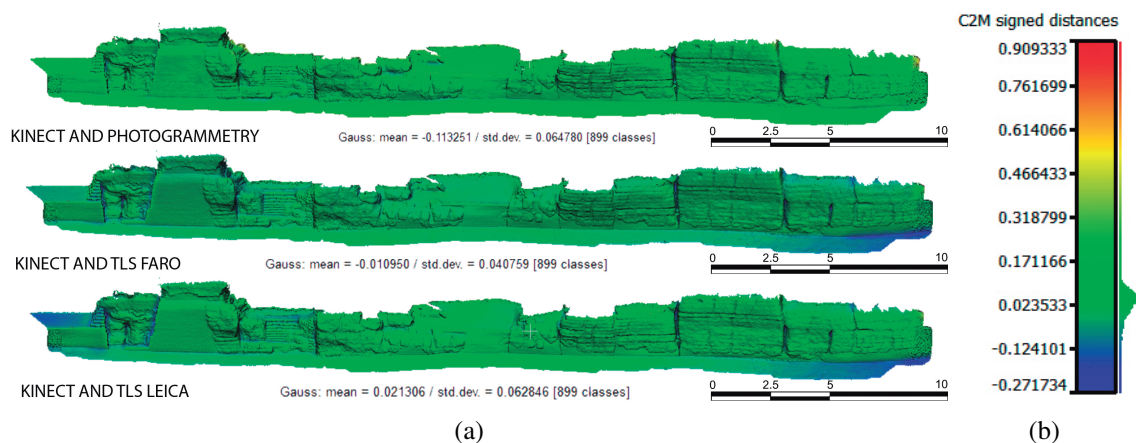


Figura 4.3: Desviación de superficies en modelos 3D de una sección de 35 m del Camino-PUCP, (a) Desviación de superficies entre modelos 3D, (b) Escala de errores de desviación.

de datos está compuesta por una nube de puntos que está representada por coordenadas X, Y y Z. Por lo tanto, se necesita reducir las coordenadas de tres dimensiones a imágenes que tendrán solo dos coordenadas. Para convertir la base de datos en imágenes, se necesita transformar el vector de coordenadas X, Y y Z en un arreglo matricial. Para este propósito, se ha usado una función interpolante dentro de las herramienta de Matlab como es la función Gridfit (DErrico, 2006) que produce una superficie la cual representa el comportamiento de los datos suministrados como una superficie cerrada (ver Fig. 4.4). Esta función opera bajo la ecuación (4.1) donde la función $Z(X,Y)$ es la función interpolante.

$$Z(X,Y) = a_0 + a_1X + a_2Y \quad (4.1)$$

Después de producir un arreglo matricial de la base de datos del levantamiento, se propone un algoritmo para transformar el arreglo matricial en imágenes. Este procedimiento esta compuesto por dos etapas. Primero, se carga la base de datos en el programa Matlab dividiendo el Camino-PUCP en dos partes como indica la Fig. 3.1.d. En las Figuras 3.1.a-3.1.f se muestran los levantamiento con PG y ELT (Faro y Leica) en el Matlab. Segundo, se evalúa cada arreglo matricial para encontrar las coordenadas máxima y mínima Z. Con ambos

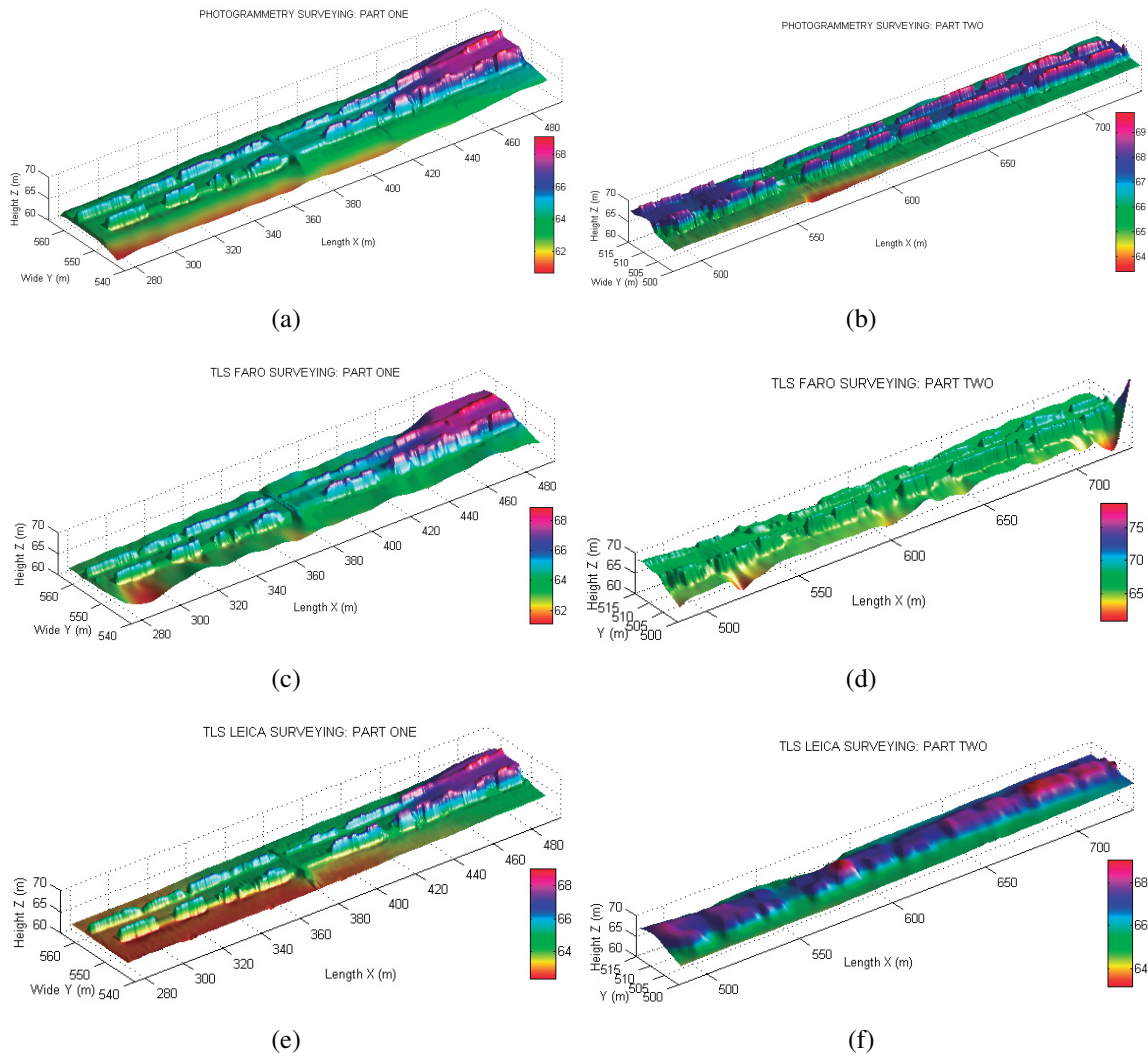


Figura 4.4: Modelos 3D en Matlab del Camino-PUCP, (a) Primer tramo de PG, (b) Segundo tramo de PG, (c) Primer tramo de ELT Faro, (d) Segundo tramo de ELT Faro, (e) Primer tramo de ELT Leica, (f) Segundo tramo de ELT Leica.

puntos límite, se usa la relación de la ecuación (4.2) considerando que se tiene 256 valores para la imagen en escala de grises considerando el color negro (valor 0) y el color blanco (valor 255).

$$Im(u, v) = \frac{255}{(\max(Z(X, Y)) - \min(Z(X, Y)))} * (Z(X, Y) - \min(Z(X, Y))) * ones(m, n) \quad (4.2)$$

Donde:

$Im(u, v)$ = Coordenadas de la imagen

$Z(X, Y)$ = Arreglo matricial de las coordenadas

$\min(Z(X, Y))$ = Mínima coordenada $Z(X, Y)$ del arreglo matricial

$\max(Z(X, Y))$ = Máxima coordenada $Z(X, Y)$ del arreglo matricial

Siguiendo el procedimiento propuesto, se han obtenido las imágenes del levantamiento con ELT (Faro y Leica) y PG. Las Figuras 4.5.a-4.5.c muestran las imágenes de la primera parte del levantamiento y tiene un tamaño de 191x2961 píxeles; la segunda parte tiene un tamaño de 151x2161 píxeles.

4.2.1. Transformada de Fourier 2D

La Transformada de Fourier 2D (2DFT) es una herramienta que permite trabajar en otro campo de frecuencias. Por lo tanto, permite transformar la imagen definida por una función en el dominio espacial del espectro de amplitudes al espectro de fases en el dominio de frecuencias definida por la ecuación (4.3).

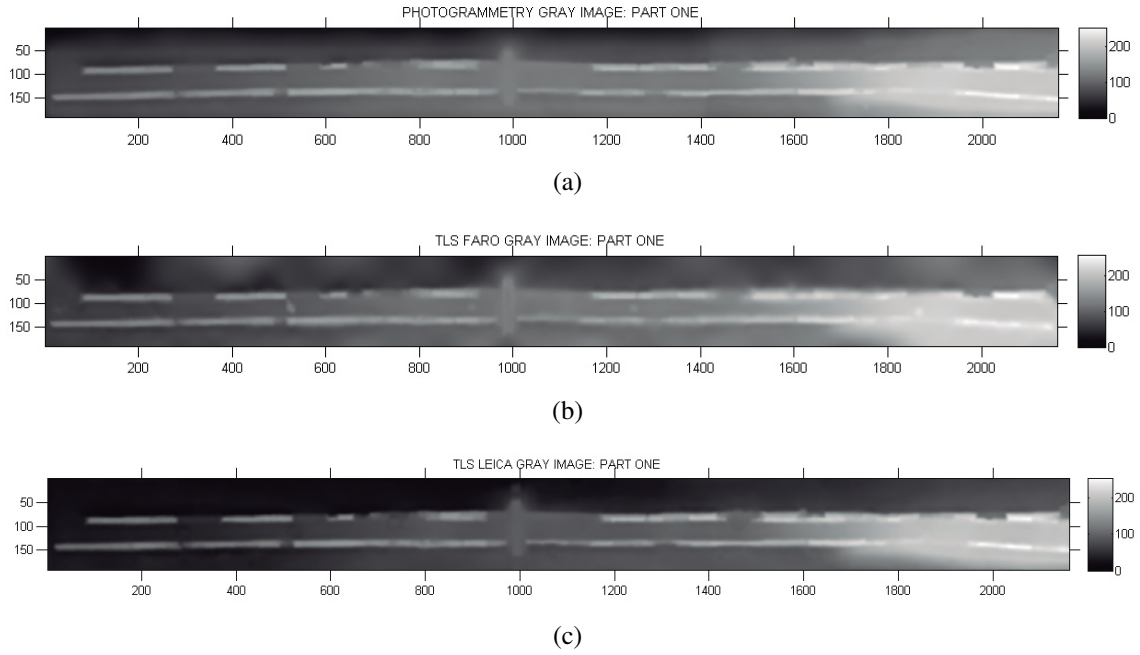


Figura 4.5: Imágenes en escala de grises del Camino-PUCP, (a) Primer tramo de PG, (b) Primer tramo de ELT Faro, (c) Primer tramo de ELT Leica.

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} * \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) * \exp[-j2\pi * (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})] \quad (4.3)$$

Donde:

$$u = 0, 1, 2, \dots, M - 1$$

$$v = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

Una vez que las imágenes del levantamiento fueron obtenidas, se procede a calcular la 2DFT usando las herramientas del programa Matlab. La Figura 1 del Anexo 10 muestra la 2DFT en un plano bidimensional. Además, la primera parte de todos los levantamientos tiene un tamaño de 191x2961 píxeles y la segunda parte tiene un tamaño de 151x2161 píxeles. La Figura 2 del Anexo 3 muestra la mitad de la 2DFT en un plano tridimensional.

Una vez las 2DFT fueron calculadas, se procede a realizar las comparaciones por partes. Primero, se cargan las 2DFT al programa Matlab. Segundo, se procede a comparar los modelos a través de diferencias de 2DFT. La Figura 3 del Anexo 10 muestra la comparación de las

2DFT en un espacio 2D. La 2DFT tiene un tamaño de 191x2961 píxeles en la primera parte y 151x2161 píxeles en la segunda parte. La Figura 4 del Anexo 3 muestra la comparación de una mitad de la 2DFT en un espacio 3D.

Para mostrar las diferencias en metros acerca de la comparación de modelos 3D, se procede a trabajar en la 2DFT para obtener la Transformada de Fourier 2D Inversa (2DIFT). En la 2DIFT, se transforma la escala de errores en píxeles a otra escala de errores en metros. Para este propósito se hace un proporción entre píxeles y metros. La Figura 4.6 muestra la 2DIFT en formato imagen de las tres comparaciones realizadas. Esta figura muestra las diferencias en píxeles de los modelos 3D. La Figura 7 del Anexo 3 muestra la mitad de la 2DIFT en 3D acerca de la comparación de modelos 3D. Esta figura muestra grandes diferencias en píxeles entre estos modelos.

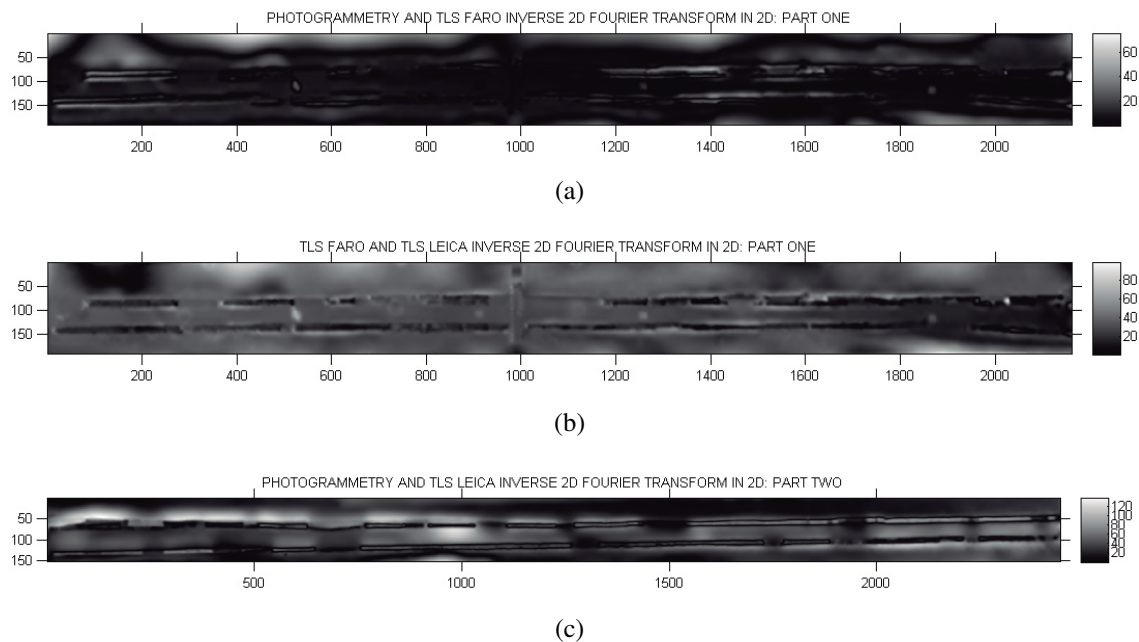


Figura 4.6: 2DIFT del Camino-PUCP. Primer tramo de comparaciones entre: (a) PG y ELT Faro (referencia), (b) PG y ELT Leica (referencia), (c) ELT Faro y ELT Leica (referencia).

4.2.2. Entropía de Shanon

La Entropía de Shanon, conocida como la Entropía de la Información, es interpretada como la información transmitida de una fuente. En imágenes se utiliza para medir la distribución de probabilidad de los valores de gris que se pueden estimar contando el número de veces que aparece cada valor de gris en la imagen y dividiendo cada conteo por la cantidad total de píxeles. La Figura 1 del Anexo 11 muestra un previo estudio de la variabilidad de la entropía al variar los niveles de gris de una cerámica moche. Además, se muestra cómo influye en el valor de entropía al aclarar u oscurecer la imagen la cual está reflejada en su histograma.

Con las consideraciones del experimento anterior y tomando como referencia la Fig. 4.5, se procede a calcular la Entropía de Shanon usando las herramientas de Matlab. Para cumplir este propósito se usa la división planteada en la Fig. 3.1.d y se calcula la Entropía de Shanon para cada región tal como muestran las Tablas del Anexo 4.

4.3. Modelos sólidos a partir de los estudios de digitalización

En esta sección se muestran el algoritmo desarrollado para la construcción de modelos sólidos.

4.3.1. Algoritmo para construir modelos sólidos

Para generar modelos sólidos a partir del modelo de mallas se debe tener en cuenta los siguientes requisitos:

1. No deben existir caras triangulares duplicadas, solapadas o en intersección con otras caras

triangulares dentro del modelo de mallas.

2. No deben existir vértices sin referencia.
3. El modelo de mallas debe ser cerrada, es decir que cada lado de la cara triangular debe ser compartida únicamente con un lado de otra cara triangular.

El algoritmo desarrollado para la construcción de modelos sólidos consta de ocho etapas tal como muestra la Fig. 4.8.

1. Se inicia realizando uno de los siguientes estudios: el estudio de PG, el estudio de ELT o el estudio de complementación de los estudios de PG y ELT.
2. Se carga el modelo al programa Meshlab.
3. Se aplican filtros al modelo de mallas que permiten cumplir los requisitos para generar modelos sólidos.
4. Se exporta el modelo 3D al Agisoft PhotoScan.
5. Se aplican filtros para generar un modelo de superficies cerrado.
6. Se exporta el modelo al programa Matlab en el cual se realiza la transformación del modelo de mallas a modelo sólido.
7. Se carga el modelo en el programa AutoCAD.
8. Se construye sólidos de lados y base plana por medio de operaciones booleanas.

Se tomo como caso de prueba una nube de puntos de una iglesia para poder desarrollar su modelo sólido con el algoritmo propuesto tal como muestra la figura ??.

Finalmente, se desarrolló el modelo sólido de un tramo del Qhapaq Ñan tal como muestra el Anexo 1.

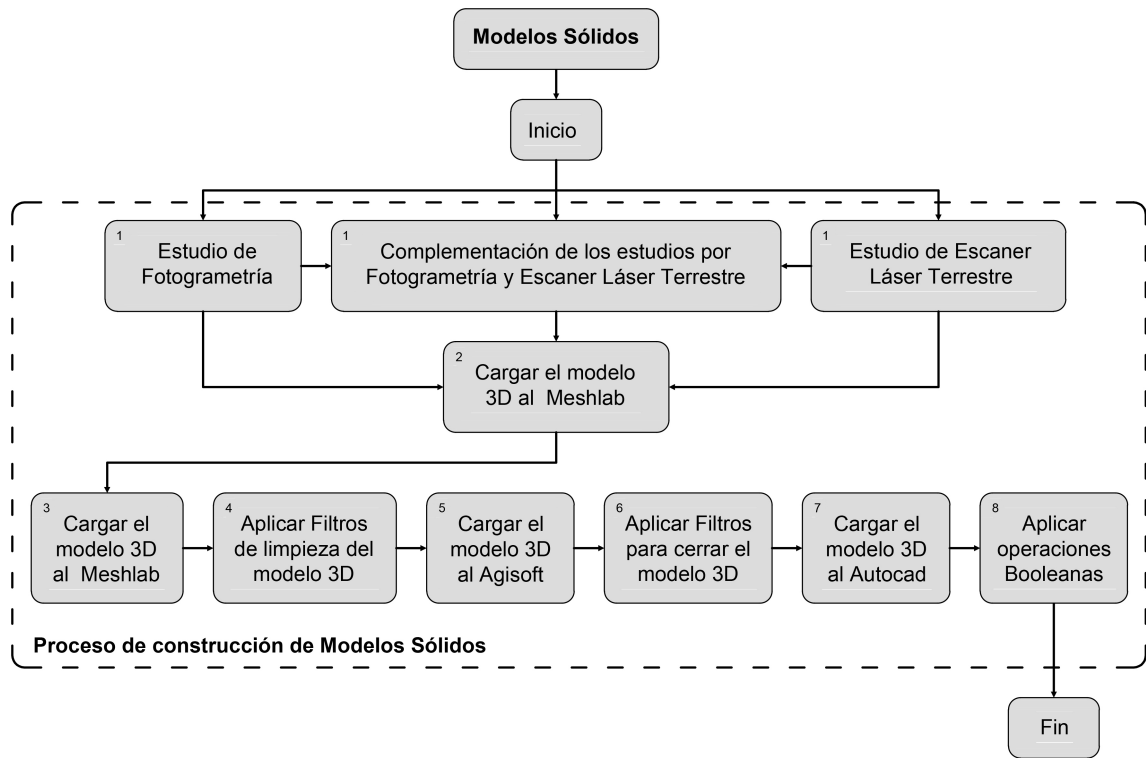


Figura 4.7: Diagrama de flujo para la construcción de modelos sólidos.

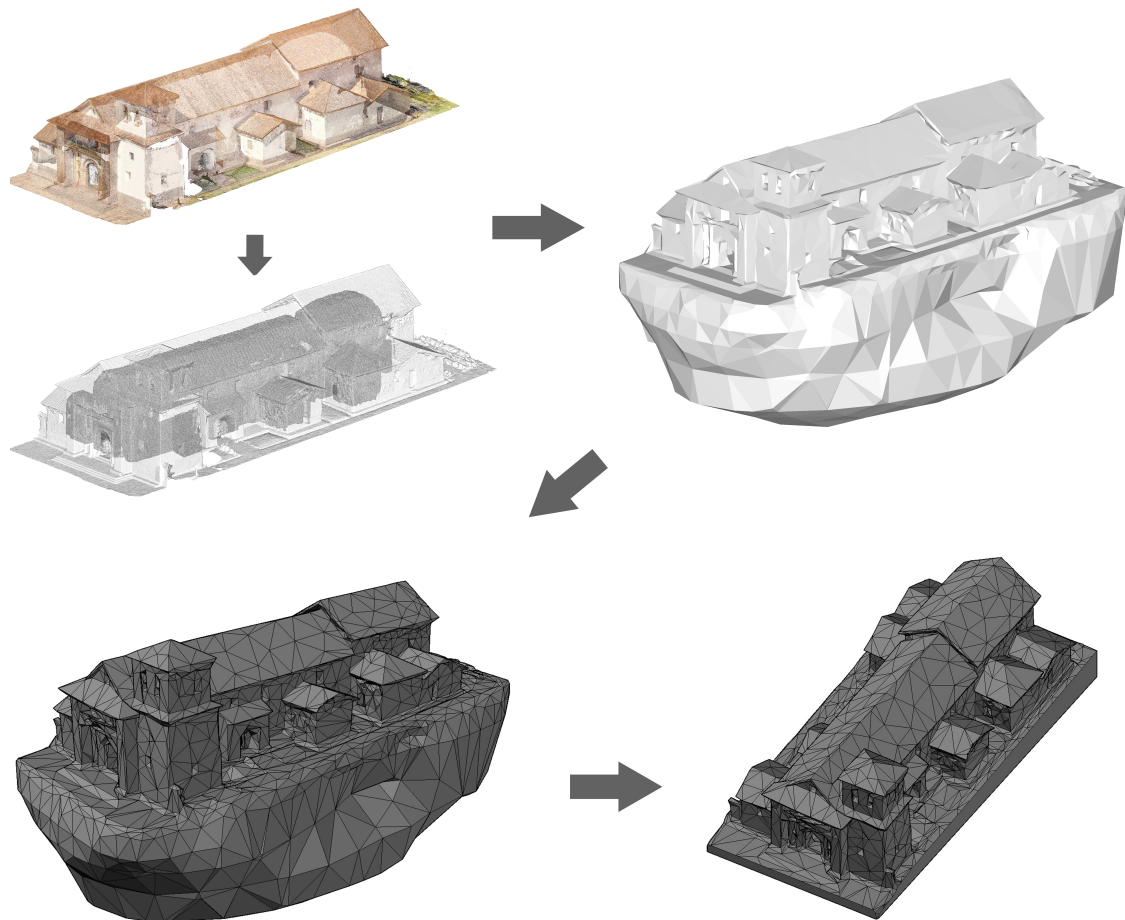


Figura 4.8: Algoritmo para realizar modelos sólidos aplicados a un caso de prueba de una iglesia.

4.4. Planos de arquitectura a partir de los estudios de digitalización

Una de las aplicaciones directas de la construcción de modelos sólidos es la creación de planos de arquitectura que describen con precisión el monumento. Estos planos son creados en el programa Autocad (AUTODESK, 2015). A continuación se detalla el flujo de trabajo seguido para obtener los planos de Arquitectura tal como se muestra en la Fig. 4.9.

1. Se inicia realizando uno de los siguientes estudios: el estudio de PG, el estudio de ELT o el estudio de complementación de los estudios de PG y ELT.
2. Se realiza el modelo sólido de una estructura patrimonial.
3. Se carga el modelo sólido al programa AutoCAD.
4. Se generan los planos de Arquitectura.

Finalmente, se desarrolló el plano de arquitectura en un tramo del Qhapaq Ñan tal como muestra el Anexo 2

4.5. Recorridos virtuales a partir de los estudios de digitalización

Existen herramientas educativas que permiten combinar la educación con ciertos aspectos de entretenimiento con la finalidad de enseñar la arquitectura de monumentos históricos. Una de estas herramientas vienen a ser los entornos de realidad virtual (Song *et al.*, 2004). Otra herramienta son los recorridos virtuales sobre monumentos arqueológicos que pueden

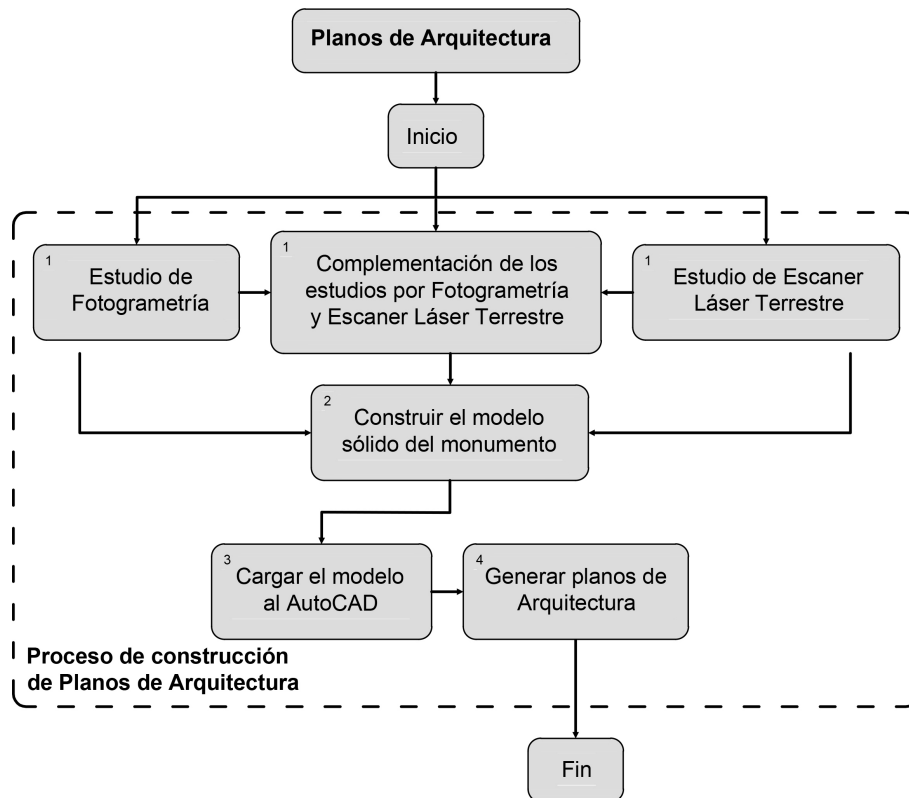


Figura 4.9: Diagrama de flujo para realizar planos de arquitectura.

ser utilizados para construir Cyber museos 3D (Kwon *et al.*, 2001), que permitirán valorar la geodiversidad empleando herramientas adicionales como Google Earth y códigos QR (Martínez-Graña *et al.*, 2013).

El algoritmo desarrollado para realizar recorridos virtuales consta de seis etapas tal como muestra la Fig. 4.10.

1. Se inicia realizando uno de los siguientes estudios: el estudio de PG, el estudio de ELT o el estudio de complementación de los estudios de PG y ELT.
2. Se carga el modelo al programa 3ds Max Studio.
3. Se traza el recorrido de la cámara.
4. Se renderiza el proyecto para generar imágenes de alta calidad.
5. Se cargan las imágenes al programa Adobe Premiere.

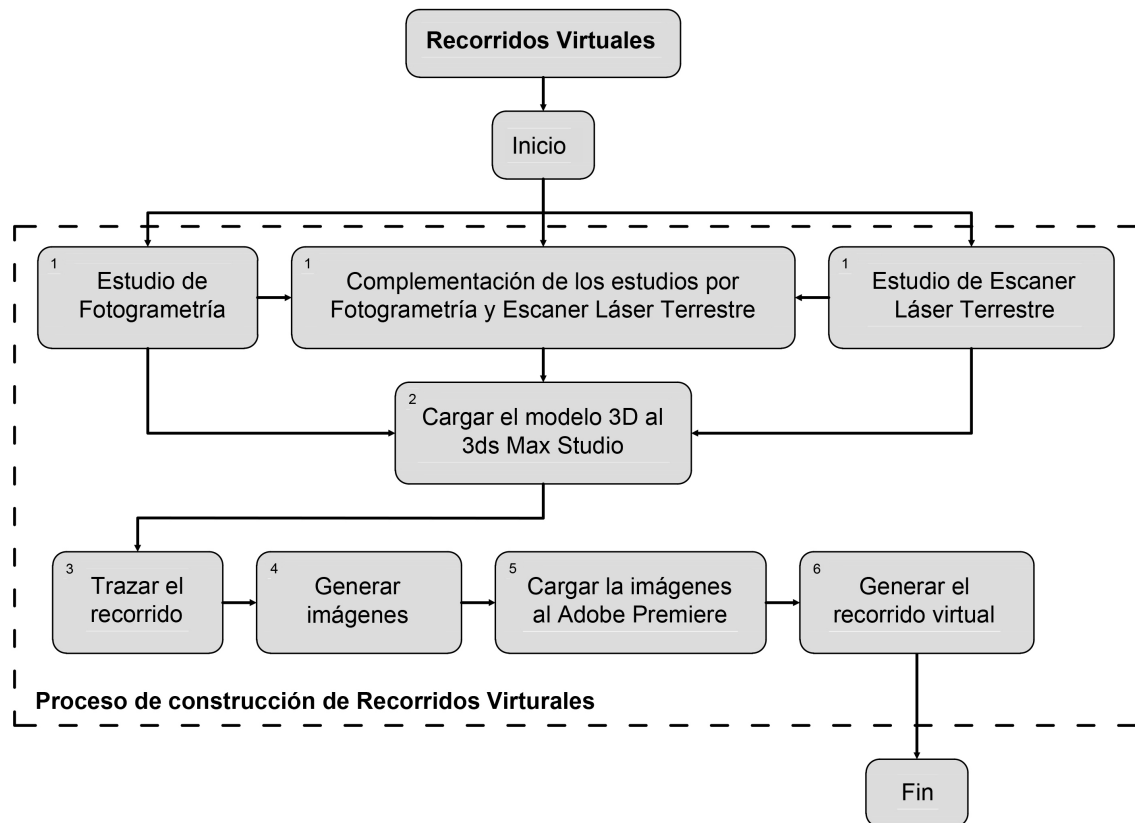


Figura 4.10: Diagrama de flujo para realizar recorridos virtuales.

6. Se renderiza el proyecto para obtener vídeos de alta calidad.

Finalmente, se desarrolló el recorrido virtual en un tramo del Qhapaq Ñan tal como muestra la Fig. 4.11. La resolución del vídeo fue de 1920X1080 píxeles.

4.6. Análisis de ingeniería del modelo sólido

Las construcciones históricas representan parte de la identidad de los pueblos y son fuente importante de ingresos por el turismo, por lo que son de gran relevancia para el desarrollo de un país (Melendez, 2015). En el Perú, existe un gran número de construcciones patrimoniales de las cuales forma parte el Qhapaq Ñan.



(a)



(b)

Figura 4.11: Recorrido virtual en un tramo del Qhapaq Ñan: a) A nivel de nube de puntos y b) A nivel de malla.

4.6.1. Análisis modal de un tramo del Qhapaq Ñan

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras. Tiene como objetivo la estimación de propiedades dinámicas como las frecuencias y los modos naturales al igual que el amortiguamiento. El análisis modal puede ser teórico o experimental. El teórico se basa en técnicas analíticas o simulaciones. El experimental se basa en ensayos y tiene 4 pasos fundamentales: excitación de la estructura, medición mediante acelerómetros, tratamiento digital y análisis de las señales, y aplicación de modelos (CATEC, 2015).

Para realizar el modelamiento de la estructura patrimonial se emplearon elementos paralelepípedos en tres dimensiones tomando como referencia el modelo sólido desarrollado tal como muestra la Fig. 4.12. Además, se muestra la relación entre los lados de los elementos que indican cuán óptimo es la representación de la estructura patrimonial por dichos elementos. Se realizó un análisis modal elástico empleando el programa Diana (TNO Diana, 2015). En el modelo se asumió un modelo de Elasticidad de $350N/mm^2$ y una densidad de adobe de $1,5N/mm^3$.

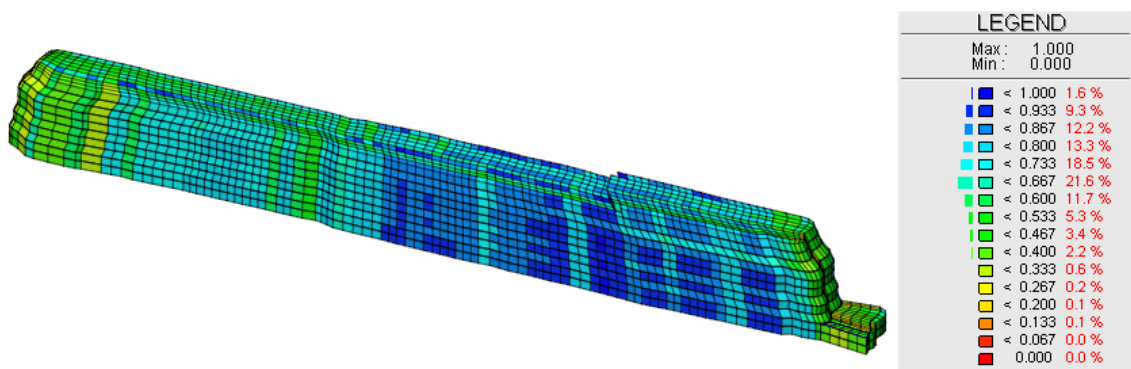


Figura 4.12: Evaluación de los elementos tridimensionales para el modelo de elementos finitos.

La Fig. 4.13-4.16 muestra los principales formas modales tridimensionales con sus respectivas frecuencias.

La tabla 4.3 muestra las frecuencias y periodos de los cuatro primeros modos. En el modelo se llegó a una participación de masa del 87

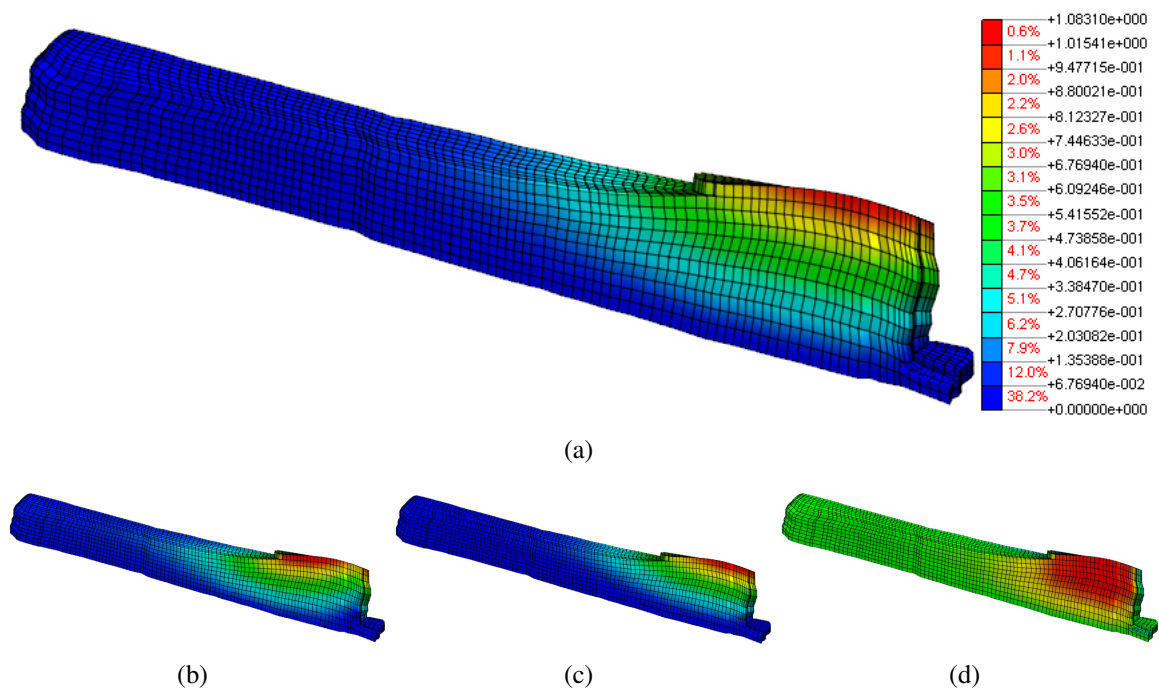


Figura 4.13: Primera forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.

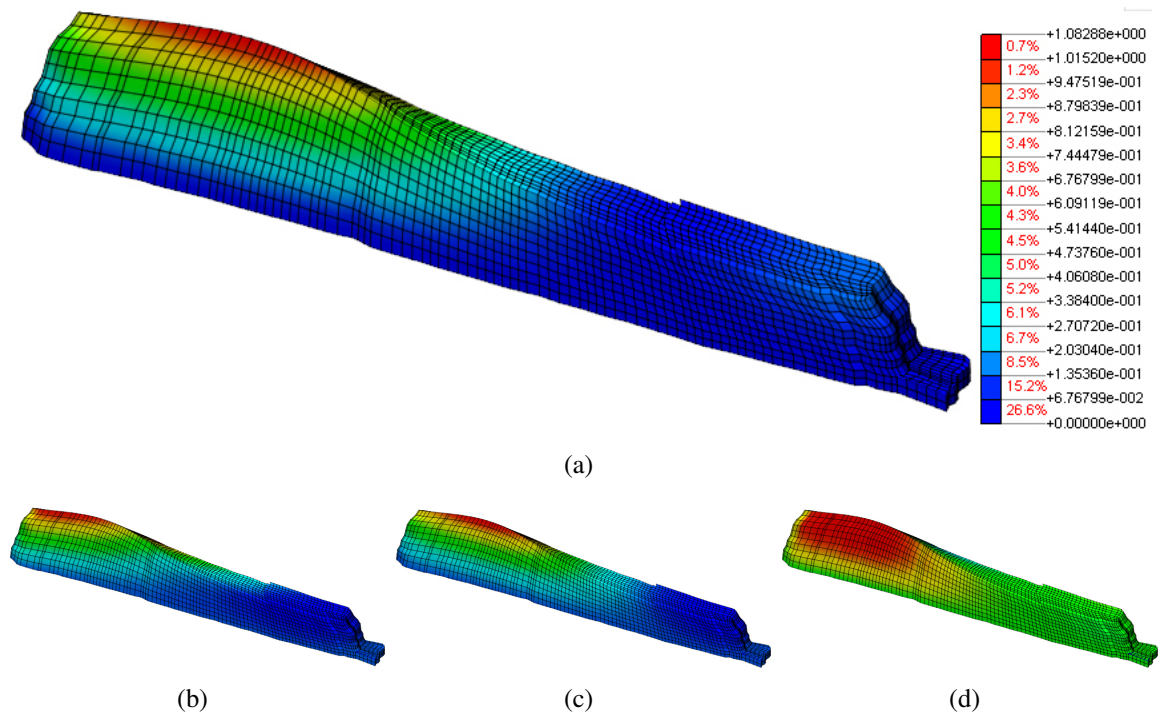


Figura 4.14: Segunda forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.

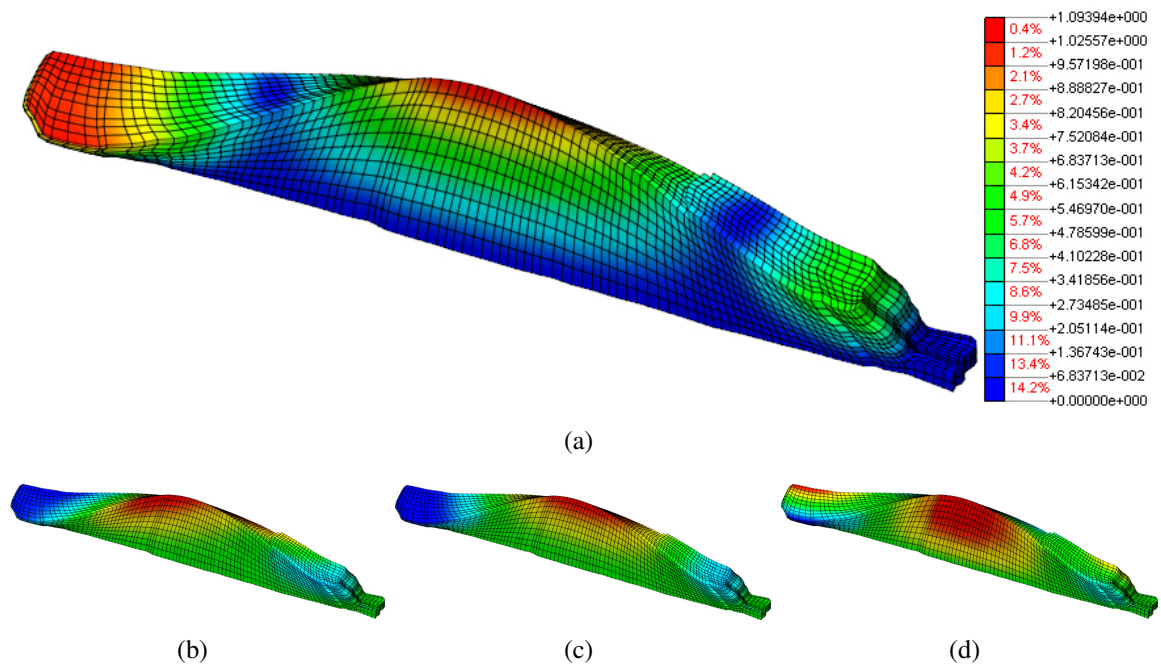


Figura 4.15: Tercera forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.

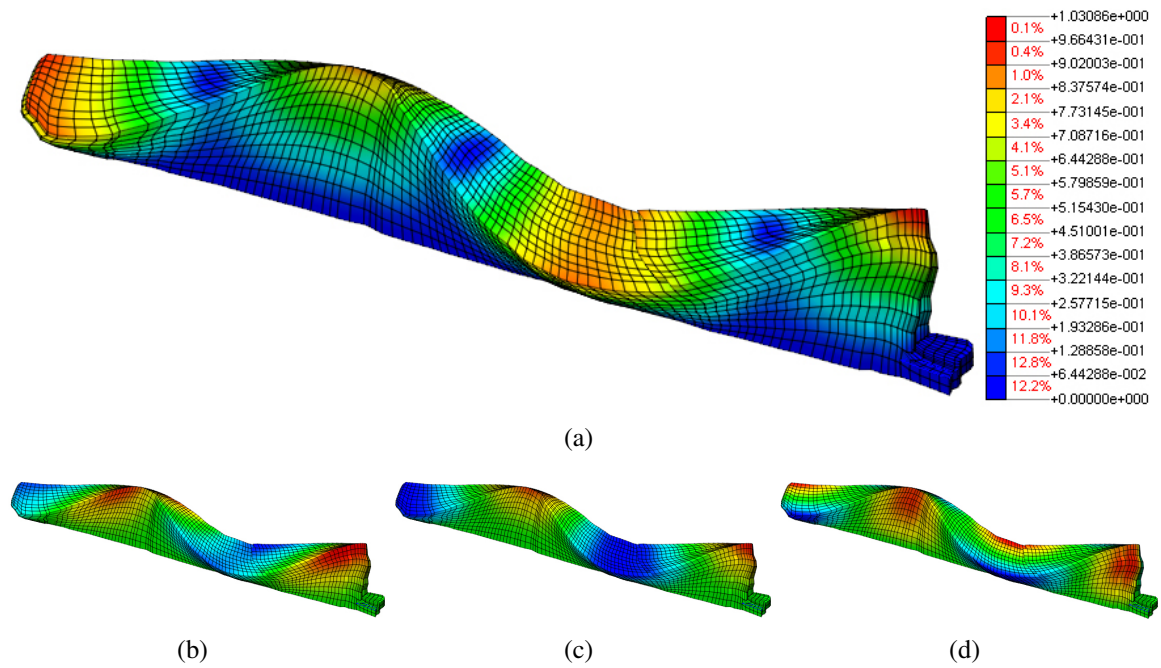


Figura 4.16: Cuarta forma modal: a) Combinación modal en las tres direcciones, b) Forma modal en X, c) Forma modal en Y y d) Forma modal en Z.

Tabla 4.3: Frecuencias y periodos de los primeros cuatro modos.

Nro. Modo	Frecuencia (Hertz)	Periodo (Seg.)
1	27.51	0.036
2	28.98	0.035
3	32.14	0.031
4	35.35	0.028

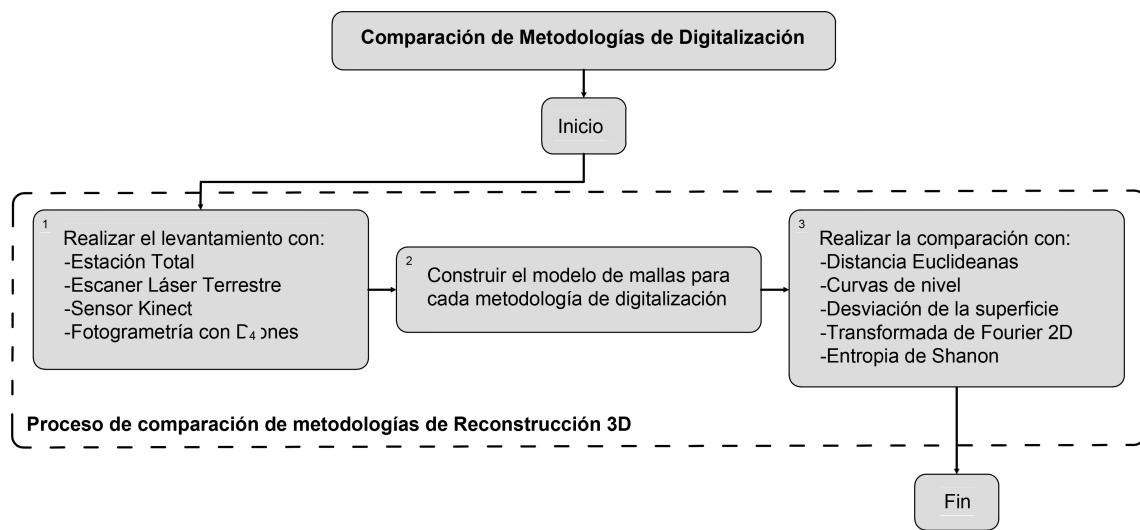


Figura 4.17: Diagrama de flujo para la comparación de metodologías de digitalización en el Camino Inca.

4.7. Interpretación de resultados y/o discusiones

Este estudio muestra dos importantes aspectos: las tecnologías de digitalización 3D y las metodologías de comparación para evaluar la precisión en modelos de Reconstrucción 3D. Se puede apreciar que existen diversas formas de realizar modelos 3D usando: ELT (Faro y Leica), PG con Drones, ET y Kinect. Una vez que los modelos son creados, se procede a evaluar la precisión de estos modelos. Para la evaluación de la precisión existen metodologías como son: medición de distancia Euclidianas, curvas de nivel, desviación de superficie, 2DFT y la Entropía de Shanon. El flujo de trabajo seguido se muestra en la Figura 4.17.

Para cada modelo de Reconstrucción 3D se necesita un presupuesto para reconstruir una

estructura empleando cualquier tecnologías de digitalización. En la Tabla 4.4 se describe en detalle los dispositivos y programas que se utilizan en cada tecnología de digitalización.

Tabla 4.4: Comparación de precios para realizar los modelos con ET, PG con Drones, ELT (Faro y Leica) y el sensor Kinect. Precios de compra de equipos, dispositivos y software al año 2015.

Dispositivo y/o Software	Estación Total	PG	Escaner Faro	Escaner Leica	Sensor Kinect
TS Leica	\$7,000				
AutoCAD Civil 3D	\$1,500				
UAV (Phanton y S800)		\$1,000 - \$8,000			
Camara (Canon S110 y Sony 7)		\$300 - \$700			
Agisoft (Standard and Profesional)		\$200 - \$3,500			\$200 - \$3,500
Kinect XBOX-360					\$120
Escaner Faro 3D			\$50,000		
Software Faro Scene			Incluido en Escaner		
Escaner Leica ScanStation				\$120,000	
Software Cyclone				Incluido en Escaner	
Software Meshlab	Gratuito	Gratuito	Gratuito	Gratuito	Gratuito
Total (\$)	\$8,500	\$1,500 - \$12,000	\$50,000	\$120,000	\$320 - \$3,620

Las mediciones de distancias Euclidianas fueron realizadas a lo largo del Camino-PUCP. Se utilizaron tres técnicas para construir los modelos 3D, estas técnicas fueron: PG con Drones, ELT Faro y ELT Leica. Tomando como referencia la evaluación de las distancias Euclidianas y la Tabla 4.4, se concluye que el ELT Leica muestra un error de desviación mas exacto (7 mm) y es una herramienta cara en comparación con el ELT Faro (12 mm) y PG (17 mm). Por lo tanto, la PG es la herramienta más accesible para la construcción de modelos de Reconstrucción 3D considerando su precision y precio. Por otra parte, la metodología de medición de distancias Euclidianas permite comparar modelos de reconstrucción

3D empleando pocos puntos. Las curvas de nivel fueron realizados también a lo largo del Camino-PUCP usando los estudios de PG con Drones, ELT Faro y ELT Leica. Esta metodología permite apreciar diferencias en una gran cantidad de puntos en comparación de la medición de distancias Euclidianas pero siempre existen algunas regiones donde no se pueden apreciar las diferencias. Esto es debido a que las curvas de nivel ofrece información en determinadas alturas. Además, se puede trabajar con todo o parte de la nube de puntos como muestran las Figuras 3.2 - 4.1. La metodología de comparación de desviación de superficies es una herramienta mas completa porque permite realizar la comparación punto por punto en toda la superficie. La única desventaja es que necesita una alta capacidad de cómputo y poder de procesamiento para generar superficies. La metodología de comparación empleando la Transformada de Fourier 2D es una herramienta propuesta para realizar la evaluación de la precisión de modelos de Reconstrucción 3D. Esta herramienta permite trabajar en el campo de las frecuencias para observar las características de cada píxel en la imagen. Una vez conocida las características de cada píxel, se puede comparar las dos 2DFT. La única desventaja en esta metodología es que se pierde información en el proceso de transformar una base de datos 3D en una base de datos 2D para construir las imágenes. La Entropía de Shanon es una herramienta de medición propuesta para realizar la evaluación de la precisión en modelos de Reconstrucción 3D. Esta herramienta permite evaluar una región a un rango de píxel por pixel. Se puede comparar cada región de píxeles en diferentes modelos. La única desventaja en esta metodología es que se pierde información de los modelos 3D en el proceso de transformar una base de datos 3D en una base de datos 2D para construir imágenes. Los modelos sólidos se desarrollaron de manera automática lo que significo una gran ventaja frente a utilizar ingeniería inversa o una biblioteca de sólidos compuesto por paralelepípedos. Además, se construyeron directamente de la nube de puntos.

Capítulo 5

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

- a) Los algoritmos SFM y DMVR implementados en el programa Agisoft PhotoScan permiten construir modelos 3D a partir de un conjunto de imágenes. El Agisoft es el programa más efectivo, comercial y de bajo presupuesto para realizar reconstrucciones 3D basado en imágenes. Los algoritmos usados proporciona un error máximo de 7.6 mm en precisión que es adecuado en función a los estudios presentados hoy en día. Estos resultados sirven de base para afirmar que el PG es un herramienta de bajo costo y aceptable para realizar digitalización de monumentos.
- b) Los modelos 3D generados por ET muestran una resolución diez veces menor que los modelos 3D del estudio por PG debido a la cantidad de puntos en la base de datos. Para realizar el proceso de georreferenciación de modelos 3D se necesitan coordenadas de por lo menos cuatro puntos de control. Un modelo 3D georreferenciado permite obtener representaciones geométricas sobre la topografía del lugar.
- c) El ELT esta actualmente considerado como una gran herramienta para la digitalización de monumentos Arqueológicos y Arquitectónicos debido a su rapidez y precisión; sin

embargo, el precio para realizar el estudio es una limitación para proyectos de bajo presupuesto. La comparación realizada servirá para elegir la mejor técnica de digitalización para realizar la reconstrucción 3D, conservación y preservación de monumentos..

- d) Las curvas de nivel permite apreciar diferencias en una gran cantidad de puntos en comparación de la medición de distancias Euclidianas. Esto es debido a que las curvas de nivel ofrece información en determinadas alturas. Además, se puede trabajar con todo o parte de la nube de puntos.
- e) La desviación de superficies es una herramienta mas completa porque permite realizar la comparación punto por punto en toda la superficie. La única desventaja es que necesita una alta capacidad de cómputo y poder de procesamiento para generar superficies.
- f) La Transformada de Fourier 2D es una herramienta propuesta para la evaluación de la precisión de modelos de Reconstrucción 3D. Esta herramienta permite trabajar en el campo de las frecuencias para observar las características de cada píxel en la imagen. Una vez conocida las características de cada píxel, se puede comparar las dos 2DFT.
- g) La Entropía de Shanon es una herramienta de medición propuesta para realizar la evaluación de la precisión en modelos de Reconstrucción 3D. Esta herramienta permite evaluar una región a un rango de píxel por pixel. Se puede comparar cada región de píxeles en diferentes modelos. La desventaja de las últimas dos metodologías es que se pierde información de los modelos 3D en el proceso de transformación de la base de datos 3D - 2D para construir imágenes.
- h) Se puede generar modelos de mallas a partir del PG, ELT y una combinación de ambos estudios. La combinación de estas metodologías permite representar toda la estructura (interior y exterior) de monumentos arqueológicos.

- i) Los recorridos virtuales obtenidos con el algoritmo propuesto permiten explorar de manera amena e iterativa el monumento arqueológico.
- j) Los modelos sólidos generados a partir del modelo de mallas siguiendo el algoritmo desarrollado permite una adecuada representación de la estructura para realizar análisis de ingeniería. Además, los modelos sólidos desarrollados pueden ser manipulados en cualquier programa CAD.
- k) Es posible generar planos de arquitectura de gran detalle que permiten mostrar el estado actual del monumento a partir de los modelos sólidos de estructural monumentales.
- l) Finalmente, se puede hacer una evaluación estructural de monumentos arqueológicos y arquitectónicos como el análisis modal realizado en el capítulo 4, el cual permite evaluar las formas modales de la estructura.

5.2. Recomendaciones

- a) Los equipos de cómputo para realizar modelos 3D deben tener una gran capacidad de procesamiento, principalmente para procesar la base de datos de los estudios de PG y ELT.
- b) Al tomar fotografías para el estudio de PG debe haber solapamiento entre dos fotos seguidas de al menos un 40%.
- c) Al tomar datos con el escáner láser terrestre, los datos deben ser tomados con una precisión intermedia.
- d) Las aplicaciones de los modelos 3D deben ser procesadas en computadoras de última generación, estaciones de trabajo, servidores.

5.3. Trabajos Futuros

El proyecto de investigación muestra un amplio panorama en la digitalización 3D de monumentos arqueológicos y arquitectónicos, así como las aplicaciones que pueden desarrollarse. Sin embargo, como en todo proyecto de investigación existen objetivos y metas que podrían desarrollarse tomando como base este estudio. Los trabajos futuros que pueden desarrollarse son los siguientes:

- a) Se pueden evaluar las otras metodologías de digitalización mostradas en el capítulo 3.
- b) Se pueden buscar más metodologías para evaluar la precisión de modelos 3D en el capítulo 4.
- c) Se pueden desarrollar más aplicaciones como entornos de realidad aumentada y hologramas que permitan mostrar el monumento de forma amena y divertida.
- d) Se podría realizar un análisis de elementos finitos más elaborado empleando sensores tipo acelerómetros para realizar un Análisis Modal Operacional.

Bibliografía

- AGISOFT, P. (2015). *Agisoft PhotoScan User manual*. <http://www.agisoft.com/>.
- AHMADABADIAN, A. H., ROBSON, S., BOEHM, J., SHORTIS, M., WENZEL, K. Y FRITSCH, D. (2013). A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **78**, 157–167.
- ALMHDIE, A., LÉGER, C., DERICHE, M. Y LÉDÉE, R. (2007). 3d registration using a new implementation of the icp algorithm based on a comprehensive lookup matrix: Application to medical imaging. *Pattern Recognition Letters* **28**(12), 1523–1533.
- ARBACE, L., SONNINO, E., CALLIERI, M., DELLEPIANE, M., FABBRI, M., IDELSON, A. I. Y SCOPIGNO, R. (2013). Innovative uses of 3d digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage* **14**(4), 332–345.
- AUTODESK (2015). *AUTOCAD*. <http://www.autodesk.es/products/autocad/free-trial>.
- BAY, H., ESS, A., TUYTELAARS, T. Y VAN GOOL, L. (2008). Speeded-up robust features (surf). *Computer vision and image understanding* **110**(3), 346–359.
- BROWN, D. C. (1976). The bundle adjustment?progress and prospects. *Int. Archives Photogrammetry* **21**(3), 1–1.
- BRUNE, P. Y PERUCCHIO, R. (2012). Roman concrete vaulting in the great hall of trajans markets: Structural evaluation. *Journal of Architectural Engineering ASCE* .
- CARROZZINO, M. Y BERGAMASCO, M. (2010). Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums. *Journal of Cultural Heritage* **11**(4), 452–458.
- CASCIATI, S. Y BORJA, R. I. (2004). Dynamic fe analysis of south memnon colossus including 3d soil–foundation–structure interaction. *Computers & structures* **82**(20), 1719–1736.
- CATEC (2015). Centro avanzado de tecnologías aeroespaciales. URL <http://www.catec.aero/>.
- CHÁCARA, C., ZVIETCOVICH, F., BRICEÑO, C., MARQUES, R., PERUCCHIO, R., CASTAÑEDA, B., UCEDA, S., MORALES, R. Y AGUILAR, R. (2014). On-site investigation and numerical analysis for structural assessment of the archaeological complex

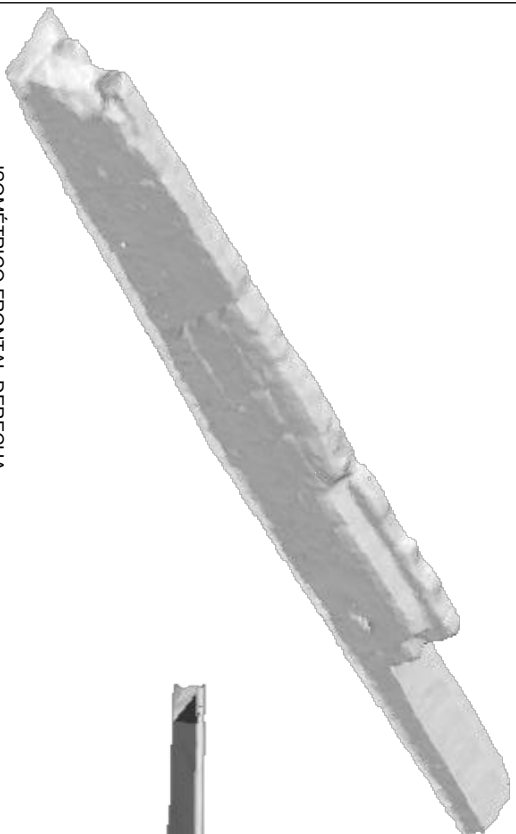
- of huaca de la luna. In: *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico City, Mexico.*(Submitted on June, 2014).
- CHENG, H. M. (2012). *The Workflows of 3D Digitizing Heritage Monuments*. Laser Scanner Technology.
- CLOUDCOMPARE (2014). *3D point cloud and mesh processing software*. <http://www.danielgm.net/cc/>.
- CUBES, M. (1995). Construction of topologically correct isosurfaces .
- CURLESS, B. Y LEVOY, M. (1996). A volumetric method for building complex models from range images. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.
- DE REU, J., DE SMEDT, P., HERREMANS, D., VAN MEIRVENNE, M., LALOO, P. Y DE CLERCQ, W. (2014). On introducing an image-based 3d reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science* **41**, 251–262.
- DE REU, J., PLETS, G., VERHOEVEN, G., DE SMEDT, P., BATS, M., CHERRETTÉ, B., DE MAEYER, W., DECONYNCK, J., HERREMANS, D., LALOO, P. *et al.* (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* **40**(2), 1108–1121.
- DELLEPIANE, M., DELLUNTO, N., CALLIERI, M., LINDGREN, S. Y SCOPIGNO, R. (2013). Archeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques. *Journal of Cultural Heritage* **14**(3), 201–210.
- DERRICO, J. R. (2006). *Understanding gridfit*. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998-surface-fitting-using-gridfit>.
- ECK, M., DEROSE, T., DUCHAMP, T., HOPPE, H., LOUNSBERRY, M. Y STUETZLE, W. (1995). Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In: *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.
- EDELSBRUNNER, H. (1998). Shape reconstruction with delaunay complex. In: *LATIN'98: Theoretical Informatics*. Springer, pp. 119–132.
- EELLS, J. Y LEMAIRE, L. (1988). Another report on harmonic maps. *Bulletin of the London Mathematical Society* **20**(5), 385–524.
- FARIN, G. E., HOSCHEK, J. Y KIM, M.-S. (2002). *Handbook of computer aided geometric design*. Elsevier.
- FARO (2015). *Especificaciones Tcnicas del Faro Focus 3D*. <http://www.faro.com/>.
- GEOSYSTEMS, L. (2015a). *Leica ScanStation C10*. http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-ScanStation-C10_79411.htm.
- GEOSYSTEMS, L. (2015b). *LeicaCyclone*. http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-Cyclone_6515.htm.

- GRUBERA, M., PERKOB, R. Y PONTICELLIA, M. (2004). The all digital photogrammetric workflow: redundancy and robustness. *ISPRS Commission I: Sensors, Platforms and Imagery*, 232–234.
- GUSKOV, I., VIDIMČE, K., SWELDENS, W. Y SCHRÖDER, P. (2000). Normal meshes. In: *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- HADDAD, N. A. (2011). From ground surveying to 3d laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* **23**(2), 109–118.
- HARTLEY, R. I. Y STURM, P. (1997). Triangulation. *Computer vision and image understanding* **68**(2), 146–157.
- HIRSCHMULLER, H. (2005). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, vol. 2. IEEE.
- KAZHDAN, M., BOLITHO, M. Y HOPPE, H. (2006). Poisson surface reconstruction. In: *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*.
- KHOSHELHAM, K. Y ALTUNDAG, D. (2010). Wavelet de-noising of terrestrial laser scanner data for the characterization of rock surface roughness. In: *Proceedings ISPRS Commission II Mid-Term Symposium Theory, Data Handling and Modelling in Geo-Spatial Information Science*, Hong Kong, 26-28 May 2010; *IAPRS, XXXVIII (2)*, 2010. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- KOUTSOUDIS, A., VIDMAR, B., IOANNAKIS, G., ARNAOUTOGLOU, F., PAVLIDIS, G. Y CHAMZAS, C. (2014). Multi-image 3d reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage* **15**(1), 73–79.
- KRAUS, K. (2007). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter.
- KRISHNAMURTHY, V. Y LEVOY, M. (1996). Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.
- KUTULAKOS, K. N. Y VALLINO, J. R. (1998). Calibration-free augmented reality. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on* **4**(1), 1–20.
- KWON, Y.-M., KIM, I.-J., AHN, S. C., KO, H. Y KIM, H.-G. (2001). Virtual heritage system: Modeling, database & presentation. In: *Virtual Systems and Multimedia, 2001. Proceedings. Seventh International Conference on*. IEEE.
- LAGUE, D., BRODU, N. Y LEROUX, J. (2013). Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: applications to the rangitikei canyon(n-z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **82**(1), 10–26.
- LEE, A. W., SWELDENS, W., SCHRÖDER, P., COWSAR, L. Y DOBKIN, D. (1998). Maps: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces. In: *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.

- LÉVY, B., PETITJEAN, S., RAY, N. Y MAILLOT, J. (2002). Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 21. ACM.
- LORENSEN, W. E. Y CLINE, H. E. (1987). Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. In: *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol. 21. ACM.
- MAILLOT, J., YAHIA, H. Y VERROUST, A. (1993). Interactive texture mapping. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.
- MARTÍNEZ-GRAÑA, A., GOY, J. Y CIMARRA, C. (2013). A virtual tour of geological heritage: Valourising geodiversity using google earth and qr code. *Computers & Geosciences* **61**, 83–93.
- MATLAB (2015). *High-level language and interactive environment for numerical computation*. <http://www.mathworks.com/products/matlab>.
- MELLENDEZ, C. P. B. (2015). *Diagnóstico Estructural y Análisis Sísmico de la Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas*. Ph.D. thesis.
- MORALES, R. (2010). Moche: pasado y presente .
- NYANDER, A., ADDISON, P. S., MCEWAN, I. Y PENDER, G. (2003). Analysis of river bed surface roughnesses using 2d wavelet transform-based methods. *Arabian Journal for Science and Engineering* **28**(1; PART C), 107–122.
- OLAGUE, G. Y DUNN, E. (2007). Development of a practical photogrammetric network design using evolutionary computing. *The Photogrammetric Record* **22**(117), 22–38.
- PALAZOGLU, A., STROEVE, P. Y ROMAGNOLI, J. (2010). Wavelet analysis of images from scanning probe and electron microscopy .
- PEDERSEN, H. K. (1995). Decorating implicit surfaces. In: *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.
- QUINTANA, M., ZCIETCOVICH, F. Y CASTANEDA, B. (2014). 3d reconstruction of archaeological walls using kinect. *Journal of cultural Heritage* .
- ROBERTSON, D. Y CIPOLLA, R. (2008). Structure from motion .
- RUA, H. Y ALVITO, P. (2011). Living the past: 3d models, virtual reality and game engines as tools for supporting archaeology and the reconstruction of cultural heritage—the case-study of the roman villa of casal de freiria. *Journal of Archaeological Science* **38**(12), 3296–3308.
- SANDER, P. V., SNYDER, J., GORTLER, S. J. Y HOPPE, H. (2001). Texture mapping progressive meshes. In: *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM.
- SANTOS JUNIOR, J. D. O., VRUBEL, A., BELLON, O. R. Y SILVA, L. (2012). 3d reconstruction of cultural heritages: Challenges and advances on precise mesh integration. *Computer Vision and Image Understanding* **116**(12), 1195–1207.

- SCHNEIDER, T. D. Y PANICH, L. M. (2008). Total station mapping: Practical examples from alta and baja california. *The Journal of California and Great Basin Anthropology* **28**(2).
- SONG, M., ELIAS, T., MARTINOVIC, I., MUELLER-WITTIG, W. Y CHAN, T. K. (2004). Digital heritage application as an edutainment tool. In: *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*. ACM.
- SONY (2015). *Especificaciones Técnicas de camaras Sony*. <http://www.sony.com.pe>.
- STRANG, G. Y NGUYEN, T. (1996). *Wavelets and filter banks*. SIAM.
- TAPETE, D., CASAGLI, N., LUZI, G., FANTI, R., GIGLI, G. Y LEVA, D. (2013). Integrating radar and laser-based remote sensing techniques for monitoring structural deformation of archaeological monuments. *Journal of Archaeological Science* **40**(1), 176–189.
- UNESCO (2015). *Qhapaq Ñan - Camino Principal Andino*. <http://whc.unesco.org/>.
- WEBER, T., HÄNSCH, R. Y HELLWICH, O. (2015). Automatic registration of unordered point clouds acquired by kinect sensors using an overlap heuristic. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **102**, 96–109.
- WENG, J., COHEN, P. Y HERNIOU, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* (10), 965–980.
- WHEELER, M. D., SATO, Y. Y IKEUCHI, K. (1998). Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images. In: *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on*. IEEE.
- ZISSERMAN, A., FITZGIBBON, A. Y CROSS, G. (1999). Vhs to vrml: 3d graphical models from video sequences. In: *Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE International Conference on*, vol. 1. IEEE.
- ZVIETCOVICH, F., CASTANEDA, B. Y PERUCCHIO, R. (2015). 3d solid model updating of complex ancient monumental structures based on local geometrical meshes. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* .

Anexo 1: Modelo sólido de una sección del Qhapaq Ñan



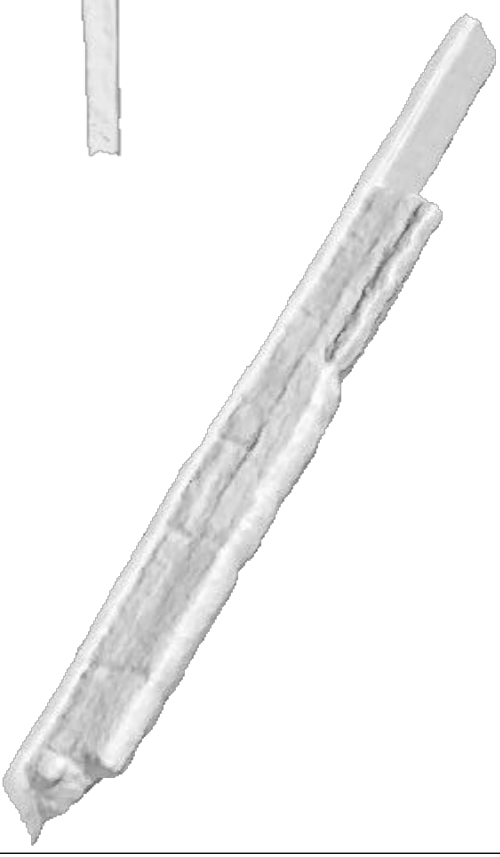
ISOMÉTRICO FRONTAL-DERECHA
ESC.:1/125



LATERAL DERECHA
ESC.:1/100



LATERAL IZQUIERDA
ESC.:1/100



ISOMÉTRICO FRONTAL-IZQUIERDA
ESC.:1/125



Universidad Nacional
San Cristobal de Huamanga



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ



TESISTA:
Saúl Walter Retamozo Fernández
ASESOR:
Mg. Cristian Castro Perez

ANÁLISIS DE MONUMENTOS
ARQUEOLÓGICOS
Chopaq Non
Lima

PLANO:
VISTAS 3D

ESCALA : INDICADA
FECHA : Abril-2016
CODIGO :
P-01

Anexo 2: Plano de Arquitectura de una sección del Qhapaq Ñan

ELEVACIÓN FRONTAL
ESC: 1/125



SECCIÓN A-A
ESC: 1/125



SECCIÓN B-B
ESC: 1/125



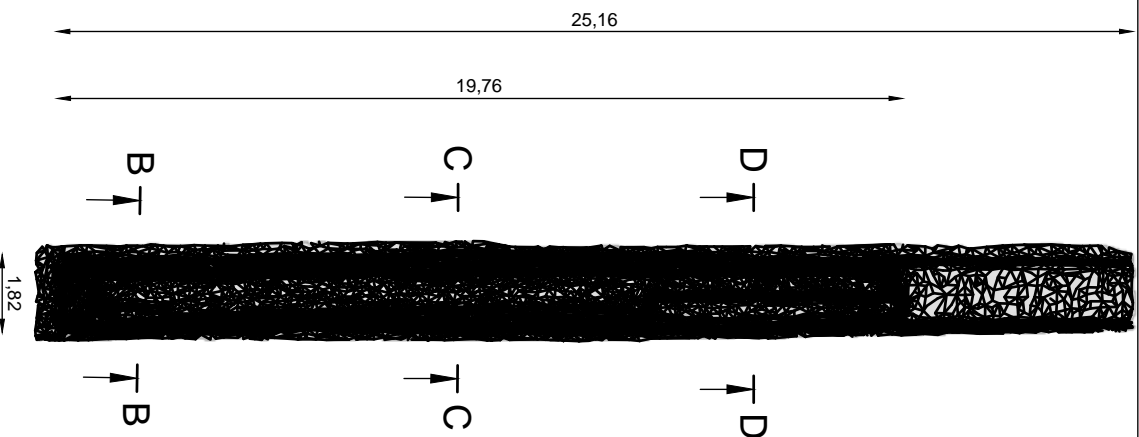
SECCIÓN C-C
ESC: 1/125



SECCIÓN D-D
ESC: 1/125



PLANTA
ESC: 1/125



INSTITUCIONES INVOLUCRADAS:



Universidad Nacional
San Cristóbal de Huamanga



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ



CONCYTEC
TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

TESISTA:

Saúl Walter Retamozo Fernández

ASESOR:

Mg. Cristian Castro Perez

ANÁLISIS DE MONUMENTOS
ARQUEOLÓGICOS

Qhapaq Nan
Lima

PLANO:

PLANTA Y
ELEVACIÓN

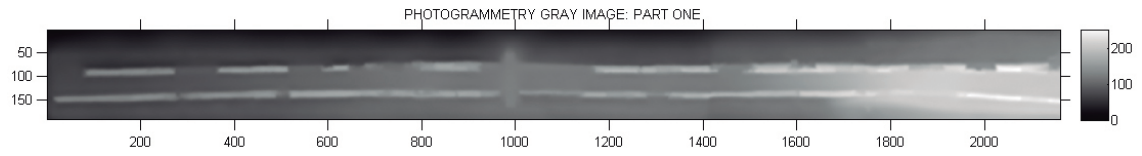
ESCALA : INDICADA

FECHA : Abril-2016

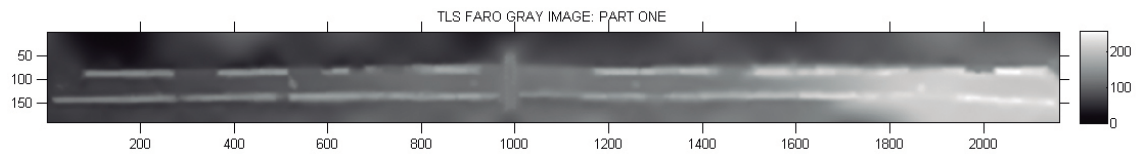
CÓDIGO :

P-02

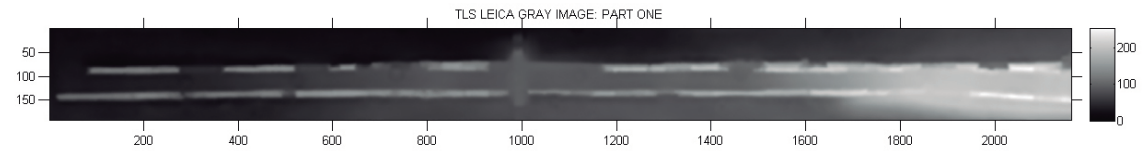
Anexo 3: Comparación de modelos 3D basado en imágenes empleando la 2DFT sobre el Camino-PUCP



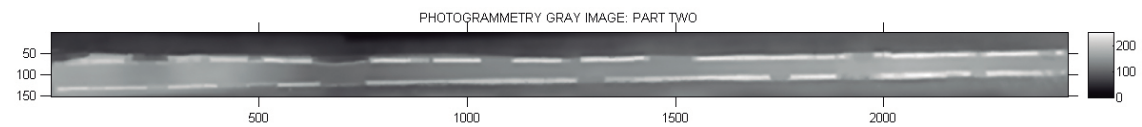
(a)



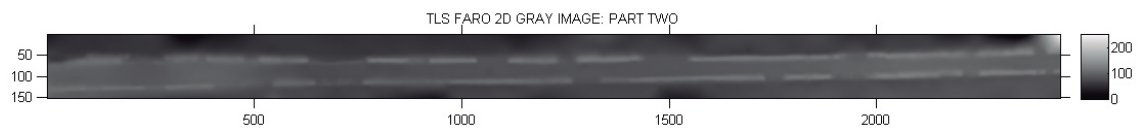
(b)



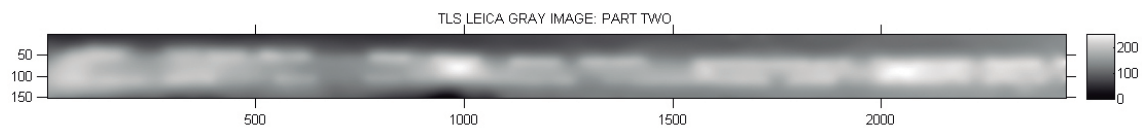
(c)



(d)

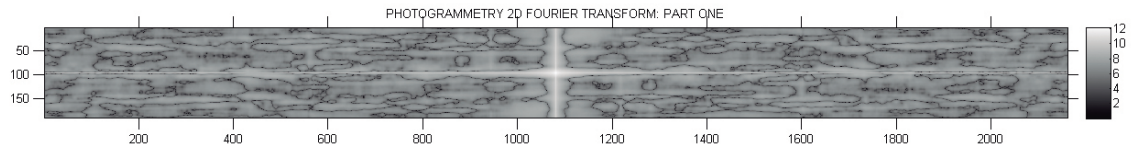


(e)

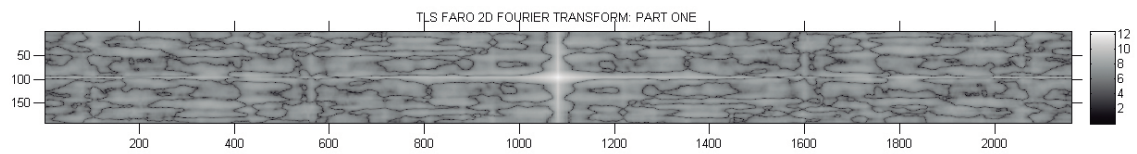


(f)

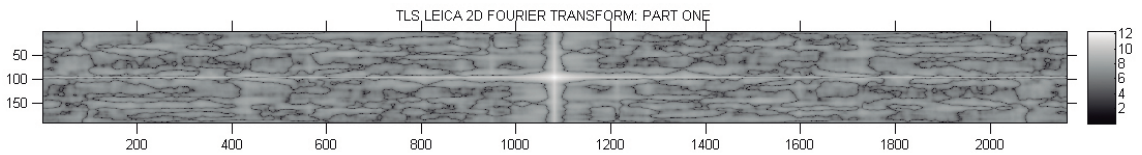
Figura 1: Imágenes en escala de grises del Camino-PUCP, (a) Primer tramo de PG, (b) Primer tramo de ELT Faro, (c) Primer tramo de ELT Leica, (d) Segundo tramo de PG, (e) Segundo tramo de ELT Faro, (f) Segundo tramo de ELT Leica.



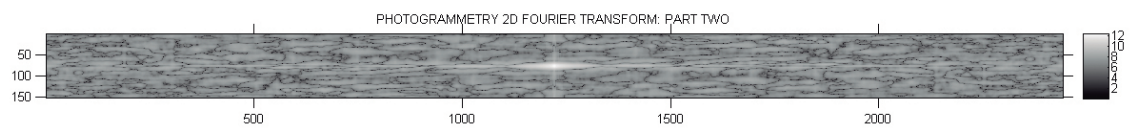
(a)



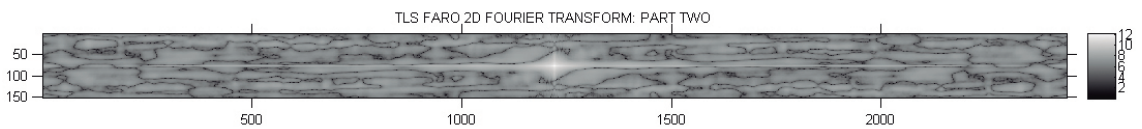
(b)



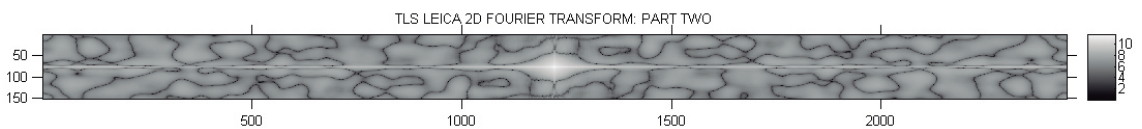
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2: 2DFT del Camino-PUCP, (a) Primer tramo de PG, (b) Primer tramo de ELT Faro, (c) Primer tramo de ELT Leica, (d) Segundo tramo de PG, (e) Segundo tramo de ELT Faro, (f) Segundo tramo de ELT Leica.

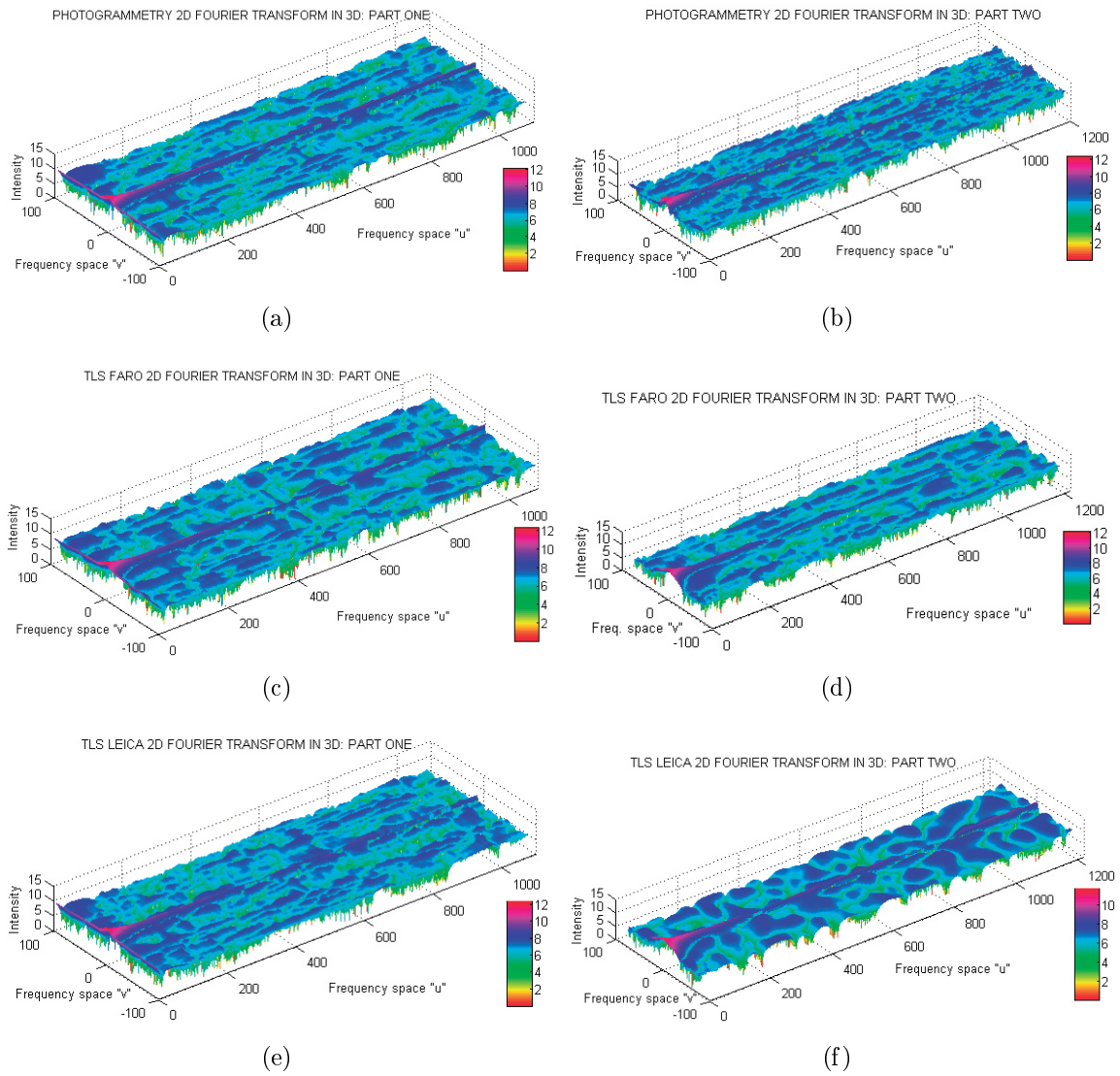
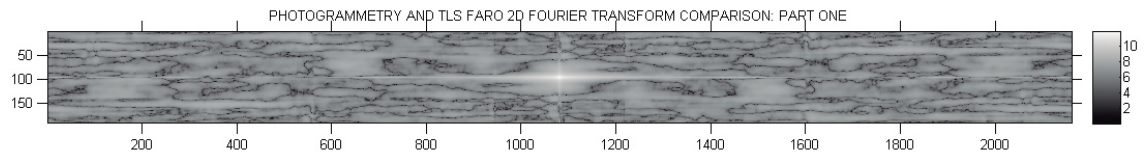
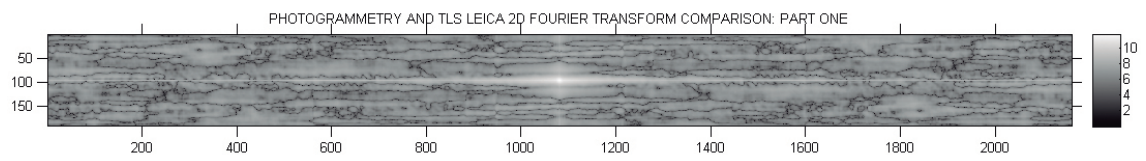


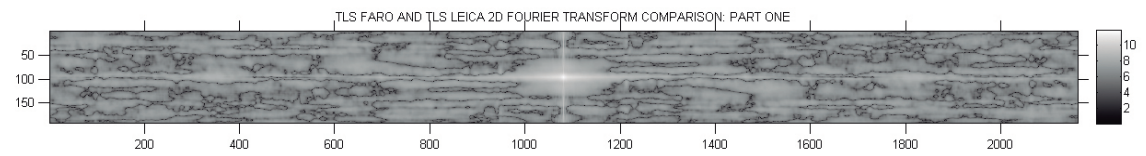
Figura 3: 2DFT del Camino-PUCP en 3D, (a) Primer tramo de PG, (b) Primer tramo de ELT Faro, (c) Primer tramo de ELT Leica, (d) Segundo tramo de PG, (e) Segundo tramo de ELT Faro, (f) Segundo tramo de ELT Leica.



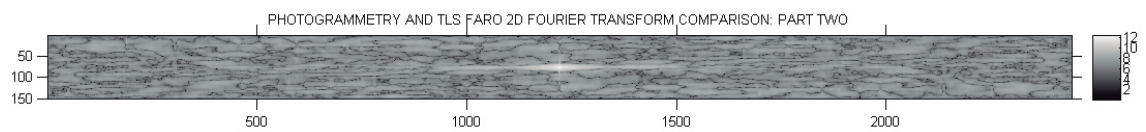
(a)



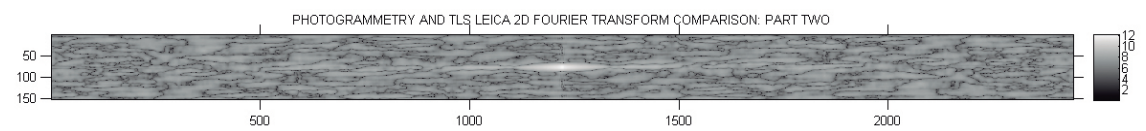
(b)



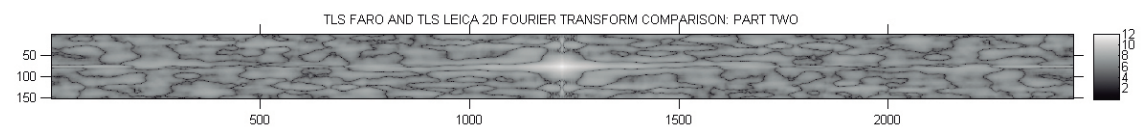
(c)



(d)



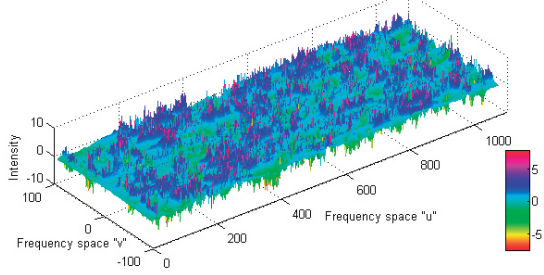
(e)



(f)

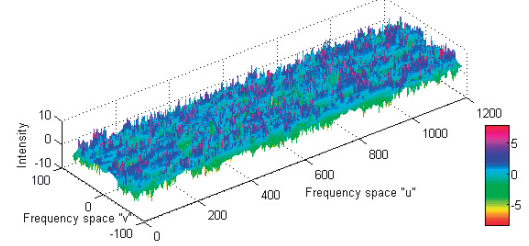
Figura 4: Comparación de 2DFT del Camino-PUCP. Primer tramo de comparaciones entre: (a) PG y ELT Faro (referencia), (b) PG y ELT Leica (referencia), (c) ELT Faro y ELT Leica (referencia). Segundo tramo de comparaciones entre: (d) PG y ELT Faro (referencia), (e) PG y ELT Leica (referencia), (f) ELT Faro y ELT Leica (referencia).

PHOTOGRAMMETRY AND TLS FARO 2D FOURIER TRANSFORM COMPARISON IN 3D: PART ONE



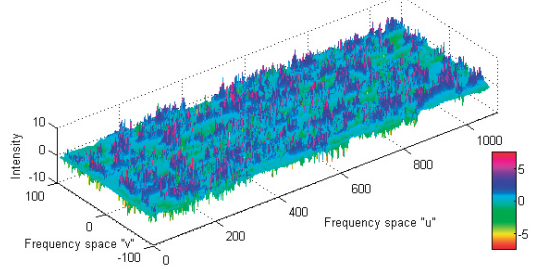
(a)

PHOTOGRAMMETRY AND TLS FARO 2D FOURIER TRANSFORM COMPARISON IN 3D: PART TWO



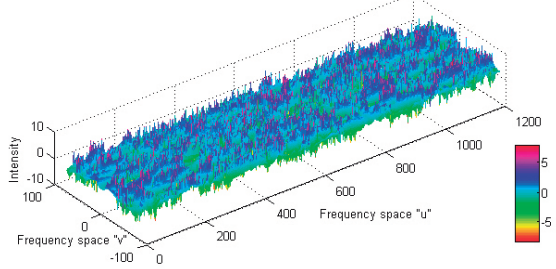
(b)

PHOTOGRAMMETRY AND TLS LEICA 2D FOURIER TRANSFORM COMPARISON IN 3D: PART ONE



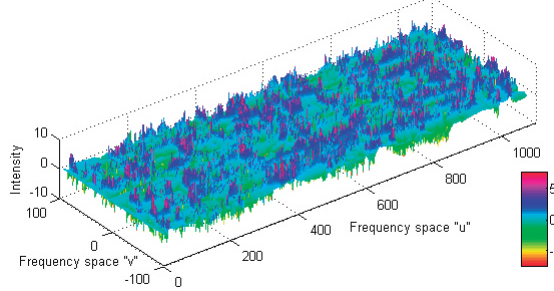
(c)

PHOTOGRAMMETRY AND TLS FARO 2D FOURIER TRANSFORM COMPARISON IN 3D: PART TWO



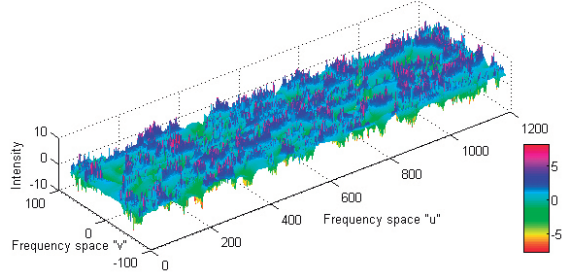
(d)

TLS FARO AND TLS LEICA 2D FOURIER TRANSFORM COMPARISON IN 3D: PART ONE



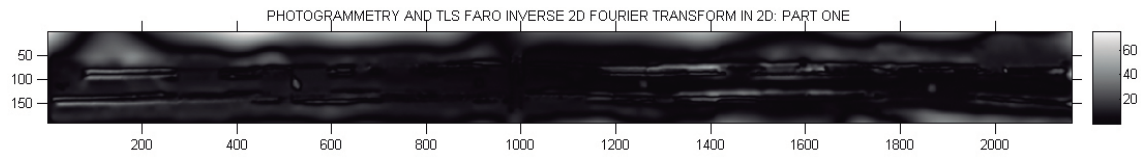
(e)

TLS FARO AND TLS LEICA 2D FOURIER TRANSFORM COMPARISON IN 3D: PART TWO

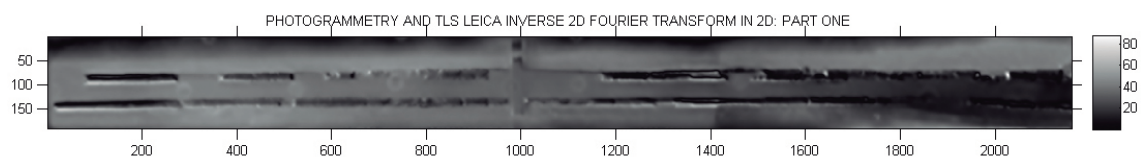


(f)

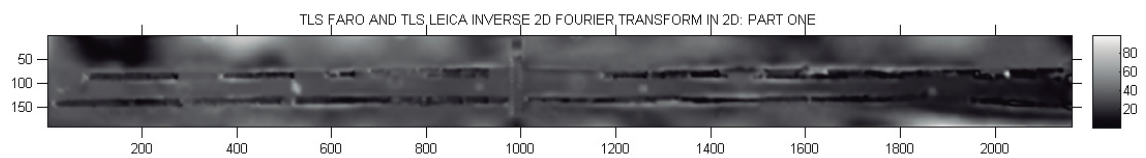
Figura 5: Comparación de 2DFT del Camino-PUCP en 3D. Primer tramo de comparaciones entre: (a) PG y ELT Faro (referencia), (b) PG y ELT Leica (referencia), (c) ELT Faro y ELT Leica (referencia). Segundo tramo de comparaciones entre: (d) PG y ELT Faro (referencia), (e) PG y ELT Leica (referencia), (f) ELT Faro y ELT Leica (referencia).



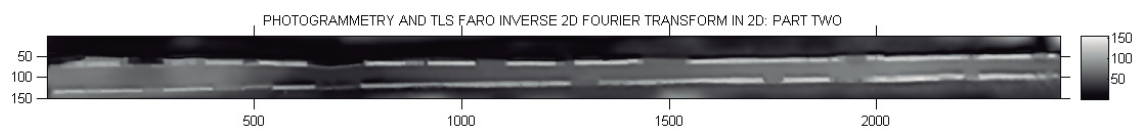
(a)



(b)



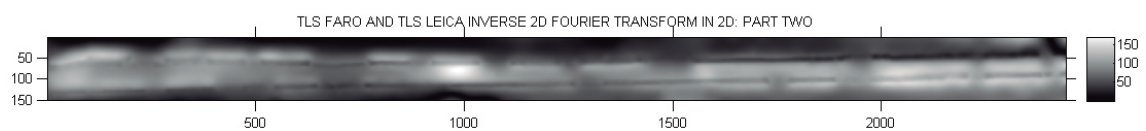
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 6: 2DIFT del Camino-PUCP. Primer tramo de comparaciones entre: (a) PG y ELT Faro (referencia), (c) PG y ELT Leica (referencia), (e) ELT Faro y ELT Leica (referencia). Segundo tramo de comparaciones entre: (b) PG y ELT Faro (referencia), (d) PG y ELT Leica (referencia), (f) ELT Faro y ELT Leica (referencia).

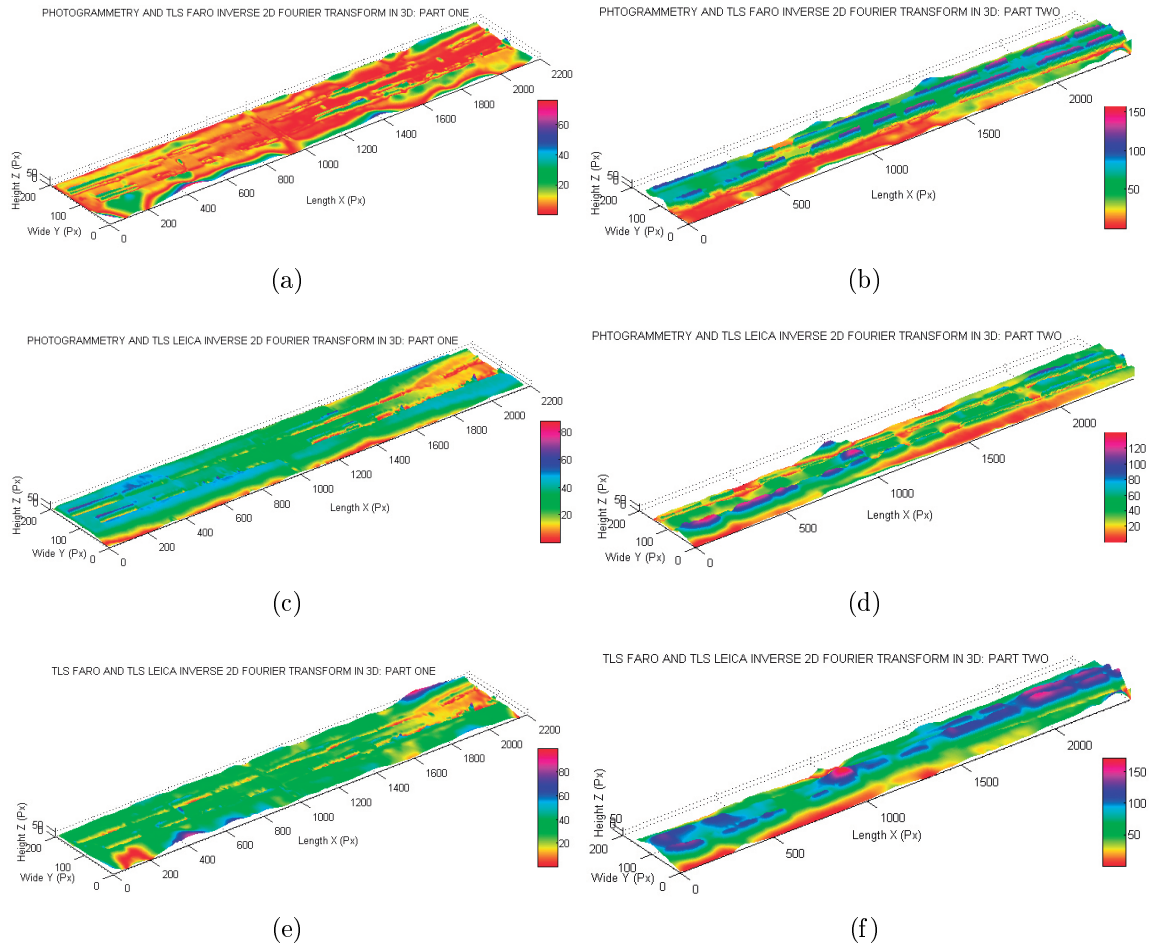


Figura 7: 2DIFT del Camino-PUCP en 3D. Primer tramo de comparaciones entre: (a) PG y ELT Faro (referencia), (c) PG y ELT Leica (referencia), (e) ELT Faro y ELT Leica (referencia). Segundo tramo de comparaciones entre: (b) PG y ELT Faro (referencia), (d) PG y ELT Leica (referencia), (f) ELT Faro y ELT Leica (referencia).

Anexo 4: Comparación de modelos 3D basado en imágenes empleando la Entropía de Shanon sobre el Camino-PUCP

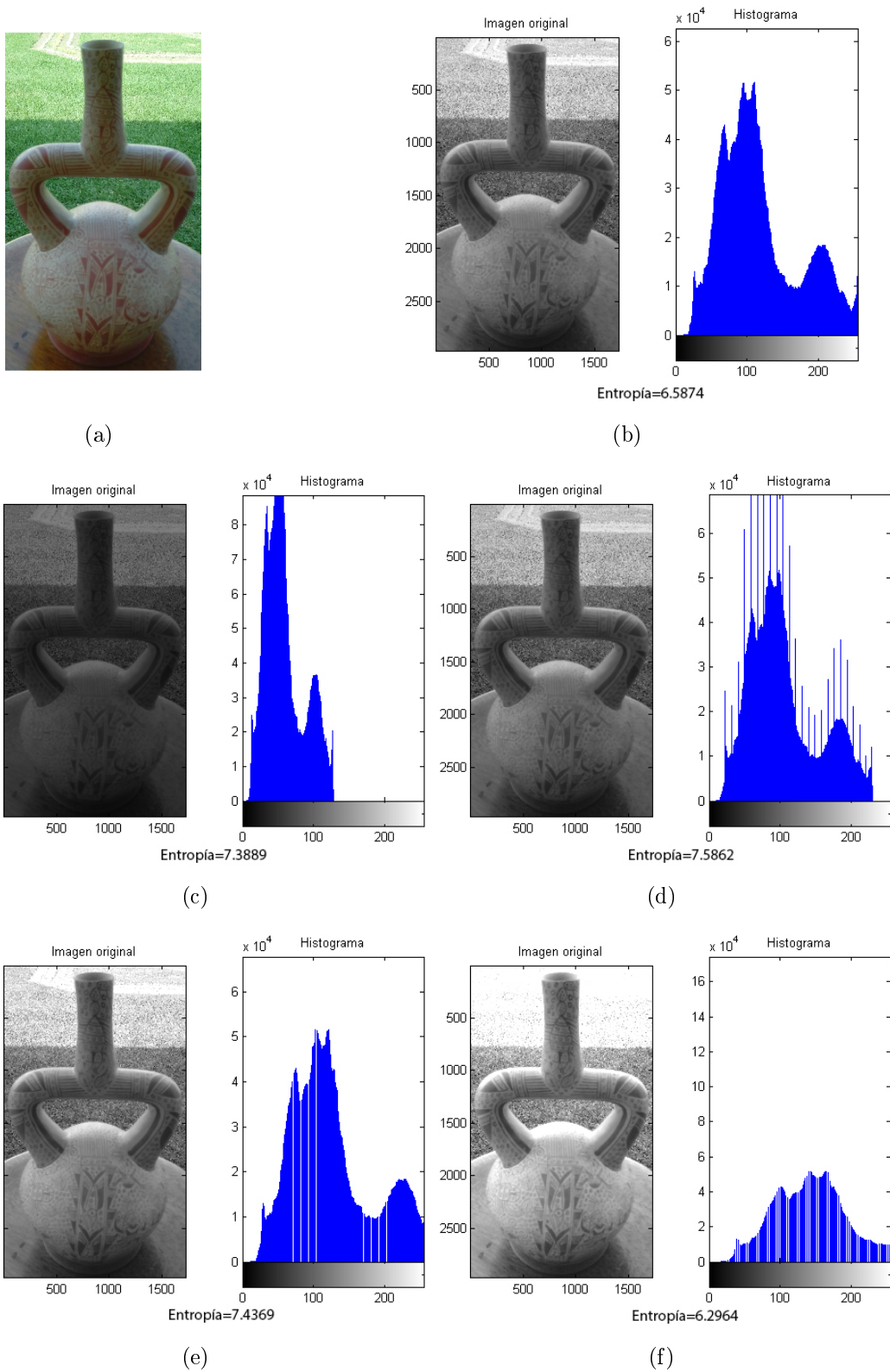


Figura 1: Cerámica moche como caso de estudio inicial en la entropía de Shannon: (a) Cerámica moche a colores, (b) Cerámica moche en niveles de gris oscurecida al 50 % , (c) Cerámica moche en niveles de gris oscurecida al 10 % , (d) Cerámica moche en niveles de gris, (e) Cerámica moche en niveles de gris iluminada al 10 % y (f) Cerámica moche en niveles de gris iluminada al 50 %.










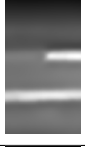














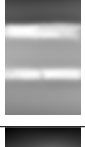

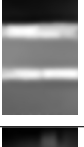





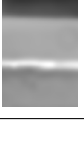
Modelo PG		Modelo ELT Faro		Modelo ELT Leica		PG y Faro	PG y Leica	Faro y Leica
	2.035		1.958		1.899	0.0771	0.1362	0.0591
	2.101		2.097		1.986	0.0035	0.1149	0.1114
	2.102		2.113		1.990	0.0107	0.1124	0.1230
	2.067		2.053		2.010	0.0134	0.0561	0.0427
	2.127		2.133		2.059	0.0059	0.0682	0.0741
	2.084		2.052		2.003	0.0311	0.0810	0.0499
	2.084		2.155		1.963	0.0711	0.1208	0.1919
	2.107		2.023		2.018	0.0831	0.0887	0.0056
	2.120		2.109		2.035	0.0111	0.0857	0.0745
	2.077		2.115		2.049	0.0388	0.0276	0.0665
	2.080		2.162		2.032	0.0826	0.0481	0.1307

Tabla 1: Comparación de modelos 3D basado en imágenes empleando los estudios de PG, ELT Faro y ELT Leica.

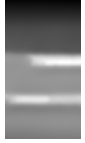

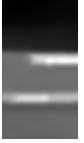





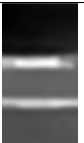























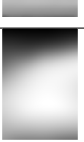
Modelo PG		Modelo ELT Faro		Modelo ELT Leica		PG y Faro	PG y Leica	Faro y Leica
	2.069		2.073		1.993	0.0042	0.0760	0.0802
	2.081		2.079		2.030	0.0029	0.0516	0.0487
	2.067		2.090		2.002	0.0253	0.1134	0.0881
	2.125		2.112		2.018	0.0131	0.1078	0.0946
	2.160		2.141		2.086	0.0190	0.0744	0.0554
	2.188		2.153		2.142	0.0352	0.0456	0.0104
	2.135		2.118		2.108	0.0165	0.0263	0.0099
	2.006		1.967		2.016	0.0387	0.0101	0.0489
	1.989		1.962		2.013	0.0265	0.0245	0.0511
	1.985		1.995		1.992	0.0100	0.0069	0.0032
	2.109		2.188		2.297	0.0792	0.1887	0.1095

Tabla 2: Comparación de modelos 3D basado en imágenes empleando los estudios de PG, ELT Faro y ELT Leica.






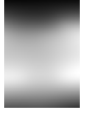



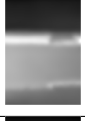


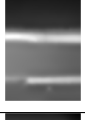


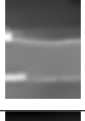
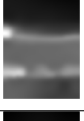

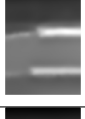


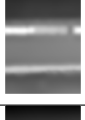


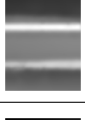
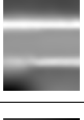

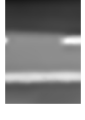



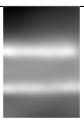




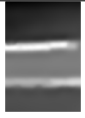
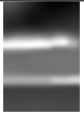

Modelo PG		Modelo ELT Faro		Modelo ELT Leica		PG y Faro	PG y Leica	Faro y Leica
	2.189		2.226		2.278	0.0377	0.0899	0.0522
	2.187		2.158		2.355	0.0285	0.1678	0.1963
	2.148		2.207		2.279	0.0596	0.1313	0.0717
	2.258		2.297		2.340	0.0397	0.0826	0.0429
	2.260		2.252		2.314	0.0086	0.0531	0.0617
	2.143		2.216		2.312	0.0732	0.1689	0.0957
	2.195		2.218		2.355	0.0229	0.1598	0.1369
	2.266		2.240		2.315	0.0258	0.0493	0.0751
	2.254		2.217		2.313	0.0367	0.0588	0.0955
	2.208		2.234		2.331	0.0257	0.1231	0.0974
	2.227		2.323		2.302	0.0957	0.0750	0.0207
	2.163		2.220		2.343	0.0564	0.1797	0.1233
	2.188		2.240		2.341	0.0518	0.1525	0.1007

Tabla 3: Comparación de modelos 3D basado en imágenes empleando los estudios de PG, ELT Faro y ELT Leica.















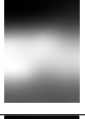















Modelo PG		Modelo ELT Faro		Modelo ELT Leica		PG y Faro	PG y Leica	Faro y Leica
	2.203		2.219		2.362	0.0161	0.1587	0.1426
	2.215		2.261		2.294	0.0458	0.0798	0.0339
	2.203		2.258		2.286	2.286	0.0831	0.0285
	2.184		2.268		2.325	0.0843	0.1413	0.0570
	2.179		2.239		2.329	0.0601	0.1502	0.0901
	2.218		2.327		2.319	0.1090	0.1011	0.0079
	2.191		2.264		2.282	0.0731	0.0912	0.0181
	2.179		2.230		2.333	0.0510	0.1539	0.1028
	2.223		2.156		2.334	0.0675	0.1102	0.1777
	1.620		1.441		1.695	0.1790	0.0749	0.2539
Promedio						0.0377	0.0887	0.0741
Desviación Estándar						0.0348	0.0473	0.0546

Tabla 4: Comparación de modelos 3D basado en imágenes empleando los estudios de PG, ELT Faro y ELT Leica.