



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

TRABAJO PRÁCTICO

**APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA ELABORACIÓN
DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DEL ESTADO DE
AGUASCALIENTES**

PRESENTA:

ING. JOSUÉ VALDEZ ANGUIANO

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON
ESPECIALIDAD EN CONSTRUCCIÓN**

TUTORES:

DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA

DR. FRANCISCO MERCADO DIAZ DE LEÓN

ASESOR:

MCPA. ARQ. IVÁN ISRAEL SÁNCHEZ SILVA

AGUASCALIENTES, AGS; 14 DE NOVIEMBRE DE 2023

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

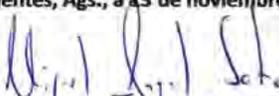
PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **JOSUÉ VALDEZ ANGUIANO** con ID **339372** quien realizó el trabajo práctico titulado: **APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 13 de noviembre de 2023.



DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA
Tutor de trabajo práctico

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **COTUTOR** designado del estudiante **JOSUÉ VALDEZ ANGUIANO** con ID **339372** quien realizó el trabajo práctico titulado: **APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 15 de noviembre de 2023.

DR. FRANCISCO MERCADO DIAZ DE LEÓN
Cotutor de trabajo práctico

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

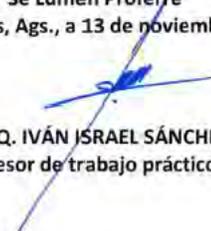
MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **JOSUÉ VALDEZ ANGUIANO** con ID **339372** quien realizó el trabajo práctico titulado: **APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 13 de noviembre de 2023.


MCPA. ARQ. IVÁN ISRAEL SÁNCHEZ SILVA
Asesor de trabajo práctico

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 13/11/2023

NOMBRE: JOSUÉ VALDEZ ANGUIANO ID: 339372

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

TIPO DE TRABAJO: () Tesis (X) Trabajo Práctico
 APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES

TÍTULO: AGUASCALIENTES

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Se aplicaron técnicas de fotogrametría digital para la documentación de bienes patrimoniales al Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles, en apoyo al Instituto Nacional de Antropología e Historia, con la finalidad de proteger los bienes culturales e históricos de la nación.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
N.A.				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

SI X
 No _____

Elaboró:

FIRMAS

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. en Amb. Ant. Mario Ernesto Esparrú Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Mtra. en Ing. AMB. Ma. Guadalupe Lira Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico; llevar el seguimiento de los alumnos.

Agradecimientos

Y es aquí el momento, cuando llega la parte de voltear hacia atrás y ver todo el recorrido por el cual tuve que atravesar para poder llegar a la finalización del presente trabajo, para apreciar y agradecer a todos aquellos que de alguna u otra manera influyeron para poder llevarlo a cabo con éxito, a pesar de los obstáculos y adversidades que se fueron presentado durante el recorrido. Sin más, quiero agradecer a:

Al CONACYT y Gobierno Federal por el apoyo económico de la beca otorgada durante los dos años de posgrado, lo cual me facilitó los gastos de mi estancia en el Estado de Aguascalientes, como también, para mis estudios en la maestría.

Al centro INAH Aguascalientes, por permitirme trabajar en conjunto con la institución para llevar a cabo el presente trabajo, por facilitarme las áreas de trabajo, así como los conocimientos y el apoyo en todo el proceso.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por abrirme las puertas y apoyarme en el desarrollo y crecimiento de mis conocimientos. Resalto la calidad y amabilidad de todo el personal, tanto administrativos, docentes y operarios que, de cierta manera, hicieron más agradable y amena mi estancia en las instalaciones.

Al Dr. Miguel Soto, tutor de mi trabajo práctico, por llevarme de la mano paso a paso en la elaboración del mismo, admiro su paciencia y tolerancia, por siempre estar en la disposición de ayudarme. Lo resalto y respeto como un excelente docente, pero también, lo estimo mucho como a un amigo.

A mi cotutor, el Dr. Francisco Mercado por instruirme a seguir más allá en mi trabajo, y a mi Asesor el Arq. Iván Sánchez, por estar en la disposición de apoyarme en todo momento en mi trabajo y brindarme las herramientas para llevarlo a cabo.

A mi mamá Reina, mis abuelitos Bety y Samuel, mi prima Montse, y mi familia en general, por siempre apoyarme en todo aspecto desde que tengo memoria, por darme ese inmenso amor y cariño, creer y confiar en mí. Me siento agradecido y bendecido con la vida y Dios, por brindarme tan hermosa familia.

A todos mis amigos de Fresnillo y Aguascalientes, no acabaría por mencionarlos, pero ustedes saben quiénes son porque siempre se los he hecho saber y, sin duda, fueron parte de este proceso en mi formación académica y personal, gracias por siempre hacerme sentir acompañado en las adversidades que se presentan en la vida.

Dedicatorias

A mi mamá Reina, quien ha sido la persona que siempre me ha demostrado su amor, por hacerme saber que yo puedo con todo lo que me proponga. Por no dudar ni un momento de mí. Espero se enorgullezca de la persona que soy hoy en día. La admiro por ser la persona más fuerte que conozco y no rendirse jamás, eso me motiva a seguir adelante todos los días. Mi mamá es mi motor de vida.

A mis abuelitos Bety y Samuel, que son para mí como mis segundos padres, puesto que, siempre han visto por mí en todos los aspectos desde que nací. Los tengo como ejemplo de vida, y me siento muy feliz de poder compartir con ellos esta etapa de mi formación académica.

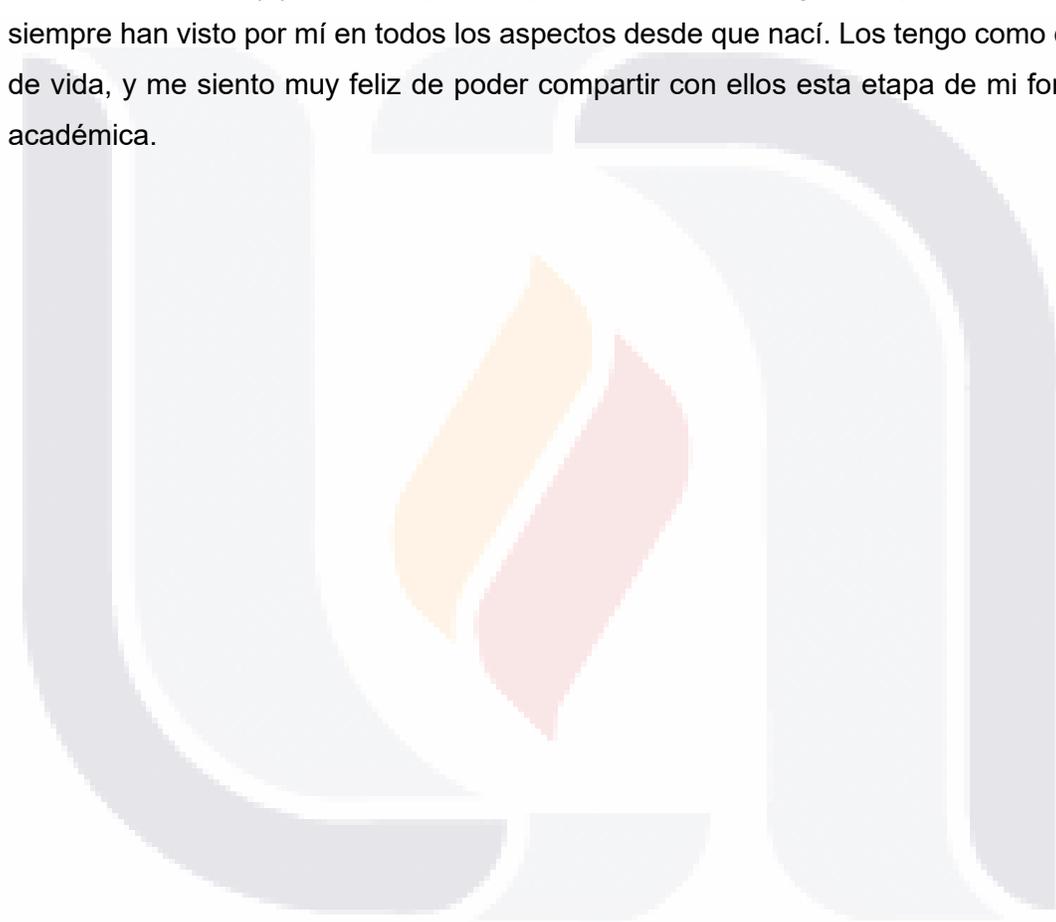
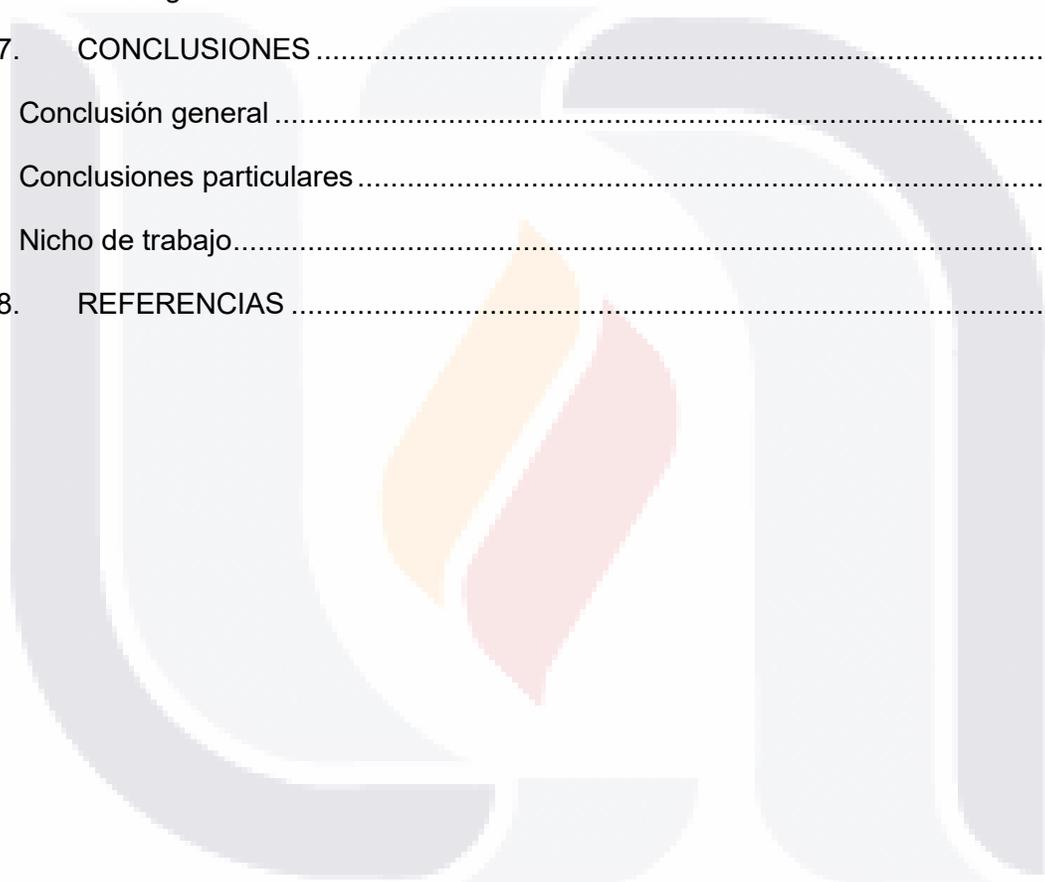


Tabla de contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ACRÓNIMOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. Prólogo	16
1.2. Objetivo General.....	17
1.3. Objetivos Particulares	17
1.4. Alcances	18
1.5. Justificación	18
1.6. Hipótesis.....	23
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	25
2.1. Documentación del Patrimonio	25
2.2. Metodologías para la caracterización geométrica de edificios patrimoniales.....	30
2.2.1. Levantamientos topográficos	30
2.2.2. Levantamientos LiDAR o escáner láser	32
2.2.3. Levantamientos fotogramétricos	35
2.3. Aplicación de UAV para levantamientos fotogramétricos al patrimonio cultural.....	39
2.4. Otras aplicaciones en el uso de la técnica de fotogrametría aérea	43
2.5. Comparación de softwares empleando la metodología fotogramétrica	45
3. MARCO TEÓRICO	49
3.1. Patrimonio	49
3.1.1. Patrimonio edificado	50
3.1.2. Puentes patrimoniales	50

3.1.3.	Conservación.....	51
3.1.4.	Documentación gráfica del patrimonio edificado.....	52
3.2.	Fotogrametría.....	54
3.2.1.	Fotogrametría digital.....	55
3.2.2.	Fotogrametría aérea.....	56
3.2.3.	Vehículo aéreo no tripulado.....	56
3.2.4.	Paralaje.....	58
3.2.5.	Distancia de muestreo en tierra.....	59
3.2.6.	Estructura de movimiento.....	60
3.3.	Agisoft Metashape.....	61
4.	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	64
4.1.	Diagrama general de flujo de trabajo.....	66
4.1.1.	Selección de muestra.....	66
4.1.2.	Planificación de trabajo en campo.....	68
4.1.3.	Trabajo en campo.....	70
4.1.4.	Trabajo en gabinete.....	75
4.1.4.1.	Ortofoto para trazo de planos arquitectónicos.....	81
4.1.5.	Documentación gráfica.....	85
5.	RESULTADOS.....	88
5.1.	Puente San Ignacio.....	90
5.2.	Puente Blanco.....	93
5.3.	Puente CECyTEA.....	96
5.4.	Puente El Tule.....	99
5.5.	Puente Tepezalilla.....	102
5.6.	Puente Peñuelas.....	105
5.7.	Puente Pargas.....	108
6.	DISCUSIONES.....	112

6.1.	Puente San Ignacio.....	113
6.2.	Puente Blanco	114
6.3.	Puente CECyTEA	116
6.4.	Puente El Tule	117
6.5.	Puente Tepezalilla	118
6.6.	Puente Peñuelas	120
6.7.	Puente Pargas	121
7.	CONCLUSIONES	124
7.1.	Conclusión general	124
7.2.	Conclusiones particulares	124
7.3.	Nicho de trabajo.....	126
8.	REFERENCIAS	128



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Nube densa de puntos exportada de Agisoft Metashape a Autodesk Revit (Martínez-Carricondo et al., 2021).</i>	20
Figura 2. <i>a) Proceso de alineación de cámaras y b) Creación de nube de puntos (Castilla et al., 2021).</i>	20
Figura 3. <i>a) Modelo RGB, b) Modelo normal texturizado, c) Modelo de oclusión texturizada (Castilla et al., 2021).</i>	21
Figura 4. <i>Proceso fotogramétrico (nube de puntos dispersos, nube densa, malla, texturizado) (Díaz Zeledón, 2018).</i>	21
Figura 5. <i>Matriz de necesidades básicas de la documentación patrimonial (Narváez, 2016).</i>	26
Figura 6. <i>Metodología de documentación para el patrimonio cultural edificado (Narváez, 2016).</i>	27
Figura 7. <i>Cuestionario de preguntas cerradas con la finalidad de analizar la percepción de los habitantes de la zona seleccionada (Vladimir G & Centy, 2016).</i>	28
Figura 8. <i>Croquis del Monumento a Francisco de Paula Vallador de Jospe Ma. Palma Velasco, 1928 (Bellido-Márquez, 2020).</i>	29
Figura 9. <i>Plano de modelado del terreno del proyecto La Blanca (Sender Contell et al., 2005).</i>	30
Figura 10. <i>Comparación entre el levantamiento tradicional y el fotogramétrico (Giuliano, 2014).</i>	31
Figura 11. <i>UAV con cámara equipada y láser escáner (Jankauskienė et al., 2020).</i>	32
Figura 12. <i>Alzado de la nube de puntos Forno de la nube de puntos (arriba), y dibujo en AutoCAD (abajo) (Mañana-Borrazás et al., 2009).</i>	33
Figura 13. <i>Nube de puntos densa desde el software ReCap, zona superior del Lienso y la Torre del castillo de Priego de Córdoba (García-Molina et al., 2021).</i>	35
Figura 14. <i>Proceso de virtualización del patrimonio cultural (León Lescano et al., 2020).</i>	36
Figura 15. <i>Representación fotogramétrica de nube de puntos del contrafuerte, monasterio de San Jerónimo (Jalón et al., 2021).</i>	36
Figura 16. <i>Caras del monumento Benito Juárez del modelo 3D (Sánchez, 2021).</i>	37
Figura 17. <i>Representación 2D del puente de mampostería Diavolo, en Italia (Pepe & Costantino, 2020).</i>	40

Figura 18. *Detalle de la nube de puntos 3D (Picon-Cabrera et al., 2021)*.....40

Figura 19. *Flujo de trabajo en la reconstrucción de edificios y análisis urbano con fotogrametría (Picon-Cabrera et al., 2021)*.....41

Figura 20. *a) Modelo creado a través HBIM, b) Análisis de superficie del modelo en Autodesk Revit (Martínez-Carricondo et al., 2021)*.....42

Figura 21. *Ortofoto de la parcela de Ayoó de Vidriales, a partir de la aplicación de fotogrametría aérea (arriba) y el modelo digital de superficie (abajo) (Marcos-Robles et al., 2016)*.43

Figura 22. *Objetos identificados dentro del área de estudio y clasificados preliminarmente (Vavulin et al., 2021)*.....44

Figura 23. *Modelo 3D no orientado y escalado del proceso de alineamiento de 66 imágenes (Carvajal Ramírez et al., 2019)*.....45

Figura 24. *Tiempo promedio en procedimiento (minutos) (Kingsland, 2020)*.....46

Figura 25. *Portada del tratado de Virtubio Venecia 1747 (izquierda) y del libro: Ritrovato il “Di Architectura” (derecha) (Narváez, 2016)*.....53

Figura 26. *Ejemplo de documentación patrimonial (Narváez, 2016)*.53

Figura 27. *Solapamiento entre fotografías para obtener una correcta visión estereoscópica, esta debe tener un 60% lateral y un 30% longitudinal (Zúñiga, 2016, obtenida de Duelis, 2015)*.....55

Figura 28. *Proceso de reconstrucción tridimensional mediante la técnica de fotogrametría digital (Zúñiga, 2016)*.....56

Figura 29. *Dron (Bustamante et al., 2017)*.57

Figura 30. *Paralaje estereoscópica (Rosado, 2014)*.....58

Figura 31. *Recubrimiento longitudinal o solape (Pacheco A. & Pozzobon B., 2011)*.58

Figura 32. *GSD demostrado gráficamente (Rosado, 2014)*.....59

Figura 33. *Acercamiento y medición de longitud de un píxel en ortofoto. Elaboración propia*.60

Figura 34. *La técnica de SfM requiere múltiples fotografías superpuestas como entrada para los algoritmos de extracción de características y reconstrucción 3D (Westoby et al., 2012)*.....61

Figura 35. *Ejemplo de una nube dispersa de puntos y orientación de cámaras. Elaboración propia*.....61

Figura 36. *Ejemplo de una nube densa de puntos. Elaboración propia*.....62

Figura 37. *Ejemplo de un enmallado. Elaboración propia*.62

Figura 38. <i>Ejemplo de un modelo texturizado.</i> Elaboración propia.....	62
Figura 39. <i>Diagrama de flujo de trabajo.</i> Elaboración propia.....	66
Figura 40. <i>KMZ de las ubicaciones de los puentes del Estado de Aguascalientes catalogados como patrimoniales (Centro INAH Aguascalientes, 2022).</i>	68
Figura 41. <i>Operación de RPAS (NOM-107-SCT3-2019).</i>	69
Figura 42. <i>Zona restringida por cercanía a un aeropuerto.</i> Elaboración propia.	69
Figura 43. <i>Cuadrante o tercias en cámara del dron.</i> Elaboración propia.	72
Figura 44. <i>Ejemplo de satélites no localizados.</i> Elaboración propia.	73
Figura 45. <i>Vuelo del dron a una baja altura y variación del ángulo de captura.</i> Elaboración propia.....	74
Figura 46. <i>Levantamiento con estación total y distanciómetro.</i> Elaboración propia.	75
Figura 47. <i>Proceso fotogramétrico (Zeledón, 2018).</i>	76
Figura 48. <i>Selección de parámetros, orientación de fotos.</i> Elaboración propia.	77
Figura 49. <i>Selección de parámetros, creación de nube de puntos densa.</i> Elaboración propia.	78
Figura 50. <i>Selección de parámetros, creación de malla.</i> Elaboración propia.....	78
Figura 51. <i>Selección de parámetros, creación de textura.</i> Elaboración propia.	79
Figura 52. <i>Medición de apertura de los arcos del puente San Ignacio con distanciómetro.</i> Elaboración propia.....	80
Figura 53. <i>Medición de apertura de los arcos del puente San Ignacio con Estación Total, procesado en CIVIL CAD 3D.</i> Elaboración propia.	80
Figura 54. <i>Medición de apertura de los arcos del puente San Ignacio a través del levantamiento fotogramétrico procesado en Agisoft Metashape.</i> Elaboración propia.....	81
Figura 55. <i>Selección de tipo de ortofoto según la proyección.</i> Elaboración propia.	82
Figura 56. <i>a) Comando mapiinsert de CIVIL 3D, b) Valores de inserción de ortofoto.</i> Elaboración propia.....	83
Figura 57. <i>Guía gráfica, fotográfica y de descripción arquitectónica para el catálogo nacional de monumentos (INAH, 2023).</i>	84
Figura 58. <i>Guía para captura de fichas en el sistema de publicación y administración del catálogo nacional de monumentos históricos (INAH, 2022).</i>	85
Figura 59. <i>Página oficial del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles y al Centro de Documentación de la CNMH (catalogonacionalhmi.inah.gob.mx, s.f.)</i>	86

Figura 60. *Requerimientos para el registro y catalogación en la página oficial del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles y al Centro de Documentación de la CNMH (catalogonacionalhmi.inah.gob.mx, s.f.)*.....86

Figura 61. *Ubicaciones de los puentes a los que se le aplicó la metodología de trabajo. Elaboración propia*.....89

Figura 62. *Ubicación del puente San Ignacio. Elaboración propia*.....90

Figura 63. *Modelo 3D del puente San Ignacio, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia*.....90

Figura 64. *Ortofotos de planta y fachadas, puente San Ignacio. Elaboración propia*.....91

Figura 65. *a) Fachada principal, b) detalle de monolito, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente San Ignacio. Elaboración propia*.....92

Figura 66. *Ubicación del puente CECyTEA. Elaboración propia*.....93

Figura 67. *Modelo 3D del puente Blanco, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia*.....93

Figura 68. *Ortofotos de planta y fachadas, puente Blanco. Elaboración propia*.....94

Figura 69. *a) Fachada principal, b) detalle de arco y dovelas, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente Blanco. Elaboración propia*.....95

Figura 70. *Ubicación del puente CECyTEA. Elaboración propia*.....96

Figura 71. *Modelo 3D del puente CECyTEA, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia*.....96

Figura 72. *Ortofotos de planta y fachadas, puente CECyTEA. Elaboración propia*.....97

Figura 73. *a) Fachada principal, b) detalle de arco y dovela, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente CECyTEA. Elaboración propia*.....98

Figura 74. *Ubicación del puente El Tule. Elaboración propia*.....99

Figura 75. *Modelo 3D del puente El Tule, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia*.....99

Figura 76. *Ortofotos de planta y fachadas, puente El Tule. Elaboración propia*.....100

Figura 77. *a) Fachada principal, b) detalle de arco, dovelas y estructura para puerta, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente El Tule. Elaboración propia*.....101

Figura 78. *Ubicación del puente Tepezalilla. Elaboración propia*.....102

Figura 79. *Modelo 3D del puente Tepezalilla, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia*.....102

Figura 80. *Ortofotos de planta y fachadas, puente Tepezalilla. Elaboración propia*.....103

Figura 81. a) *Fachada principal*, b) *detalle de arco y dovelas*, c) *croquis arquitectónico* y d) *croquis de localización del puente El Tule*. Elaboración propia..... 104

Figura 82. *Ubicación del puente Peñuelas*. Elaboración propia..... 105

Figura 83. *Modelo 3D del puente Peñuelas*, a) *Nube dispersa de puntos*, b) *Nube densa de puntos*, c) *Malla* y d) *Texturizado*. Elaboración propia..... 105

Figura 84. *Ortofotos de planta y fachadas, puente Peñuelas*. Elaboración propia..... 106

Figura 85. a) *Fachada principal*, b) *detalle de arco y dovelas*, c) *croquis arquitectónico* y d) *croquis de localización del puente Peñuelas*. Elaboración propia. 107

Figura 86. *Ubicación del puente Pargas*. Elaboración propia. 108

Figura 87. *Modelo 3D del puente Pargas*, a) *Nube dispersa de puntos*, b) *Nube densa de puntos*, c) *Malla* y d) *Texturizado*. Elaboración propia..... 108

Figura 88. *Ortofotos de planta y fachadas, puente Pargas*. Elaboración propia. 109

Figura 89. a) *Fachada principal*, b) *detalle por debajo de puente*, c) *croquis arquitectónico* y d) *croquis de localización del puente Pargas*. Elaboración propia..... 110

Figura 90. *Nivel de confiabilidad en la nube densa de puntos, puente San Ignacio*. Elaboración propia..... 114

Figura 91. *Detalle de huecos en modelo 3D, puente San Ignacio*. Elaboración propia. 114

Figura 92. *Nivel de confiabilidad en la nube densa de puntos, puente Blanco*. Elaboración propia..... 115

Figura 93. *Detalle de arco en la estimación de confiabilidad de puntos de la nube densa, puente Blanco*. Elaboración propia..... 115

Figura 94. *Detalle de hueco en modelo 3D, puente Blanco*. Elaboración propia. 116

Figura 95. *Nivel de confiabilidad en la densa nube de puntos*. Elaboración propia. 117

Figura 96. *Detalle en cambio de temperatura en textura del modelo 3D, puente CECyTEA*. Elaboración propia..... 117

Figura 97. *Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente El Tule*. Elaboración propia..... 118

Figura 98. *Detalle de color de temperatura en la parte inferior de una de las bóvedas*. Elaboración propia..... 118

Figura 99. *Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente Tepezalilla*. Elaboración propia..... 119

Figura 100. *Detalle de hueco en modelo 3D, puente Tepezalilla*. Elaboración propia. 119

Figura 101. *Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente Peñuelas.*

Elaboración propia.....120

Figura 102. *Detalle de huecos en modelo 3D, puente Peñuelas.* Elaboración propia..121

Figura 103. *Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente Pargas.*

Elaboración propia.....122



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Especificaciones del Láser Escáner 3D Leica HDS3000</i> (Mañana-Borrazás et al., 2009).	34
Tabla 2. <i>Comparación en proceso de mapeo con ambas técnicas</i> (Sánchez, 2021).	38
Tabla 3. <i>Resumen de la evaluación y discusión</i> (Kingsland, 2020).	46
Tabla 4. <i>Tipos de Patrimonio</i> (Narváez, 2016).	51
Tabla 5. <i>Operacionalización de variables.</i> Elaboración propia.....	64
Tabla 6. <i>Puentes catalogados como patrimoniales en el Estado de Aguascalientes.</i> Elaboración propia.....	67
Tabla 7. <i>Herramientas y equipos.</i> Elaboración propia.	70
Tabla 8. <i>Escalas tradicionalmente empleadas en la representación de conjuntos históricos.</i> (Melón, 2006).....	71
Tabla 9. <i>GSD en función de la escala</i> (Molina et al., 2021).	71
Tabla 10. <i>Especificaciones de las cámaras utilizadas.</i> Elaboración propia.....	72
Tabla 11. <i>Medición con el empleo de diferentes equipos, en uno de los arcos del puente San Ignacio.</i> Elaboración propia.	79
Tabla 12. <i>Muestra de los puentes patrimoniales en el Estado de Aguascalientes.</i> Elaboración propia.....	89
Tabla 13. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente San Ignacio.</i> Elaboración propia.	91
Tabla 14. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente Blanco.</i> Elaboración propia.	94
Tabla 15. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente CECyTEA.</i> Elaboración propia.	97
Tabla 16. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente El Tule.</i> Elaboración propia.	100
Tabla 17. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente Tepezalilla.</i> Elaboración propia.	103
Tabla 18. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente Peñuelas.</i> Elaboración propia.	106
Tabla 19. <i>Valores y tiempos en post procesamiento, puente Pargas.</i> Elaboración propia.	109
Tabla 20. <i>Tiempos en el post procesamiento total.</i> Elaboración propia.	112

Tabla 21. *Efectividad (%) entre la captura de fotografías y la orientación de estas.*

Elaboración propia.....112

Tabla 22. *Puentes patrimoniales los cuales no se recreó su modelo 3D.* Elaboración

propia.126



ACRÓNIMOS

UAA. Universidad Autónoma de México

INAH. Instituto Nacional de Antropología e Historia

CONACYT. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

ICOMOS. Consejo Internacional de Monumentos y Sitios

GSD. Ground Sampling Distance o Distancia de muestreo del terreno (suelo)

UAV. Unmanned Aerial Vehicle o Vehículo Aéreo No Tripulado

LiDAR. Light Detection and Ranging o Detección de Luz y Alcance

SfM. Structure from Motion o Estructura del Movimiento

MVS. Multi View Stereo o Estéreo con Múltiples Vistas

IBM. Image BAsed Modeling o Modelo basado en imágenes

RPAS. Remotly Piloted Aircraft System o Sistema de Aeronaves Tripuladas por Control Remoto.

Msnm. Metros sobre el nivel del mar

GPS. Global Positioning System o Sistema de Posicionamiento Global

RESUMEN

Hoy en día, la aplicación de tecnologías y técnicas avanzadas se convierte imprescindible en la intervención para la conservación y restauración del patrimonio edificado. La fotogrametría aérea como técnica para la recreación de la configuración espacial de los inmuebles históricos se vuelve ventajosa en costos, en contraste a otras técnicas o tipos de levantamientos para la obtención de la información métrica y geométrica de dichos conjuntos arquitectónicos. El presente trabajo de carácter práctico desarrolla una metodología práctica y de bajo costo a través de la exhaustiva investigación del estado del conocimiento tomando como referencia las recomendaciones y conclusiones de los diferentes autores donde dieron uso a la aplicación de la fotogrametría con buenos resultados, donde el objetivo es la recreación de la configuración espacial del patrimonio edificado en el Estado de Aguascalientes con alta confiabilidad en los modelos tridimensionales generados, ya que hoy en día se tiene escasa, desactualizada o nula información documentada de los inmuebles. De tal forma que, se logra generar 7 modelos 3D de los puentes catalogados como patrimoniales en el Estado de Aguascalientes, y a través de estos modelos se extrae información para el registro y documentación en la página oficial del INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia) de los inmuebles históricos, sirviendo como información previa a casos de estudios futuros para la investigación, conservación y restauración, como también, para la divulgación a las próximas generaciones.

Palabras clave: Fotogrametría aérea, dron, patrimonio edificado, levantamientos, modelado 3D, documentación gráfica.

ABSTRACT

In today's day and age, the application of technology and advance techniques are of utmost necessity for the preservation and restoration of our physically constructed patrimony entities. Aerial photogrammetry techniques implemented in the recreation and spatial configuration of historic buildings has become monetarily advantageous in contrast to other techniques used to obtain metric and geometric information of such architectural complexes. The work being presented here has developed a practical and economically way to recreate the spatial reconfiguration of culturally important edifices in the state of Aguascalientes through high-quality three-dimensional models that are highly reliable given that these buildings have poor, minimal, or inadequate information when it comes to their modeling. These aerial-photogrammetry techniques have been studied by various authors, and their research has been taken into account considering that they have showed quite promising results with their work. With that been said, it has possible to achieve seven three-dimensional models of bridges that have been catalogued as cultural patrimony in the state of Aguascalientes. Thanks to these models it has been possible to register and document information of the aforementioned architectural structures in the official page of the Instituto Nacional de Antropología e Historia. Thus, providing a means of information should these structures were to be studied for research, conservation and restoration, as well as promoting information for the future generations.

Keywords: Aerial photogrammetry, UAV, heritage building, surveys, 3D modeling, documentation.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Prólogo

Los edificios patrimoniales o centros históricos que se ubican alrededor de las diferentes ciudades de todo el mundo han marcado una historia y legado del mismo lugar. Cada uno de ellos es característico de la región. Estos lugares han sido protegidos en diferentes aspectos a través del tiempo, reconociéndolos como un emblema que identifica al lugar. A la vez, estas edificaciones han servido hasta la fecha como sitios donde la gente los ha utilizado como centros académicos, centros turísticos, inclusive como sede de algún mandato de gobierno.

En el caso particular del Estado de Aguascalientes, cuenta con su propia edificación patrimonial, por mencionar algunos: Casa de la Cultura, Templo del Santuario de Nuestra Señora de Guadalupe, Templo de la Merced, Puente del Antiguo camino a San Ignacio, Museo de la Insurgencia, etc., donde esta edificación y la demás que se encuentra en el Estado de Aguascalientes, son objeto directo del desgaste o deterioro que han sufrido a través del tiempo por causas, ya sean ambientales que, pudiéramos mencionarlas como naturales; como lo pueden ser efectos de erosión por viento, meteorización química, presencia de humedad, fallas geológicas, etc., pero también, han sido afectadas por las diferentes actividades antropogénicas que, en otras palabras, ha sido por la interacción directa o indirecta del hombre con la edificación patrimonial.

Por estas razones, ha sido importante la elaboración de diferentes planes de diseño, restauración y conservación de los edificios patrimoniales que hayan sufrido algún daño, y con ello eliminar todo peligro y riesgo a los que estaría sometida las personas que se encuentren en el sitio, sin dejar a un lado la conservación, preservación del edificio como emblema cultural de la región. Para ello, se tiene la necesidad de hacer estudios previos a las edificaciones, para poder implementar una estrategia de las acciones que se llevarán a cabo. Uno de los estudios preliminares necesarios es la obtención de la geometría o configuración espacial. Es necesario tener una localización tridimensional de las áreas o zonas afectadas del edificio, como también, una descripción de los materiales del que está construido, las texturas, acabados, colores.

Aquí es donde entra este trabajo práctico a realizar que, es la aplicación de la fotogrametría aérea a corto rango con el apoyo de dispositivos aéreos no tripulados para

la obtención de diversas fotos, capturadas en diferentes posiciones, ángulos y de difícil acceso, para posteriormente procesar esta información digital en un software especializado y obtener como producto un modelado tridimensional del edificio patrimonial en cuestión, y así poder tener la configuración espacial que es necesaria como estudio y análisis previo a otros casos de estudio o de planificación para determinado propósito. De tal forma que se pueda emplear una metodología práctica de llevar a cabo y que a la vez arroje resultados confiables.

1.2. Objetivo General

Elaborar y documentar un catálogo digital con modelos 3D de los edificios patrimoniales del Estado de Aguascalientes, aplicando la técnica de la fotogrametría aérea a corto rango a través de un dispositivo aéreo a control remoto mediante una metodología práctica y de bajo costo, para que sirva como análisis previo a cualquier caso de estudio o planificación de interés, así como también para su registro y documentación.

1.3. Objetivos Particulares

- A. Documentar las distintas metodologías empleadas para la creación de modelos tridimensionales en edificaciones de carácter patrimonial, detectando trabajos similares con buenos resultados en su aplicación.
- B. Seleccionar una muestra en conjunto con las dependencias responsables del área, tomando como caso de estudio algunos de los edificios que se encuentren catalogados como patrimonio por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) del Estado de Aguascalientes.
- C. Implementar las metodologías más prácticas y eficaces para el desarrollo de los levantamientos fotogramétricos, haciendo el levantamiento *in situ* con el apoyo de un dron que tenga el aditamento de una cámara fotográfica de buenas especificaciones.
- D. Realizar el procesamiento de las fotografías digitales recabadas, mediante un software especializado en la generación de modelos tridimensionales y determinando la confiabilidad de los resultados para aceptar o descartar la metodología de trabajo.
- E. Si los resultados son confiables, documentar en un catálogo la información obtenida para que pueda ser de acceso libre al público en general o a los especialistas en el área.

1.4. Alcances

- A. La selección de las muestras se va a delimitar a los puentes patrimoniales catalogados por el INAH y, además, se realizará otro filtro de selección según la factibilidad de operación y trabajo en campo que se pueda llevar a cabo en el lugar, como lo pueden ser obstrucciones físicas para la obtención de la información digital, complejidad del puente, permisos tanto de las autoridades competentes como dueños de los inmuebles, etc.
- B. Llevar a cabo una capacitación para la operación de drones, como de sus restricciones de operación y permisos, para poder realizar a cabo el levantamiento fotogramétrico.
- C. Tener una capacitación para la utilización del programa *Agisoft Metashape* para el procesamiento de la información digital obtenida a través de las fotografías, determinación de la confiabilidad del modelo 3D, y la exportación en sus diversos formatos para su edición.
- D. Si los resultados muestran confiabilidad aceptable, se va a proceder a la documentación gráfica de la información para elaborar un catálogo digital de los puentes patrimoniales del Estado de Aguascalientes.

1.5. Justificación

La conservación y restauración de los edificios patrimoniales es un caso de gran importancia, y en gran parte de los casos es un proceso laborioso y complicado por la complejidad que pueda presentar la envergadura del edificio, además, lo vuelve aún más difícil la incertidumbre del estado actual del inmueble, respecto a la seguridad e integridad física del mismo, al igual que evitar el mayor deterioro de sus materiales tras su intervención.

“El conocimiento sobre el patrimonio cultural y arqueológico puede disolverse o incluso desaparecer con el paso del tiempo” (Carvajal Ramírez et al., 2019).

El desgaste del patrimonio edificado se ha vuelto un problema crítico en las diversas regiones donde se encuentran, y su diagnóstico del deterioro en masa son puntos primordiales para la planificación de las acciones a tomar de la conservación y restauración (Jalón et al., 2021).

El patrimonio edificado son inmuebles históricos de gran dificultad para la recreación de un modelo digital tridimensional. Los avances en la elaboración de estos modelos tridimensionales son de gran ayuda para sus estudios de conservación y restauración, que si fuese de una manera más tradicional tomaría mucho tiempo y esfuerzo la adquisición de información del inmueble (Picon-Cabrera et al., 2021).

Los avances constantes de nuevas técnicas y métodos de trabajo para el registro, conservación y presentación de la configuración espacial de sitios patrimoniales aportan de manera significativa al campo de la investigación (Remondino, 2011).

Por ello, la finalidad de este trabajo práctico a realizar es la documentación gráfica de un catálogo con los modelos 3D e información de las características métricas de los edificios patrimoniales en cuestión. La técnica por emplear es mediante la fotogrametría aérea de corto rango con dispositivos aéreos manipulados vía control remoto, y con el apoyo de más equipo, como lo puede ser una cámara fotográfica semi profesional, distanciómetro, estación total, cinta.

La técnica de fotogrametría aérea a corto rango es de gran utilidad bajo su sistema de operación y trabajo al fijar un orden a la adquisición de fotografías, puntos de control y un orden de seguimiento (Vizcaíno Hernández, 2018).

El empleo de un equipo aéreo no tripulado volando a una altura baja con la adición de una cámara fotográfica de buena resolución, permite la generación de una nube densa de puntos a través de las imágenes capturadas y recrear una geometría tridimensional de los sitios (Jankauskienė et al., 2020).

Además, esta técnica es una forma sencilla y de bajo costo contrastándolo con otros sistemas de obtención y procesamiento de información, a través de imágenes digitales.

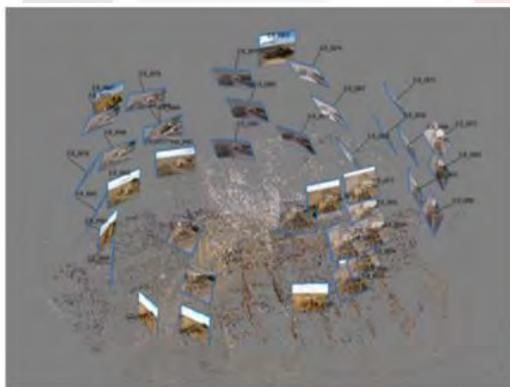
Los sistemas aéreos no tripulados son bien conocidos como flexibles y sistemas de bajo costo que proporcionan un amplio acceso para la fotogrametría. Asimismo, los elementos patrimoniales se podrán conservar mejor con un dibujo de la construcción actualizado completo (Desa et al., 2021).

La determinación de materiales y procesos constructivos del inmueble histórico, se vuelven puntos importantes y de entrada para la documentación gráfica, esto como acción para proteger y guardar el valor cultural del mismo (Martínez-Carricondo et al., 2021).

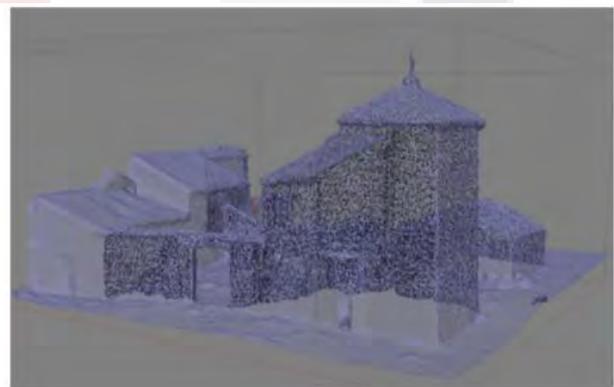


Figura 1. Nube densa de puntos exportada de Agisoft Metashape a Autodesk Revit (Martínez-Carricondo et al., 2021).

Hoy en día, es necesario y útil la aplicación de tecnología avanzada para la recreación de modelos de edificios antiguos. Ahora se requieren técnicas de visión por computadora en 3D para la reconstrucción virtual de antiguos edificios y monumentos en entornos urbanos (Castilla et al., 2021).



(a)



(b)

Figura 2. a) Proceso de alineación de cámaras y b) Creación de nube de puntos (Castilla et al., 2021).

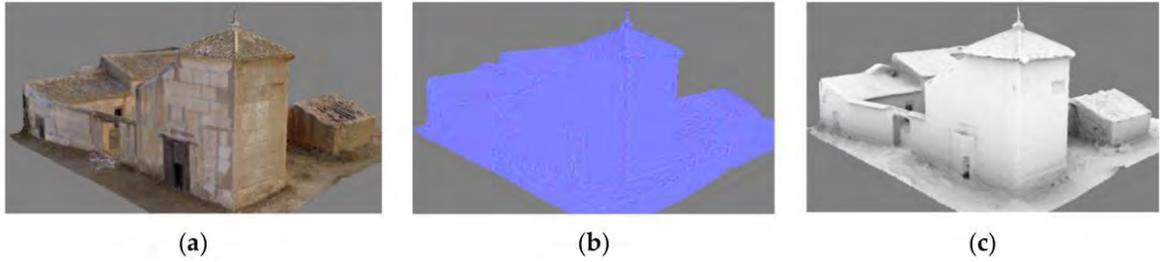


Figura 3. a) Modelo RGB, b) Modelo normal texturizado, c) Modelo de oclusión texturizada (Castilla et al., 2021).

La aplicación de la fotogrametría es de gran ayuda para la obtención de la geometría, procesamiento y creación de modelos tridimensionales en contraste a otras técnicas, hablando de aspectos de costos y operación, en peculiar en los estudios y análisis de conjuntos arquitectónicos de carácter patrimonial.

El empleo de la técnica de la fotogrametría como opción para la generación de modelos geométricos tridimensionales de componentes, zonas y partes de los inmuebles patrimoniales, ayudará a que la gente pueda llevar a cabo este trabajo en campo con una capacitación sencilla, teniendo como resultado modelos con alta confiabilidad en sus resultados y de bajo costo (Díaz Zeledón, 2018).



Figura 4. Proceso fotogramétrico (nube de puntos dispersos, nube densa, malla, texturizado) (Díaz Zeledón, 2018).

Es importante tener en cuenta factores como la configuración espacial, medidas métricas, patologías, materiales empleados, procesos constructivos, para realizar una intervención en el edificio histórico de una manera más eficaz y eficiente, en el sentido de una mejor planificación para no afectar más al edificio en su proceso de restauración, como también, minimizar costos y optimizar tiempos en las etapas de ejecución.

El desconocimiento de estos factores, o su nula consideración a la hora de proyectar cualquier intervención, puede implicar la pérdida de algunos elementos de valor, o el propio valor intrínseco de partes del edificio, pudiendo provocar una desconexión histórica de la construcción, con la toma de decisiones inadecuadas. (Maza et al., 2012)

Las aplicaciones de la fotogrametría han manifestado ser de gran ayuda para el área de arquitectura, y con ello el registro y documentación de esta disciplina (Calero-Castillo et al., 2020).

El estudio de un modelo tridimensional permite observar, diferenciar y analizar la configuración espacial de inmuebles de carácter patrimonial que, de no ser así, solo quedaría registrado en complejos escritos del conjunto arquitectónico (López Jobacho & Cortés Albalá, 2016).

La información digital o gráfica del conjunto arquitectónico debe quedar registrado en los resultados obtenidos de las investigaciones, y con ello, ser de manera comprensible según el tipo de caso de estudio que se lleve a cabo. (Bermúdez et al., citado en Melón, 2006).

El incremento de actividades y trabajos de conservación e investigación del patrimonio cultural hace evidente el consumo en recursos y tiempo para el registro de su representación, medidas, catálogo e inventario, para que de esta manera puedan ser preservados, analizados y transmitidos a las siguientes generaciones (Melón, 2006).

Tener la oportunidad de tener la tecnología para la recreación digital de un modelo tridimensional del patrimonio edificado, otorga la información necesaria para el proceso de su documentación gráfica del inmueble, conservación y difusión (Gil-Melitón & Lerma, 2019).

En estos días, la información 3D son puntos críticos para salvaguardar de forma permanente la importancia de los objetos y sitios, al menos de manera digital, los cuales podrán ser transmitidos a futuras generaciones. Esto ha generado en años recientes el aumento de los casos de estudios, en particular los investigadores en el área, quienes han generado modelos tridimensionales completos y de alta calidad. Las metodologías para el proceso de creación de modelos tridimensionales y su registro, han resultado de gran ayuda para la documentación histórica de estos sitios, y conservación digital (Remondino, 2011).

Para una mayor eficiencia en la optimización de recursos y tiempo para la conservación y preservación del patrimonio edificado, mayor tendrá que ser la confiabilidad y calidad de la información digital que se documente (Narváez, 2016).

Siendo así, la importancia que debe de tener las reconstrucciones gráficas o visuales, ejecutadas según el especialista en el área, para obtener un estudio detallado de toda la información que se pueda recabar, como información arqueológica, histórica, fotografías, arquitectónica, las cuales éstas deben registrarse para su documentación de forma precisa y clara, y con ello, facilitar los trabajos de conservación y restauración en medida de lo posible (ICOMOS, 2008).

1.6. Hipótesis

La información adquirida mediante la técnica de fotogrametría aérea de corto rango aplicada a los puentes patrimoniales del Estado de Aguascalientes a través de una metodología práctica y de bajo costo, será de gran ayuda para el registro y documentación de un catálogo digital con los modelos tridimensionales, que sirva como base a casos de estudios futuros, así como para la preservación, planificación e investigación, obteniendo información eficaz y confiable.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”



2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Documentación del Patrimonio

El presente artículo describe acerca de los diferentes sistemas tecnológicos y metodológicos para la documentación sobre el patrimonio cultural en el continente europeo, con más énfasis en España. Donde se redacta que a través del tiempo han ido evolucionando los medios y herramientas para el registro y difusión de la información de carácter patrimonial, desde el trazo de un dibujo convencional a lápiz y papel hasta la aplicación de técnicas para modelación 3D como lo son los escáneres láser y la fotogrametría. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos aún se presentan problemas para el acceso, gestión y actualización de las bases de datos. Por tales motivos, es imprescindible estandarizar las metodologías empleadas para mejorar el intercambio de información entre los especialistas en el área, como también, el intercambio de información en las diferentes fuentes de datos. Por último, la implementación de las tecnologías más avanzadas en la actualidad para la recreación de la configuración espacial de los bienes patrimoniales a los sistemas de documentación, añaden mucha información gráfica real y con alta confiabilidad en los resultados de la geometría, con la finalidad de llevar a cabo actividades de conservación, restauración y difusión. (Quintilla Castan & Agustín-Hernández, 2023)

Este artículo toma como referencia las herramientas que existen para el registro y documentación del patrimonio a inicios del siglo XIX en la provincia de Alicante, España. Gracias a la desamortización de Mendizábal, se formaron marcos para gestionar el patrimonio cultural, como lo fueron las comisiones Provisionales de Monumentos y Científico Artísticas, los cuales, ayudaron a generar informes para el conocimiento del valor cultural de los bienes patrimoniales. La elaboración del Catálogo Monumental de España ayudó a redactar nuevos capítulos en la documentación del patrimonio histórico. A través de la implementación de herramientas como los croquis arquitectónicos, trazos y fotografías como una manera de registrar la información, aportaron al conocimiento de la integridad física de los bienes patrimoniales a comienzos del siglo, siendo así una nueva forma de documentar el patrimonio cultural. (Olcina Lagos, 2020)

En este trabajo se aplica una metodología para la documentación del patrimonio edificado, en la ciudad de Cuenca, donde a través de la integración de procesos, se pueda

generar de una forma práctica y simple la información que se utiliza para los trabajos de intervenciones patrimoniales, sin menos preciar el antes de su restauración y después de la misma, donde se logre abarcar todo el contexto general de lo que conlleva un proyecto de conservación y restauración de carácter patrimonial. Se analizaron distintas metodologías que se han llevado a cabo para la documentación de información patrimonial. De tal manera que se genera una matriz de necesidades básicas para el registro y documentación de dicha información como se muestra en la figura 5, y un flujo de trabajo para la documentación como se muestra en la figura 6.

1. Ingreso de la información patrimonial			
1.1 Organización del proyecto de documentación	Si Cumple	Cumple Parcialmente	No Cumple
Necesidades del proyecto:			
¿Se plantea objetivos y alcance del proyecto de documentación?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Se prevé futuros usuarios de la información a generar?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reconocimiento del sitio			
¿Existe un reconocimiento previo del sitio?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Consideraciones técnicas			
¿Se especifica el nivel de detalle del proyecto de documentación?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Se especifica los métodos e instrumentos a utilizar?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Revisión organizacional			
¿Posee vínculo con entidad responsable del cuidado patrimonial?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tiempo disponible			
¿Determina un cronograma de actividades?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Determina y cumple una fecha de entrega?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2 Adquisición de la información existente			
¿Se dispone de la información recolectada?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Proceso de la información patrimonial			
2.1 Elaboración del Proyecto de Documentación	Si Cumple	Cumple Parcialmente	No Cumple
¿Se digitalizó la información patrimonial?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Especifique			
CAD <input type="checkbox"/>			
SIG <input type="checkbox"/>			
BIM <input type="checkbox"/>			
¿Se encuentra disponible esta información?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.2 Validación de la información			
¿Se realizó un control de calidad de la información generada?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Salida de la información patrimonial			
3.1 Almacenamiento de la información	Si Cumple	Cumple Parcialmente	No Cumple
¿Existe una base de datos que almacene la información generada?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Es posible acceder a la información almacenada?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Posee una conexión con el sistema de información Municipal?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.2 Utilización de la información			
¿La información es utilizada para el monitoreo y mantenimiento del patrimonio edificado?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 5. Matriz de necesidades básicas de la documentación patrimonial (Narváez, 2016).

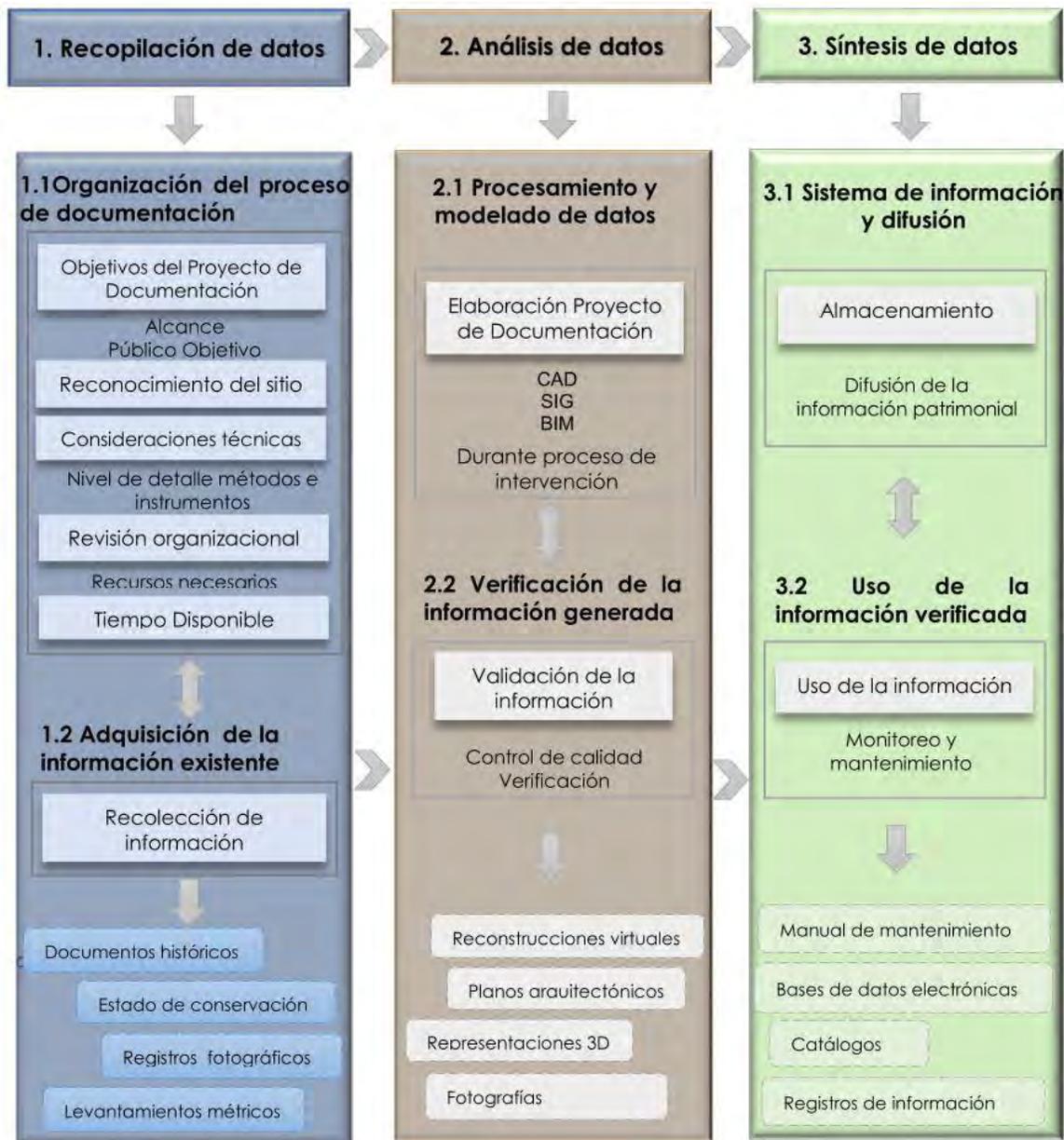


Figura 6. Metodología de documentación para el patrimonio cultural edificado (Narváez, 2016).

De tal manera que se concluye que dicha metodología para la documentación patrimonial se puede aplicar a las edificaciones del Municipio de Cuenca, Ecuador. Se pretende que con la implementación de esta metodología no se pierda información que se genere durante las actividades de conservación y restauración, como también, que misma información responda a lineamientos que ya estén establecidos por las instituciones encargadas a los temas del patrimonio edificado y su conservación, y pueda ser utilizada la información nuevamente (Narváez, 2016).

En la ciudad de Chalchuapa, El Salvador, se pone en riesgo las edificaciones de carácter patrimonial por la llegada de nuevas edificaciones de giro comercial, por lo que genera interés en llevar a cabo una investigación para registrar y catalogar los inmuebles reconocidos con un valor cultural para su respectiva documentación, y con tal suerte, poder crear normas de protección y conservación para la salvaguarda de dichos conjuntos arquitectónicos. En dicho trabajo, se determina la cantidad de inmuebles, su tipología, como también, el área que abarcan los mismos, y a partir de ahí, hacer una caracterización de manera cualitativa para integrar estas edificaciones a un plan de gestión de turismo sostenible (Vladimir G & Centy, 2016).

CUESTIONARIO DE VALORACIÓN DE BIENES INMUEBLES			
1. Ubicación del inmueble			
2. ¿Cuál es el tipo de régimen de propiedad del inmueble?			
a. Propietario	b. Alquiler	Concesión	
3. ¿Sabía usted que su vivienda está dentro del radio de Centro Histórico de la Ciudad de Chalchuapa?			
a. Sí	b. No		
4. ¿Sabía usted que su vivienda tiene algún valor de Bien Cultural patrimonial?			
a. Sí	b. No		
5. ¿Qué tipo de valor cultural cree que tiene su inmueble?			
a. Antigüedad	b. Elementos arquitectónicos representativos	c. Representar un estilo arquitectónico	d. Ser un hito arquitectónico
6. ¿Ha realizado algún tipo de construcción, remodelación o intervención al inmueble en los últimos 5 años?			
a. Sí	b. No		
7. ¿Producto de esa intervención SECULTURA realizó algún tipo de regulación?			
a. Sí	b. No		
8. ¿Cómo calificaría la regulación de SECULTURA?			
a. Útil y técnica	b. Demasiado tiempo de resolución	c. Innecesaria	d. Ignore a SECULTURA
9. ¿Producto de esa intervención la Unidad de Ingeniería de la Alcaldía realizó algún tipo de regulación?			
a. Sí	b. No		
10. ¿Cómo calificaría la regulación de La Unidad de Ingeniería de la Alcaldía?			
e. Útil y técnica	f. Demasiado tiempo de resolución	g. Innecesaria	h. Ignore a la alcaldía

Figura 7. Cuestionario de preguntas cerradas con la finalidad de analizar la percepción de los habitantes de la zona seleccionada (Vladimir G & Centy, 2016)

La investigación realizada al monumento a Francisco de Paula Valladar y Serano, en Granada, tuvo como finalidad la documentación del monumento, y para realizar dicho proceso fue necesario requerir a la ubicación geográfica, conseguir descripciones como lo es las características métricas, materiales de construcción, el contexto cultural del monumento, el valor patrimonial, y el estado físico actual del elemento patrimonial. La metodología que se emplea es documental y fotogramétrica. Los resultados obtenidos determinan que la ubicación en los Jardines de Genil, Granada, coordenadas: latitud 37° 16' 78.31" N y longitud 3° 59' 98.45" E, orientación NE-SO, y sus medidas son 232cm por 76cm por 76cm. La escultura es un estilo figurativo, y de valor considerable en cuestiones patrimoniales. También, el estado físico se determina como regular y con necesidad de mantenimiento preventivo. Esta documentación aporta al valor cultural y a la actualización del patrimonio de la ciudad (Bellido-Márquez, 2020).

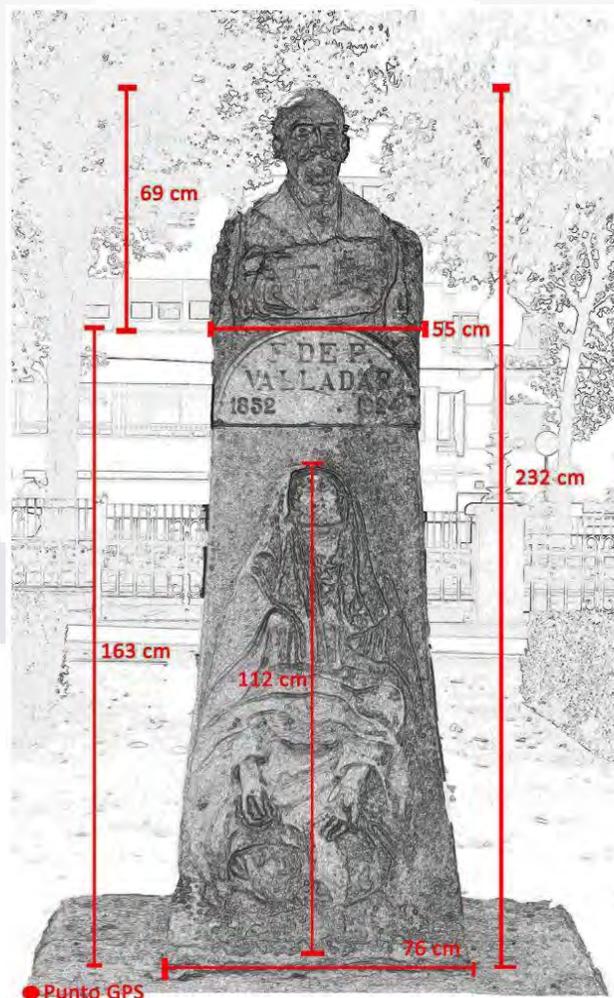


Figura 8. Croquis del Monumento a Francisco de Paula Valladar de Jospe Ma. Palma Velasco, 1928 (Bellido-Márquez, 2020).

2.2. Metodologías para la caracterización geométrica de edificios patrimoniales

2.2.1. Levantamientos topográficos

El trabajo que se implementa en el proyecto La Blanca, en Melchor de Mencos, Guatemala, trata de unificar las actividades de intervención arqueológica con las actuaciones de interés social, para fortalecer los vínculos entre los conocimientos y valores del patrimonio cultural, haciendo énfasis en su conservación. De tal manera, se lleva a cabo trabajos de mediciones, en este particular caso levantamientos topográficos, donde, la primera intención es obtener una planimetría del lugar lo más exacta y precisa posible, para poder discernir el tipo de edificaciones existentes en el lugar y su contexto histórico y constructivo, además de su posterior documentación gráfica que reúna toda la información arquitectónica del sitio. Se logra trazar la topografía geo-referenciada a un sistema de coordenadas de Guatemala, con su respectiva altimetría, teniendo una diferencia de 50cm de altura entre cada curva de nivel. Como objetivo se define los trazos de la planta general y alzados del conjunto de la Acrópolis, perfectamente alineados a los planos topográficos anteriormente generados, donde sirven como base para el análisis a las características del entorno del lugar.

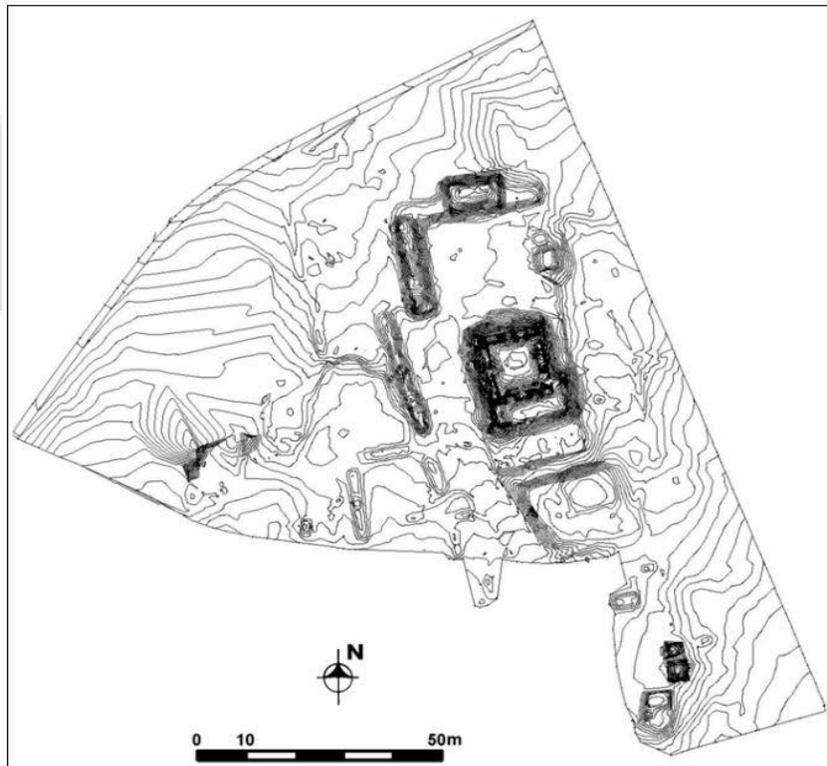


Figura 9. Plano de modelado del terreno del proyecto La Blanca (Sender Contell et al., 2005).

El caso de estudio de las ruinas *Torre del Ballerino*, es una comparación entre dos técnicas, el levantamiento topográfico tradicional y la técnica de la fotogrametría a corto rango, donde para la fotogrametría se utiliza una cámara fotográfica *Canon EOS 5D Mark II* sensor 36x34mm, donde en el particular caso se tomaron 37 imágenes a una distancia de 7 metros del objeto arqueológico y una separación entre cada punto de 1m, comenzando de abajo hacia arriba con una altura primero de 0.60m, después 3m y por último 5m. La información se procesa con el software *Agisoft Photoscan*, por lo que se obtiene un modelado tridimensional, y donde se compara mediciones con el levantamiento tradicional en el cual se emplea con una estación total, obteniendo resultados con un error promedio de 0.044256m, esto debido al alineamiento y falta de capturas del objeto. Las conclusiones son que para la obtención de las medidas métricas es mejor el levantamiento tradicional, sin embargo, para el análisis de la superficie del monumento a través del modelado basado en imágenes es mejor la técnica fotogramétrica que, en adición, aportaría a la documentación digital, a la conservación y restauración de los diferentes conjuntos arquitectónicos, añadiendo, que la combinación de estas técnicas optimiza costos, tiempo, calidad y precisión. (Giuliano, 2014).

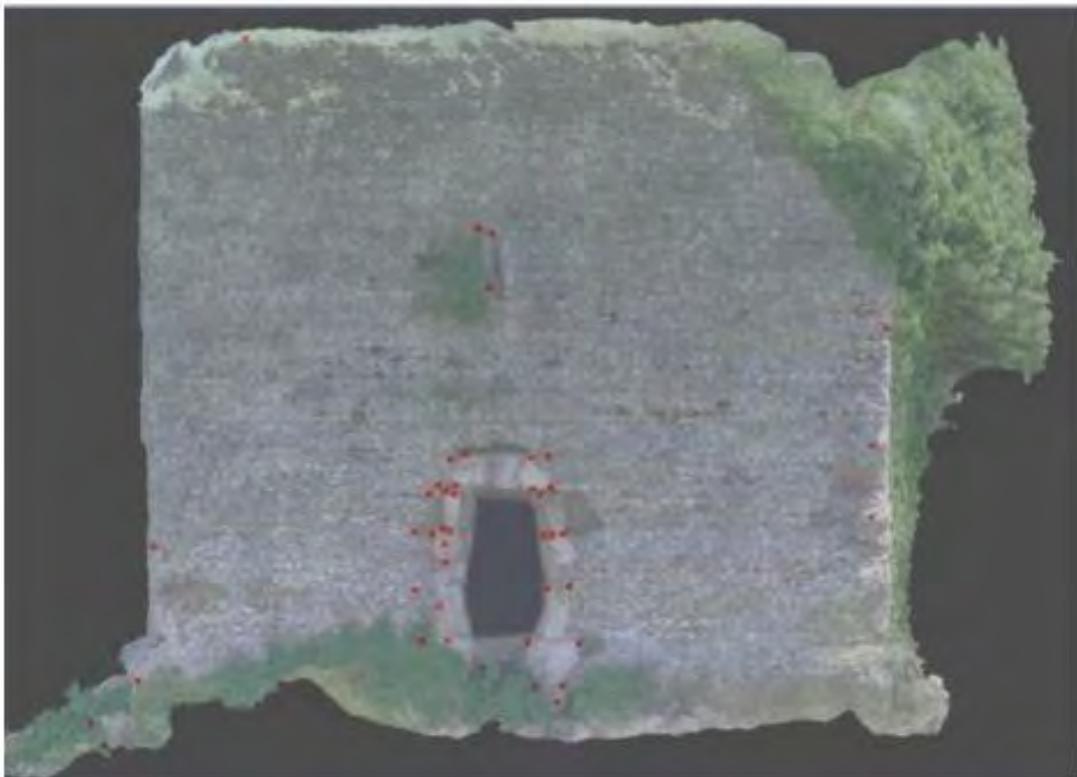


Figura 10. Comparación entre el levantamiento tradicional y el fotogramétrico (Giuliano, 2014).

2.2.2. Levantamientos LiDAR o escáner láser

Un caso particular de estudio es del área de los montículos de Medvėgalis, Lituania. En este estudio utilizan drones a corta distancia junto con técnicas fotogramétricas y de escaneo, que les permite recolectar imágenes con alta resolución para generar una nube de puntos y simular datos geospaciales del relieve o superficie. Estas técnicas empleadas permitieron la reconstrucción de la topografía de la superficie, la observación de la infraestructura recreativa, la obtención de información geográfica para los usuarios que están involucrados en la conservación de un objeto patrimonial. Los resultados del procesamiento de imágenes muestran una buena precisión del modelo de la superficie creada, donde se utiliza fotogrametría aérea con un dron. El escaneo por LiDAR (*Light Detection and Ranging*) a baja altitud es aconsejable, donde la representación del relieve se obtuvo con una precisión media de 0.050m. Se requiere especificar la distancia de muestra apropiada (*GSD, Ground Sampling Distance*, por sus siglas en inglés) para optimizar tiempo y reducir el número de imágenes capturadas. El *GSD* está en función del tamaño de los pixeles, la distancia de la cámara al objeto o altitud del vuelo a la superficie, y el parámetro de la distancia focal de la cámara. (Jankauskienė et al., 2020).



Figura 11. UAV con cámara equipada y láser escáner (Jankauskienė et al., 2020).

En el trabajo para la documentación geométrica de elementos patrimoniales en Galicia, España, se muestra la utilización de la técnica de escáner láser para la modelación 3D de los elementos patrimoniales. Donde se evalúan las posibilidades para el registro de la información, así como las problemáticas que se presentan con dicho método de adquisición de información tridimensional. Se emplea un equipo Leica HDS3000 para dicho trabajo con las siguientes especificaciones como se muestra en la tabla 2. De los resultados obtenidos de los diferentes ejercicios llevados a cabo se concluye que la vegetación sigue siendo un problema para la obtención de información por la interferencia entre el equipo y el objeto de estudio. Por otro lado, los trabajos llevados a cabo en edificaciones muestran resultados confiables, aunque según el número de pisos y envergadura del edificio, complicaría el proceso de adquisición de información, alargando más el tiempo de campo y gabinete. Se discute que el empleo de esta técnica no siempre es la mejor solución para el modelamiento tridimensional del patrimonio edificado o sitios arqueológicos, por los altos costos que implica el empleo de esta técnica, sino lo ideal, sería el empleo combinado con otras técnicas como lo pueden ser los levantamientos topográficos tradicionales o los levantamientos fotogramétricos, mejorando la capacidad de generar la información digital y su posterior registro y documentación (Mañana-Borrazás et al., 2009).

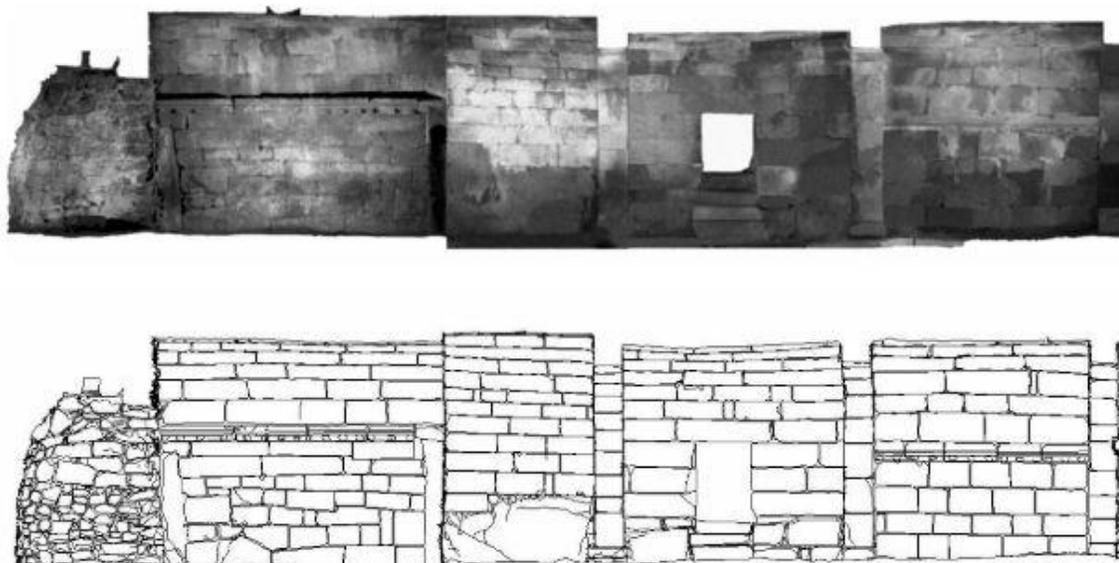


Figura 12. Alzado de la nube de puntos Forno de la nube de puntos (arriba), y dibujo en AutoCAD (abajo)

(Mañana-Borrazás et al., 2009).

Tabla 1. *Especificaciones del Láser Escáner 3D Leica HDS3000* (Mañana-Borrazás et al., 2009).

Especificaciones generales del equipo	
Tipo de instrumento	Láser escáner de impulsos de alta velocidad, con precisión, alcance y campo visual topográfico completo, con cámara digital integrada de alta resolución
Campo de visión	360° Horizontal x 270° Vertical
Clase láser	3R (IEC 60825-1), color verde, visible
Precisión de superficie modelada / ruido	2mm, 1
Alcance	300m @ 90%; 134m @ 18% albedo
Velocidad de escaneo	Hasta 4,00 puntos/seg, velocidad máxima instantánea
Resolución de escaneo	Tamaño del punto: 6mm desde 0-50m Espaciamiento entre puntos: Selección horizontal y vertical; 1.2mm mínimo cubriendo todo el alcance Densidad máxima de muestra: 1.2mm

El proyecto para la documentación 3D para la conservación histórica del castillo Priego de Córdoba, pone en evidencia la importancia de la combinación de técnicas para la digitalización tridimensional, como lo son los escáneres láser terrestre y la fotogrametría, de tal manera para así lograr concientizar a la sociedad de la importancia del valor patrimonial edificado. Resulta que la aplicación de la fotogrametría es la opción más económica para modelar las 3 estructuras que componen el conjunto arquitectónico, sin embargo, para el modelamiento del interior del inmueble se tiene que inclinar por el uso del láser escáner terrestre. La fusión de las 2 técnicas para el modelado 3D muestra congruencias en la configuración espacial creada y, por otro lado, no presenta de igual manera la homogeneidad visual. Por lo tanto, el empleo de el escáner láser terrestre sirve para la creación de la nube densa de puntos como base de información, donde la fotogrametría sirve para mejorar la calidad en la resolución gráfica (García-Molina et al., 2021).

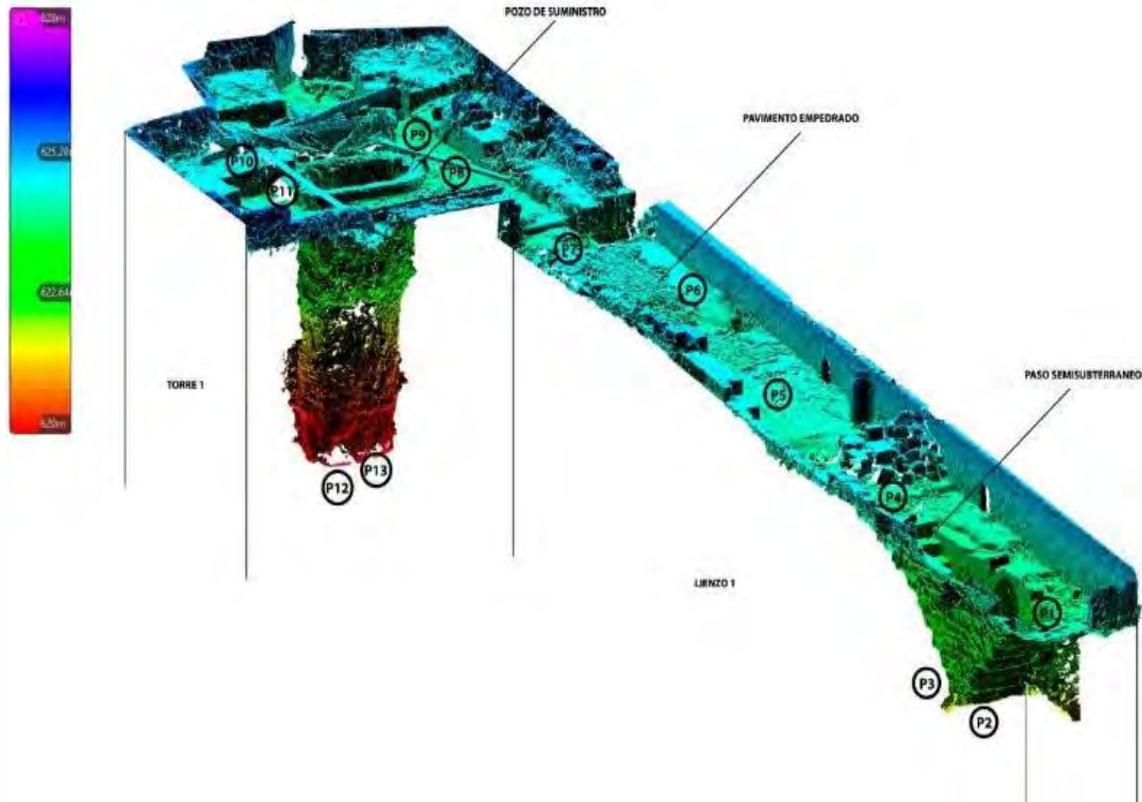


Figura 13. Nube de puntos densa desde el software ReCap, zona superior del Lienzo y la Torre del castillo de Priego de Córdoba (García-Molina et al., 2021).

2.2.3. Levantamientos fotogramétricos

La documentación de los patrimonios se vuelve importante, puesto que, la información que se tenga del patrimonio es de gran ayuda para las diferentes acciones que se necesitan realizar, como pueden ser de conservación y restauración. Además, es agregar más valor cultural e historia de la ciudad en donde se encuentre el patrimonio edificado.

Una forma de hacer frente a este tipo de problemas en el registro y documentación del patrimonio edificado es en la utilización de tecnologías y técnicas fotogramétricas para la creación de modelos tridimensionales, que posteriormente, son usados como fuente de información previa a la conservación y valorización, gracias a la interoperabilidad con esta información virtual (León Lescano et al., 2020).

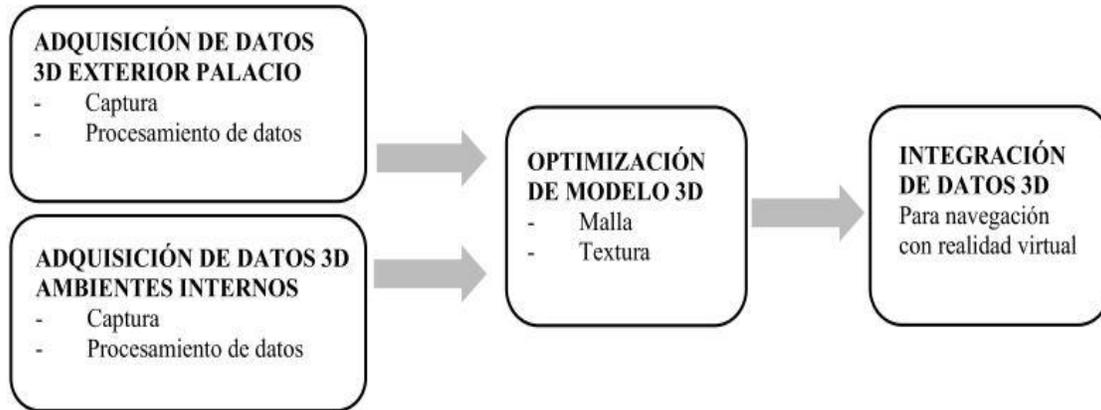


Figura 14. *Proceso de virtualización del patrimonio cultural* (León Lescano et al., 2020).

Se presenta un caso real en un edificio histórico en Granada, España, en particular en el Monasterio de San Jerónimo, donde se hace la propuesta de una metodología para evaluar y predecir la pérdida de superficie de los edificios históricos. El método se basa en un enfoque bayesiano probabilístico, para poder detectar el patrón de pérdida superficial más adecuado, utilizando información recabada a través de fotogrametría digital. Los resultados demuestran eficiencia en la metodología aplicada para la identificación de pérdida superficial (Jalón et al., 2021).



Figura 15. *Representación fotogramétrica de nube de puntos del contrafuerte, monasterio de San Jerónimo* (Jalón et al., 2021).

En este trabajo el autor propone una metodología para el desarrollo y evaluó de técnicas fotogramétricas para el mapeo de patologías en elementos patrimoniales, donde busca optimizar recursos, utilizando como técnica la fotogrametría a corto rango para poder realizar un levantamiento fotogramétrico del sitio o elemento y posterior a ello hacer el mapeo. Se utilizan equipos como son cámaras fotográficas para reducir los costos de operación para así poder evaluar y determinar la eficiencia y eficacia de la metodología de trabajo. Los resultados arrojan un 90% de la forma geométrica del monumento *Benito Juárez*, pudiendo así analizar la zonas desgastadas o piezas faltantes de los materiales que la componen, para de esta manera ir describiendo las patologías del monumento, sin embargo, el 10% recae en la parte superior del monumento, zona que no se pude recrear su modelado tridimensional por falta de información digital. En la cuestión de reducir los costos de operación, trabajar con información digital, disminuye el tiempo de trabajo del hombre, pero en contraste, aumentan los recursos por los equipos que son empleados, como son las cámaras y el equipo de cómputo que debe cumplir especificaciones mínimas para el procesamiento de la información digital que proporcionan las imágenes (Sánchez, 2021). Como se puede observar en la tabla 2, la optimización de tiempo del mapeo con modelado 3D es evidente, pero cabe mencionar, que los tiempos en cada situación dependerán del rendimiento del personal para el caso de mapeo *-in situ-*, y de las especificaciones del equipo con que se cuente para el trabajo del mapeo con modelado 3D.



Figura 16. Caras del monumento Benito Juárez del modelo 3D (Sánchez, 2021).

Tabla 2. Comparación en proceso de mapeo con ambas técnicas (Sánchez, 2021).

Mapeo <i>-in situ-</i>			Mapeo con modelo 3D		
Duración (horas)	Actividad	Recursos	Duración (horas)	Actividad	Recursos
2	Visita al sitio: Identificación de elementos		2	Visita al sitio: Levantamiento fotográfico	-Teléfono móvil con cámara digital -Selfie stick
2	Familiarizarse con área y el objeto de estudio			Trabajo de gabinete:	
6	Iniciar con la caracterización de tipo de roca	-Tabla con clip -Hojas papel bond -Colores -Plumones	1	Selección de fotografías	
24	Iniciar con la identificación de patologías que se observen		0.5	Añadir fotos	-Computadora -Software -Internet
8	Identificación de intensidades		1	Orientar fotografías	
5	Organizar la información obtenida		10	Crear nube de puntos densa	
			1	Crear malla	

En este trabajo se evalúa y calibra técnicas fotogramétricas aplicadas para la caracterización geométrica de elementos patrimoniales, donde se busca realizar un modelo de bajo costo, para examinar de forma cuidadosa las características físicas donde se determina según la escala, el color, geometría, textura, iluminación y píxeles, utilizando parámetros que se puedan modificar. Las propiedades del modelo determinan la iluminación, color y escala, donde se observa que entre más pequeño sea el objeto por investigar, mayor será la precisión en los cálculos del área del mismo. También, se observa que, entre mayor sea la resolución del modelo, será mayor precisión en el cálculo de su área. Con esto, las especificaciones del equipo a emplear, entre mejores especificaciones del equipo, más fiable y precisa es la información que se arrojará después del procesamiento de las fotos en el software utilizado. Con ello, se concluye que, para definir la técnica a emplear para el modelado de objetos, ya sean de baja o alta escala, lo definen parámetros controlables como lo son: número de fotografías, resolución o número de píxeles por pulgada y método de captura, aunque también entran en juego

parámetros no controlables, por ejemplo, iluminación del entorno, colores del objeto y tamaño. (Figuerola, 2016).

2.3. Aplicación de UAV para levantamientos fotogramétricos al patrimonio cultural

En los últimos años, la fotogrametría aérea de corto rango, ha sido una técnica muy práctica y útil, aplicada en la generación de un modelo tridimensional del patrimonio edificado, para la obtención de información de características métricas, patologías, materiales, entre otros.

El siguiente caso de estudio se realiza a un puente de mampostería en el Río Sele, Italia. El objetivo de la investigación es encontrar una metodología para crear modelos 3D de estructuras complejas, y que fuese de manera fácil y rápida. Se usan algoritmos basados en enfoques de estructuras de movimiento (*Structure from Motion, SfM*, por sus siglas en inglés) y de estéreo de vista múltiple (*Multi View Stereo, MVS*, por sus siglas en inglés) donde se utiliza información digital de las imágenes captadas a través de la aplicación de fotogrametría aérea con el apoyo de un dron (*UAV*, por sus siglas en inglés). Una vez que se junta la información, se procesa en un software llamado Rhinoceros junto con el apoyo de herramientas (plug-ins) del mismo programa, para la construcción del modelado 3D. Los resultados muestran que el puente está en una situación pobre de conservación y el estado de deterioración de la superestructura es evidente. El estudio muestra cómo a partir de los análisis 2D y 3D del modelo, es posible obtener mucha información de las causas de deterioración y lesiones en curso como técnicas de procesos constructivos, la función de las componentes de la estructura, la manera en que se emplearon los materiales. De tal forma que, es posible describir el estado del puente y de su conservación de los elementos arquitectónicos que lo conforman (Pepe & Costantino, 2020).

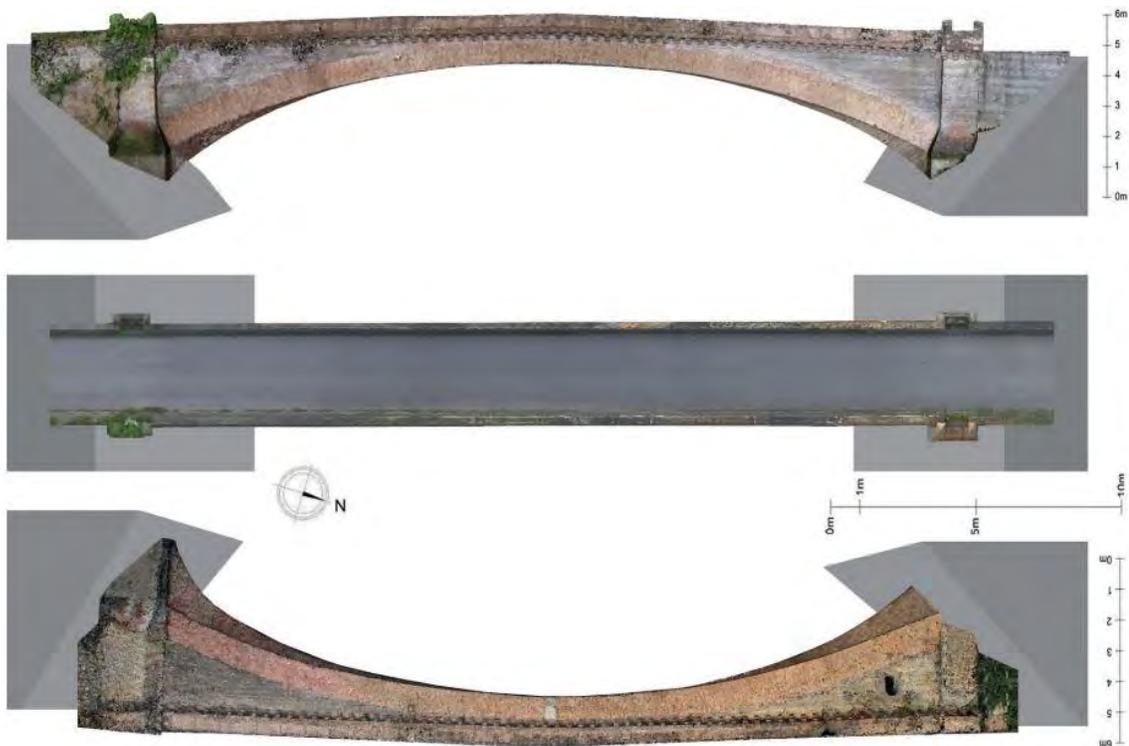


Figura 17. Representación 2D del puente de mampostería Diavolo, en Italia (Pepe & Costantino, 2020).

El empleo de la técnica de la fotogrametría aérea para la creación de modelos tridimensionales fue presupuestado y valorado en el centro histórico de Trento, Italia. Los resultados demuestran que la información obtenida como lo es la altura, área y volumen, juegan un papel valioso para la planificación, diseño y gestión de los edificios patrimoniales de la ciudad (Picon-Cabrera et al., 2021).

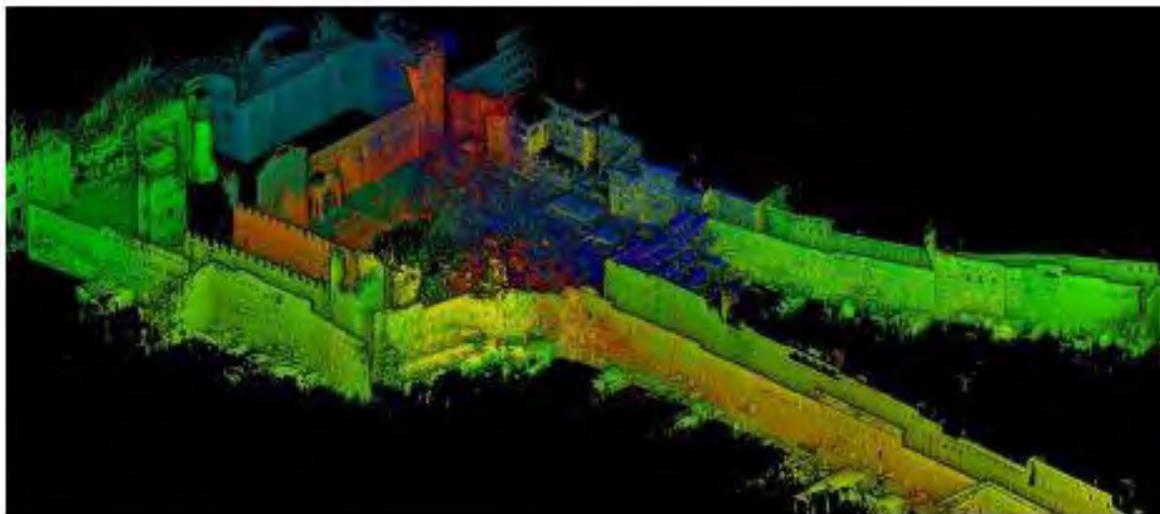


Figura 18. Detalle de la nube de puntos 3D (Picon-Cabrera et al., 2021).

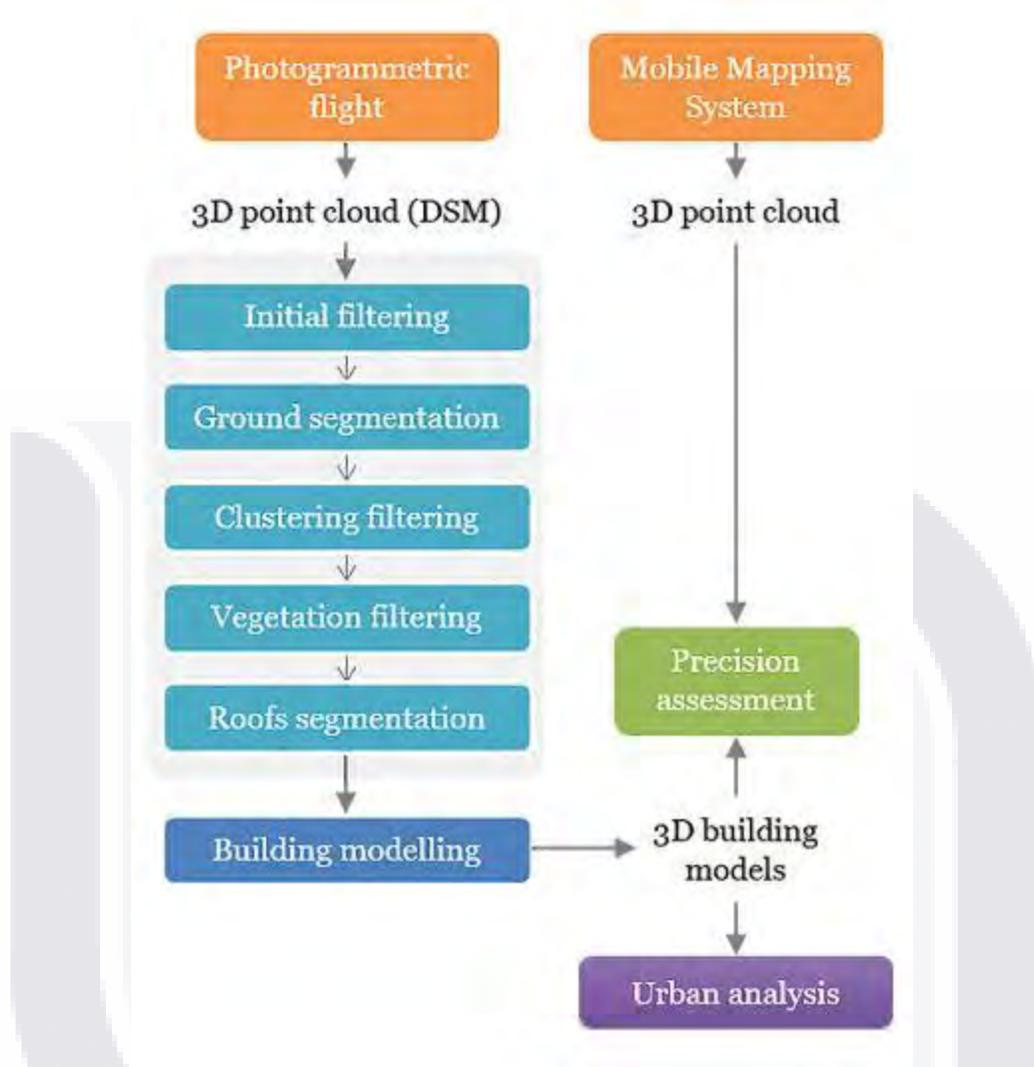
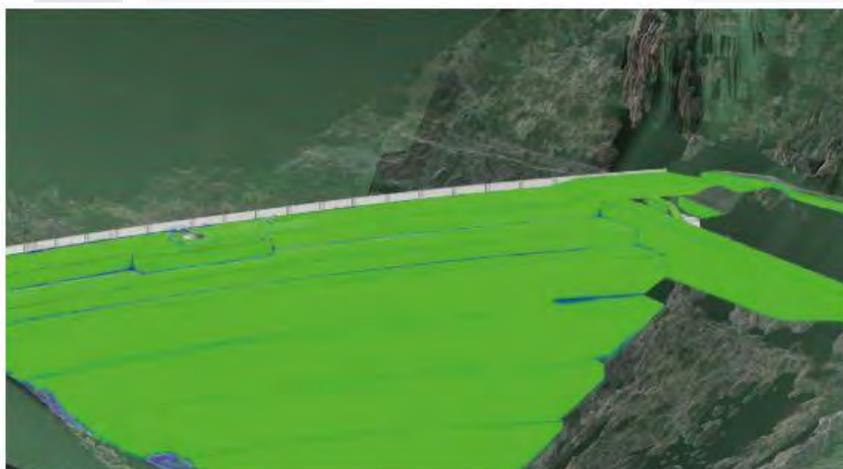


Figura 19. Flujo de trabajo en la reconstrucción de edificios y análisis urbano con fotogrametría (Picon-Cabrera et al., 2021).

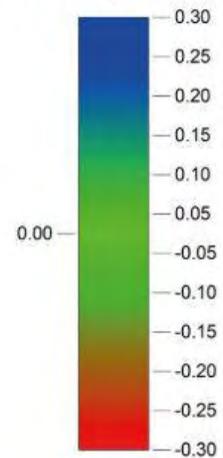
Un estudio donde se utiliza como técnica la fotogrametría de vehículos no tripulados, realizado para recabar datos es en la presa Isabel II, España, y también las construcciones circundantes. La nube densa de puntos que se obtiene sirve como base para generar un modelo de información de edificios históricos (*Heritage Building Information Modeling, HBIM*, por sus singlas en inglés) que centraliza la información gráfica estructural y arqueológica. El *HBIM* es validado mediante el complemento *As-Built for Autodesk Revit-FARO*, y muestra alta precisión obtenida con respecto la nube de puntos. La metodología empleada arroja resultados que se puede obtener modelos tridimensionales realistas con una alta precisión (Martínez-Carricondo et al., 2021).



a



Surface analysis (meter)



b

Figura 20. a) Modelo creado a través HBIM, b) Análisis de superficie del modelo en Autodesk Revit (Martínez-Carricondo et al., 2021).

2.4. Otras aplicaciones en el uso de la técnica de fotogrametría aérea

Un caso de estudio diferente a los de carácter patrimonial, pero donde también es empleada la técnica de fotogrametría aérea a corto rango es para la determinación de biomasa en las parcelas agrícolas que, tiene la finalidad de estimar la biomasa aérea de cultivo para la captura de carbono. El estudio se lleva a cabo en 3 parcelas, la primera en San Mateo de Gállego, donde se toman 149 imágenes a una altura de 214 metros, donde el parámetro de *GSD* es de 5cm/píxel. La segunda parcela es en Ayoó de Vidrales, donde se colocan 11 puntos de control en la parcela y se obtuvieron 427 fotografías de la zona a una altura de 84.7 metros, y el tamaño medio del *GSD* fue de 2.15 cm/píxel. La tercera parcela es en Soto de Cerrato, donde se emplea 5 puntos de control en toda la parcela, se toman 136 imágenes a una altura de 77.4 metros, donde se logra llegar a obtener un *GSD* de 1.9cm/píxel. Cabe añadir, que para la captura de imágenes de las diferentes parcelas se usan 3 equipos de cámaras diferentes: Skywalker, el E-Bee y Mikroppter Respectivamente. Los resultados tienen una coherencia con lo que se puede observar en campo. Esto demuestra que la metodología empleada en todo el proceso desde, planeación de vuelo hasta el procesamiento de la información digital, es fiable y consistente (Marcos-Robles et al., 2016).

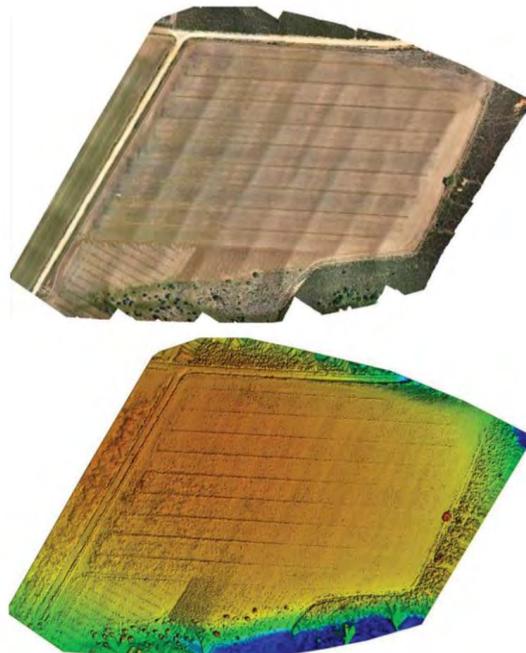


Figura 21. Ortofoto de la parcela de Ayoó de Vidrales, a partir de la aplicación de fotogrametría aérea (arriba) y el modelo digital de superficie (abajo) (Marcos-Robles et al., 2016).

El siguiente estudio realizado en el Valle de los Reyes, República de Tyva, se demuestra que la fotogrametría digital basada en *UAV* para actualizar la planigrafía de sitios o lugares arqueológicos, como también, descubrir otros nuevos, fue informativa y eficaz. Sin embargo, se detectan numerosas limitaciones en cuanto a su aplicación a la búsqueda de objetos arqueológicos, donde se concluye que, las investigaciones arqueológicas no pueden ser reemplazadas por los *UAVs* (Vavulin et al., 2021).

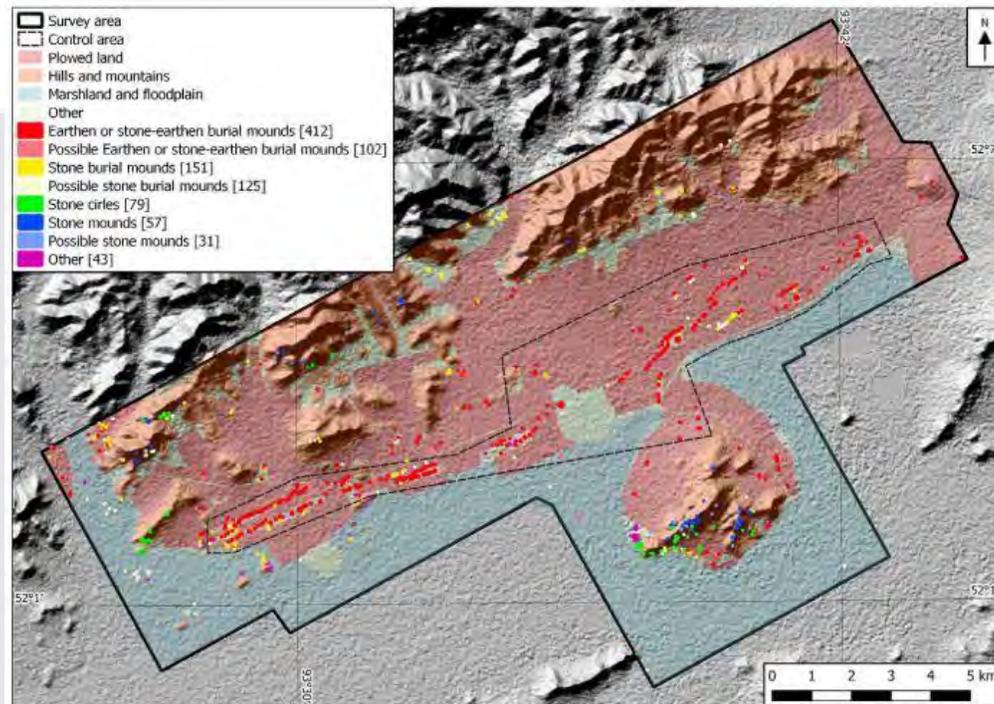


Figura 22. *Objetos identificados dentro del área de estudio y clasificados preliminarmente*
(Vavulin et al., 2021).

Los drones o también llamados *UAVs*, permiten medir de manera eficiente la morfología superficial actual de un sitio arqueológico dañado. Larity es una estructura de montículos de piedra que, es seleccionado como caso de estudio. Una campaña arqueológica, como en otros trabajos de investigación, lleva a cabo el proyecto con fotogrametría *UAV* basado en los algoritmos de *SfM* y *MVS*, para poder crear el modelo de la superficie del terreno donde se construye la base estructural y los canales de conexión, obteniendo una nube densa de puntos, una orto imagen y un modelo digital de la superficie (*Digital Surface Model, DSM*, por sus siglas en inglés). Se obtiene una nueva superficie interpolada que representa la morfología inalterada, después de que se elimina la información topográfica que cubren las áreas alteradas, de la densa nube de puntos. Posteriormente, la información que se recaba se materializa en un modelo virtual que se ubica entre ambas

superficies, donde después se recrea el conjunto arquitectónico original (Carvajal Ramírez et al., 2019).

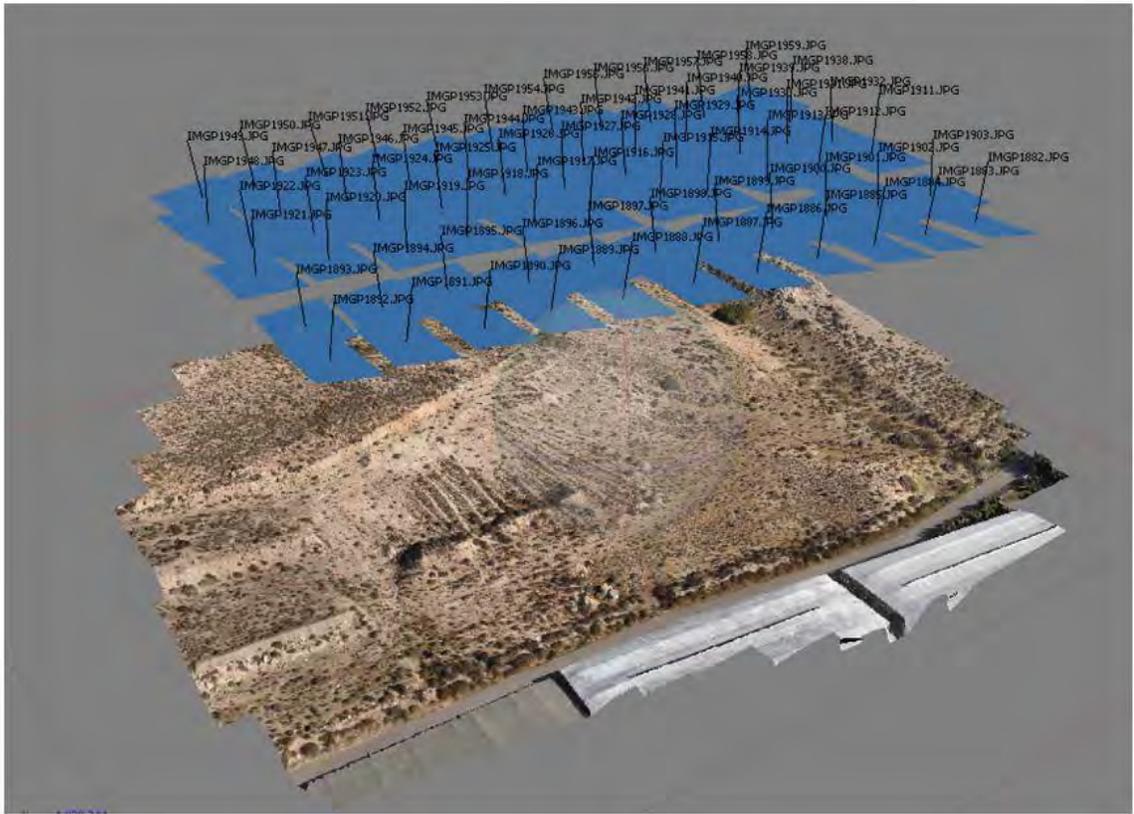


Figura 23. Modelo 3D no orientado y escalado del proceso de alineamiento de 66 imágenes (Carvajal Ramírez et al., 2019).

2.5. Comparación de softwares empleando la metodología fotogramétrica

Para el procesamiento de información digital a través de fotografías, y la creación de modelos 3D, existen diversos softwares especializados que satisfacen estas necesidades. El siguiente artículo de investigación compara y evalúa tres softwares en su desempeño (precisión y tiempo) al momento de procesar la información y crear el modelado, donde compara entre sí al software *Agisoft Metashape*, *Bently ContextCapture* y *RealityCapture*. Para el caso de estudio en la comparación de los softwares antes mencionados, se lleva a cabo con un artefacto pequeño de igual manera para los programas antes mencionados. Son probados usando imágenes tomadas en luz ambiental ideal, usando de igual manera para todos los programas la misma cámara. Posteriormente, la información digital se procesa en cada uno de los programas de

manera separada, pero con el mismo equipo de cómputo. El software que tarda menos tiempo en procesar la información y crear el modelo 3D fue el *RealityCapture* como se muestra en la figura 24, y el que tarda más tiempo es el *Agisoft Metashape*, sin embargo, cada programa tiene sus puntos a favor y en contra como se muestra en la tabla 4 (Kingsland, 2020).

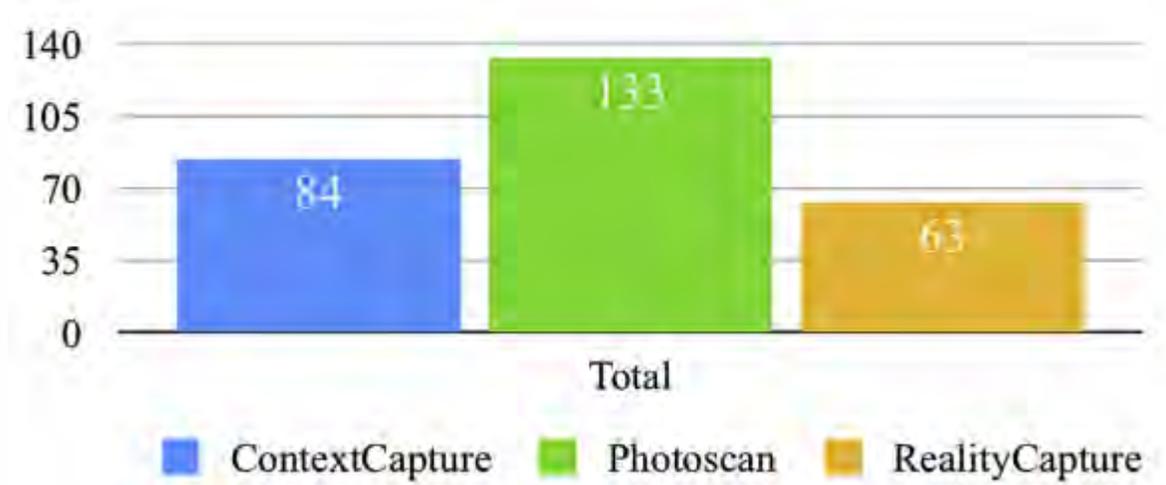


Figura 24. Tiempo promedio en procedimiento (minutos) (Kingsland, 2020).

Tabla 3. Resumen de la evaluación y discusión (Kingsland, 2020).

Resumen	
Agisoft	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor cantidad de tiempo de procesamiento
Metashape	<ul style="list-style-type: none"> • Alineación de imágenes más confiables
Professional (Versión 1.4.4)	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden editar mallas y texturas dentro de software • Es posible la alineación manual de la imagen • Maneja la mayor variedad de tipo de datos • Los niveles más altos de control manual en el procesamiento • Capacidad para crear fragmentos y combinarlos para obtener un modelo completo • Puede automatizar fácilmente todo el flujo de trabajo mediante la interfaz gráfica de usuario • Se pueden escalar modelos • Licencia perpetua de menor costo

Resumen

<p>Bently CC (versión 4.4.9)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de procesamiento más corto que Metashape • Requiere software de edición de terceros para editar el modelo • No se puede editar la textura antes del modelo final • Textura más nítida • La alineación de la imagen es difícil y finalmente fallida • Maneja una variedad de tipos de datos siempre que se hayan tomado coordenadas GPS • Nivel más bajo de control manual • Solo se pueden asignar datos en un solo fragmento • No se puede automatizar fácilmente todo el flujo de trabajo • Modelos a escala difíciles y poco exitosos • Suscripción anual
<p>RC (versión CLI, 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de procesamiento más corto • Se pueden editar mallas y texturas en RC • La alineación de imágenes más exitosa • Textura más nítida que Metashape • Maneja una gran variedad de tipos de datos • Solo se pueden agregar datos en un solo fragmento, pero a veces se procesan los datos como modelos separados que se pueden combinar más adelante. • Se puede automatizar fácilmente todo el flujo de trabajo • Se pueden escalar modelos • Niveles de suscripción y licencia costosos.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”



3. MARCO TEÓRICO

3.1. Patrimonio

El concepto de patrimonio posee un carácter polisémico, donde los significados son muy amplios. La definición varía según la perspectiva, se rige por criterios que permitan establecer las características de medida y de representación. (Valle Melón, 2006)

Para Peinado (2014, citado por Narváez, 2014) la palabra patrimonio significa “lo recibido por la línea paterna”, según la etimología *patri-monium*.

Como una definición apegada a este trabajo, el patrimonio está conformado por aquello que es transmitido de generación en generación como algo de carácter valioso, y que es considerado y asignado por múltiples aspectos, donde esto puede ser cambiado según los factores que caracterizan la situación (Ley 1985 Patrimonio Histórico Español, 1994).

El patrimonio es un legado que recibimos de nuestros antepasados, que lo disfrutamos en el presente y traspasaremos a nuestras generaciones futuras. El patrimonio conforma la capacidad cultural de las sociedades, a la valorización a la fecha de las mismas sociedades, pero también, es un enlace considerable para la difusión de los conocimientos y experiencias a través de las generaciones, y a su vez, genera interés entre las nuevas generaciones donde generen inspiración y creatividad para proyectos de carácter cultural en un tiempo futuro. El patrimonio cultural nutre a la sociedad en conocimiento, historia y experiencias, y crea sensación de identificación y pertenencia de la región o de una sociedad (Caraballo, 2011).

El patrimonio debe tener relación ciertos aspectos, como lo son: La historia, la cultura, el entorno y contexto social para poder tener una mejor interpretación del mismo para que se le pueda cualificar como de carácter patrimonio al sitio u objeto en cuestión. Los puntos para considerar según la *Carta ICOMOS, (2008), para la interpretación y presentación de sitio de Patrimonio Cultural* son los siguientes:

1. Para explorar la relevancia de un sitio para su interpretación en sus diferentes aspectos como lo pueden ser artístico, histórico, político, espiritual, etc., donde se debe tomar en cuenta la importancia de los valores del sitio, por ejemplo, sociales, culturales, medioambientales.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
2. Debe diferenciar y constatar las múltiples etapas o fases de evolución, donde se tome en cuenta todos los factores que han influido o aportado de interés para el sitio.
 3. Considerar a toda persona que ha tenido algún tipo de intervención y aportado a mejorar o hacer crecer el valor cultural del sitio en cuestión.
 4. En la interpretación debe incluir el entorno físico que lo rodea, como el paisaje, ambiente, la zona geográfica.
 5. Las tradiciones culturales o las diferentes actividades artríticas, por mencionar algunas, música, pintura, teatro literatura, etc., deben ser tomados en cuenta en la interpretación como patrimonio.
 6. La documentación histórica y las investigaciones sirven para interpretar el sitio con el contexto actual que lo rodea y expresar un criterio de este mismo.

3.1.1. Patrimonio edificado

En el artículo 1, de la *Carta de Venecia* (ICOMOS, 1965), interpreta al patrimonio edificado como un monumento histórico, que abarca desde su arquitectura, como también, a la civilización o sociedad en conjunto que lo rodea, que testifica los sucesos históricos que se han suscitado a través del tiempo.

Casas (2016) dice que, “El patrimonio edificado abarca un espectro especial de la actividad humana. Con la correcta gestión del patrimonio en cuestión puede llegar a incrementar la calidad de vida de la civilización circundante”.

3.1.2. Puentes patrimoniales

Los puentes patrimoniales han tenido un papel importante a través de la historia del ser humano. Los puentes históricos han sido testimonio de la capacidad de construcción del hombre en el pasado (DeLony, 2011). La finalidad de la construcción de los puentes ha sido crear una vía que atravesase un tramo de manera segura, en donde no se pueda circular de manera normal.

Los puentes que han sobrevivido el pasar de los años, han sido catalogados como patrimoniales por ser un emblema de identificación y que le agrega valor cultural a la región o una civilización, además que, algunos aún se siguen utilizando como vía de tránsito de personas o inclusive de vehículos.

Tabla 4. *Tipos de Patrimonio* (Narváez, 2016).

Patrimonio			
Natural	Cultural		
	Tangible		Intangible
Paisajístico	Mueble	Inmueble	Música
Paleontológico	Artístico	Arquitectónico	Costumbres
Genético	Bibliográfico	Arqueológico	Fiestas religiosas
	Documental	Urbano	Leyendas
	Fotográfico	Paisaje	Mitos
		Cultural	Tradiciones orales

En la tabla 4, dentro de los tipos de patrimonio se puede ubicar al patrimonio edificado como de carácter cultural, tangible y arquitectónico.

3.1.3. Conservación

La conservación es todo aquel proceso que conlleve a la protección de un objeto o sitio con la finalidad de mantener su valor cultural (ICOMOS, 2013).

La conservación del patrimonio se refiere a la protección y preservación del buen estado y la integridad de un sitio patrimonial de valor reconocido como su importancia histórica o artística, especialmente del interés de la sociedad que lo cualifica como patrimonial. Esto permite ser transmitido a la próxima generación para que puedan tener conocimiento y goce de este mismo. Es importante que cada sociedad, civilización o cultura, reconozca el valor de su patrimonio y le de credibilidad a las fuentes pertinentes. Además, la conservación aporta al ahorro de recursos con las acciones de mantenimiento preventivo, a comparación si fueran acciones de correctivas. Este tipo de actividades suelen ser de un costo muy elevado, por ello, la relevancia de darle su mantenimiento preventivo para evitar más el desgaste de las zona u objetos. De esto surge la necesidad de documentar la información patrimonial, ya que, nos otorga herramientas para un análisis más profundo y detallado para su proceso de conservación, además, sirve para difundir las diferentes acciones que se han llevado a cabo en el sitio patrimonial (Narváez, 2016).

3.1.4. Documentación gráfica del patrimonio edificado

Para comenzar con la documentación gráfica es necesario una descripción de las características físicas, el estado actual de los monumentos y conjuntos arquitectónicos y su uso correspondiente, donde requiere de un registro como punto importante para los procesos de conservación y restauración (ICOMOS, 2013)

Para toda aquella actividad de conservación al patrimonio edificado se debe tener como punto importante el registro y documentación en las diferentes fases, como antes de su intervención, durante y después sobre el inmueble (ICOMOS, 1965).

Las actividades como conservación, restauración, divulgación e investigación estarán en función al proceso, representación, salvaguarda y documentación. Según la metodología empleada para la adquisición de medidas, suponen una sucesión de datos numéricos, los cuales aportan distancias, ángulos y coordenadas. Con la información obtenida, los datos de carácter cuantitativo pasarán a ser información cualitativa, la cuál será más comprensible y más fácil de manipular (Valle Melón, 2006)

En la documentación del patrimonio edificado tiene diferentes aplicaciones como lo redacta Melón (2006):

- Brinda información sobre a configuración espacial o la geometría de los conjuntos arquitectónicos, en las diferentes disciplinas de investigación o intervención.
- Ayuda como un registro actualizado a cualquier actividad sobre el inmueble.
- En la creación virtual del inmueble aporta al estudio en las diferentes disciplinas, para su edición o reconstrucción del mismo.
- Al recrear modelos virtuales de los conjuntos arquitectónicos históricos mejora la transmisión a la civilización para su conocimiento y enriquecimiento cultural.

En las figuras 25 y 26 representa cómo era la recreación gráfica y su correspondiente documentación del patrimonio edificado en el pasado. Las descripciones de las medidas del inmueble eran trazadas con técnicas básicas basado en triangulaciones (Narváez, 2016).

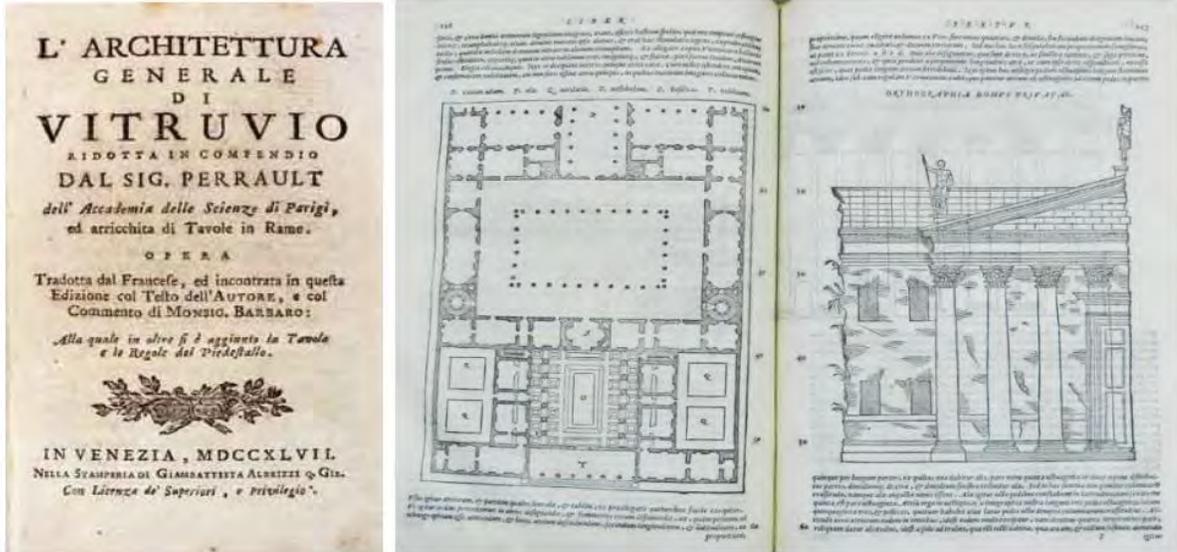


Figura 25. Portada del tratado de Virtubio Venecia 1747 (izquierda) y del libro: Ritrovato il "Di Architectura" (derecha) (Narváez, 2016).

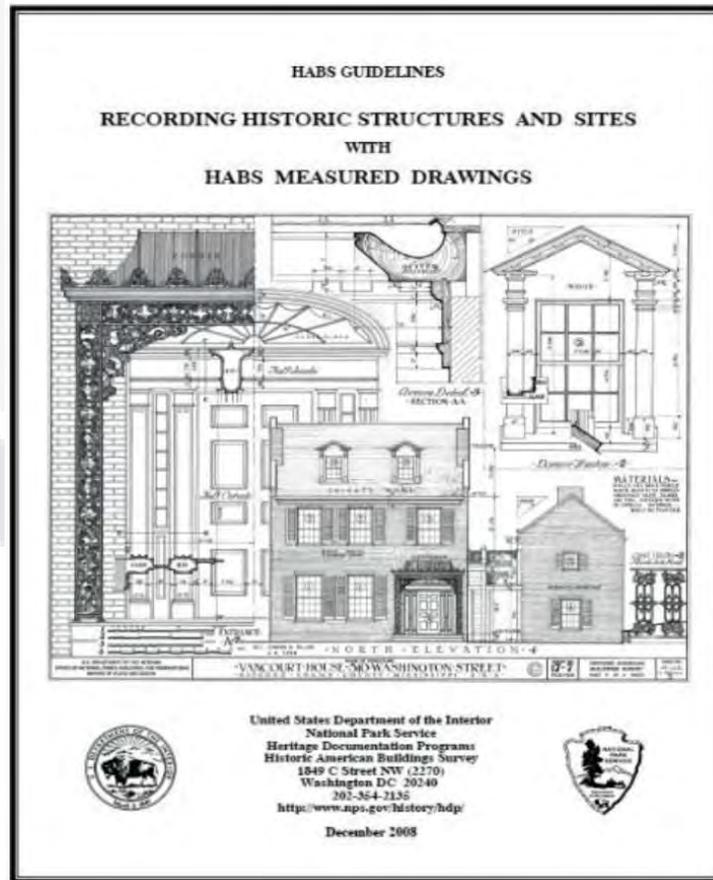


Figura 26. Ejemplo de documentación patrimonial (Narváez, 2016).

Narváez (2016), considera varios aspectos importantes con alto grado de determinación para seguir el registro de la documentación de los elementos patrimoniales:

- Proveer todo aquel dato o información para el entendimiento del patrimonio edificado en cuestión, que de igual manera impulse la participación de la gente.
- Facilitar un expediente con los registros de los edificios patrimoniales que pueden ser destruidos por fenómenos ambientales o por la misma actividad de las personas.
- Otorgar la información a las dependencias correspondientes que se encargan de preservar el patrimonio edificado, para que con la información proporcionada puedan tener una mejor planificación en las actividades de intervención para la conservación y restauración de los inmuebles históricos.
- De igual manera, con toda información concedida del conjunto arquitectónico establezcan el uso adecuado a la infraestructura, metodologías de investigación, así como su respectiva gestión y construcción.

La documentación gráfica es el resultado de las actividades implementadas en la intervención que, facilitan la localización, registro y creación de la configuración espacial del inmueble como de sus alrededores. En muchos de los casos, la documentación geométrica se establece como patrimonial por sí misma. La documentación geométrica es un catálogo de información para los diferentes tipos de actividades multidisciplinarias que sirve como estudio previo por la obtención de sus características métricas (Valle Melón, 2006).

3.2. Fotogrametría

La palabra fotogrametría por su etimología se puede definir como *medición gráfica por medio de luz*. Buill et al. (2007) define la fotogrametría como “la disciplina que lleva a cabo medidas indirectas de objetos utilizando perspectivas fotográficas.

Así es como a través de la información digital que proporciona las imágenes tomadas a algún objeto o lugar con alguna cámara fotográfica, podemos extraer información numérica como lo es dimensiones, posición o coordenadas; gráfica como la forma, textura y color. Con esta información podemos generar modelos 3D del objeto o lugar

La técnica de fotogrametría es una ciencia de medición tradicional que a través de fotografía obtiene información de carácter métrico (Zeledón, 2018).

La fotogrametría es la ciencia de adquisición de mediciones confiables de elementos físicos y sus alrededores, por medio de la captura, medida y lectura de las fotografías para su análisis y representación. (*Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS) - Consejo Científico Internacional, n.d.*)

Para el procesamiento de la información digital de las imágenes, la fotogrametría es considerada la mejor técnica, siendo capaz de procesar cualquier escala la información 3D con estimaciones de precisión y confiabilidad de parámetros desconocidos de las imágenes empastadas, con las cuales éstas pueden ser obtenidas usando herramientas satelitales aéreas y terrestres, donde después se procesa basado en la calibración de las imágenes, orientación de la misma, medición de la superficie, la extracción de características y generación de ortofotos (Remondino, 2011).

3.2.1. Fotogrametría digital

Se entiende como fotogrametría digital a la técnica de generación de un modelo tridimensional a partir de imágenes bidimensionales el cual necesita un solapamiento entre las imágenes de un mínimo de 60% adyacentemente y un 30% longitudinal o a lo largo (Coelho y Brito, 2009, citado en Zúñiga González, 2016).

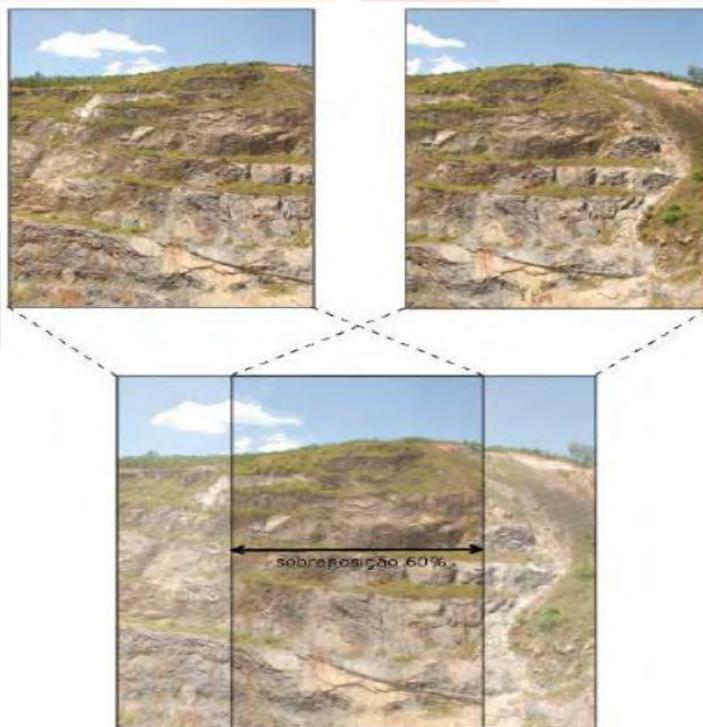


Figura 27. Solapamiento entre fotografías para obtener una correcta visión estereoscópica, esta debe tener un 60% lateral y un 30% longitudinal (Zúñiga, 2016, obtenida de Duelis, 2015).



Figura 28. Proceso de reconstrucción tridimensional mediante la técnica de fotogrametría digital (Zúñiga, 2016).

Las fases de la técnica de la fotogrametría digital, se basa en localizar puntos semejantes en todas las imágenes, para con esto poder ubicar el posicionamiento relativo, posterior a ello se logra una reconstrucción geométrica del elemento, con lo cual se determina la superficie del modelo (Falkingham 2012, citado en Figueroa, 2016).

La fotogrametría digital está basada en una estructura de movimiento (*SfM*, por sus siglas en inglés) en algoritmos procesados en equipos de cómputo, las cuales generan puntos significantes de cada una de las fotografías, e infiere los parámetros de las imágenes para empatar los puntos semejantes en las diversas imágenes o fotografías, localizando coordenadas en el espacio de dichos puntos (Westoby et al. 2012, citado en Colica et al., 2021).

3.2.2. Fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea brinda una amplia visión de los objetos o sitios de los cuales se están tomando fotografías a través de una cámara que está implementada en un vehículo aéreo, por lo que lo convierte en una técnica rápida para la obtención de imágenes. Por lo general, la cámara está en un ángulo de 90° (Mecate, UNAM n.d.).

3.2.3. Vehículo aéreo no tripulado

Los sistemas aéreos no tripulados (*UAV*, por sus siglas en inglés) son conocidos por ser flexibles y de bajo costo el cual da un amplio acceso a la fotogrametría. Su evolución de los sistemas aéreos no tripulados ha traído nuevas soluciones al levantamiento fotogramétrico a comparación de otros sistemas de mapeo. En objetos voladores se le

coloca una cámara digital réflex ligera para los diversos trabajos. Los objetos son capturados a una baja altitud por lo que la adquisición de la información es relativamente rápida (Desa et al., 2021).

Las imágenes aéreas obtenidas por dispositivos aéreos no tripulados han revolucionado el levantamiento topográfico obteniendo modelos 3D de bajo costo, rápido y con alta calidad en el procesamiento de la información (Pepe & Costantino, 2020).

Dron es otro término que se la da a los dispositivos aéreos no tripulados, y estos tienen ventaja respecto a otro tipo de dispositivos no tripulado o satélites, por ejemplo, el acceso a zonas complicadas a una baja altitud y obtener resoluciones altas en tiempo real a un bajo costo (Bustamante et al., 2017). Un dispositivo aéreo no tripulado es manipulado de manera remota de forma semiautomático o autónomo. (Eisenheiss, 2009, citado en Bustamante et al., 2017).

Las técnicas UAV-Fotogrametría están relacionadas con la adquisición, procesamiento y generación de datos de imágenes, y está cambiando de manera rápida los métodos clásicos utilizados en la topografía (Jankauskienė et al., 2020).



Figura 29. Dron (Bustamante et al., 2017).

3.2.4. Paralaje

Rosado (2014) define paralaje como “el cambio de posición de la imagen de un punto en dos fotografías debido al cambio de posición de la cámara en el momento de la toma”.

Es el movimiento superficial de la posición de un elemento, respecto a un punto de referencia, generado a partir del desplazamiento de posición desde el cual se observa. Una cámara capturando fotografías aéreas con solapamientos en intervalos con patrones de tiempo regulares adquiere información de la ubicación de las fotografías en los momentos de captura. Paralaje estereoscópica es conocido como el cambio de posición de una imagen a otra generado por el movimiento de la cámara fotográfica (Sepúlveda, 2016).

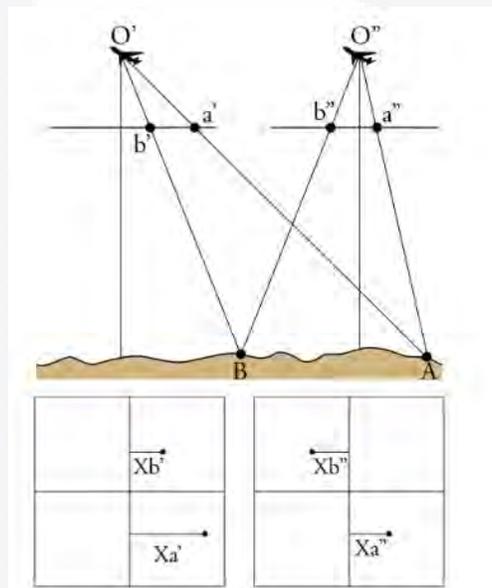


Figura 30. Paralaje estereoscópica (Rosado, 2014).

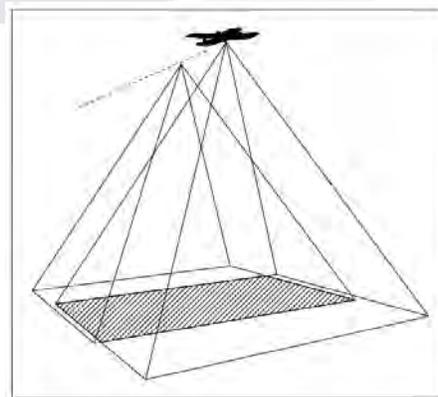


Figura 31. Recubrimiento longitudinal o solape (Pacheco A. & Pozzobon B., 2011).

3.2.5. Distancia de muestreo en tierra

La distancia de muestreo en tierra (*GSD*, por sus siglas en inglés) es básicamente la distancia de los puntos medios de píxel a píxel en una fotografía. La resolución de las imágenes describe la precisión de los productos fotogramétricos (Ruzgiené et al., 2015, citado en Jankauskiené et al., 2020). Su cálculo está en función de los siguientes parámetros:

$$GSD = \frac{H}{c} * pixel\ size$$

Donde:

H: Altura del vuelo o la distancia del objetivo al sensor (m)

Pixel size: Dimensiones del sensor (mm)

c: Distancia Focal (mm)

Entonces, las especificaciones de las cámaras fotográficas en el proceso fotogramétrico, como la planificación de la altitud de vuelo o la separación entre el objeto y el sensor de la cámara, son los parámetros que determinan el *GSD*.



Figura 32. *GSD* demostrado gráficamente (Rosado, 2014).

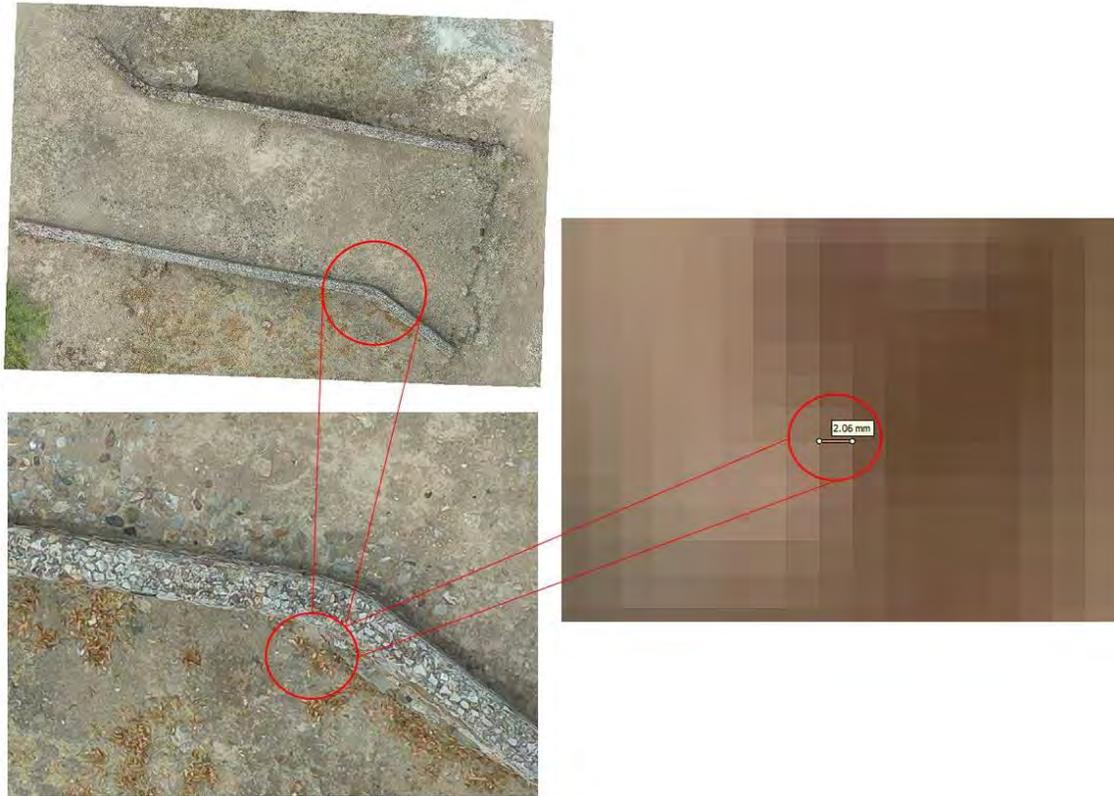


Figura 33. Acercamiento y medición de longitud de un pixel en ortofoto. Elaboración propia.

3.2.6. Estructura de movimiento

La Estructura de Movimiento (*SfM*, por sus siglas en inglés) trabaja de la misma manera que la fotogrametría estereoscópica, donde la geometría tridimensional son generadas a partir del solapamiento de imágenes superpuestas. Utiliza un paquete iterativo altamente redundante, basado en los datos extraídos de diversas fotografías. (Westoby et al., 2012).

“El campo de Estructura de Movimiento se ocupa de la calibración de una secuencia fotográfica y la recreación de la configuración tridimensional de la escena” (Alex, Michael & Luc, 2018, citado en Hernández, 2018). Para ubicar los puntos dentro del modelo 3D, la técnica de la fotogrametría necesita la localización y posición tridimensional del dispositivo de captura de fotografías o en la ubicación tridimensional de una serie de puntos de control (Westoby et al., 2012).

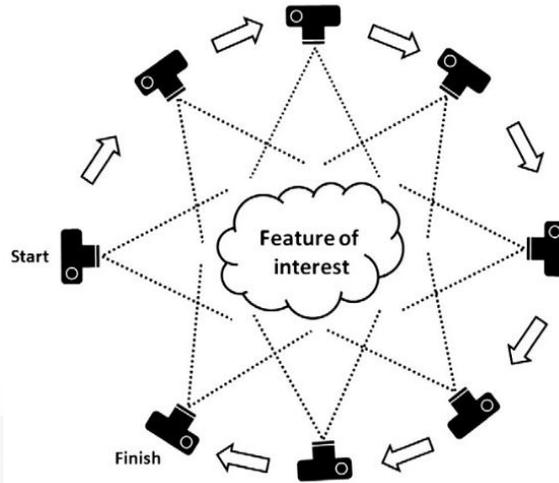


Figura 34. La técnica de SfM requiere múltiples fotografías superpuestas como entrada para los algoritmos de extracción de características y reconstrucción 3D (Westoby et al., 2012).

3.3. Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un programa novedoso el cual recrea modelos tridimensionales a partir de la información digital de fotografías fijas. Las fotografías pueden ser adquiridas desde cualquier ángulo y posición, siempre y cuando el elemento a generar su modelo 3D se vea en al menos 2 fotografías (Agisoft LLC, 2018)

Procesar la información digital proporcionada por la adquisición de fotos tiene como finalidad la creación de un modelo tridimensional texturizado, donde incluye cuatro etapas generales o importantes (Agisoft LLC, 2018):

- En la primera etapa del procesamiento se encuentra la alineación de las cámaras. Aquí el programa empieza a buscar los puntos semejantes de las imágenes y la posición de la cámara por cada fotografía y ajusta la configuración de calibración de la cámara fotográfica.

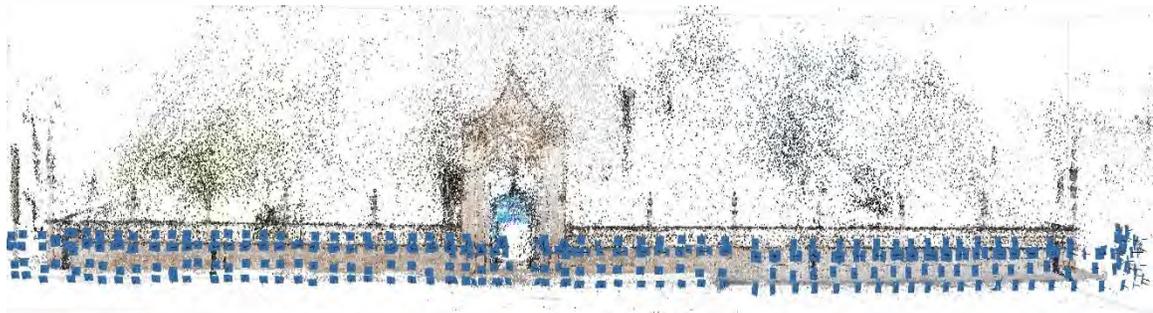


Figura 35. Ejemplo de una nube dispersa de puntos y orientación de cámaras. Elaboración propia.

- Una vez que se han alineado las cámaras, se genera una nube de puntos densa que crea en función del posicionamiento estimado de las cámaras y de las mismas imágenes, la cual se puede llevar a cabo una edición antes de que se siga en la otra etapa, como también, se puede exportar la información a otro programa para su configuración.



Figura 36. *Ejemplo de una nube densa de puntos.* Elaboración propia.

- En la tercera etapa se continua con la creación de un mallado. Aquí el programa va generando una geometría tridimensional con base en polígonos, recreando así la configuración espacial a través de la nube densa de puntos del objeto en cuestión. El programa puede realizar algunos ajustes como la destrucción de alguna parte de la malla, suavizado, cierre de agujeros, eliminar zonas elementos que se encuentren separados. El software permite exportar mallas, editarlas con otro programa y volver a importarlas.

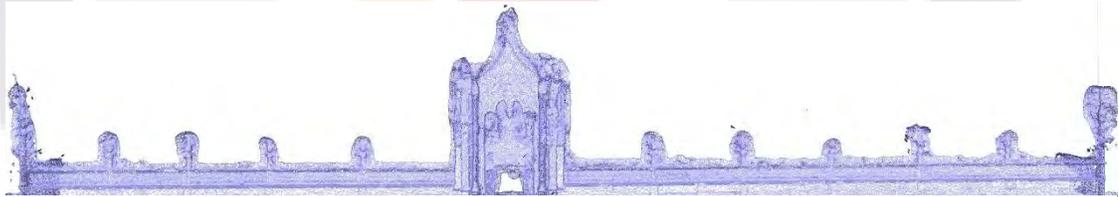


Figura 37. *Ejemplo de un enmallado.* Elaboración propia.

- La última etapa es el texturizado de la malla, donde el programa dispone de algunas opciones de texturizado, por ejemplo, por mosaico, que aquí el programa lo que ejecuta es un pegado de fragmentos diminutos de las fotografías a la malla del elemento, recreando así una visión de una geometría con textura.



Figura 38. *Ejemplo de un modelo texturizado.* Elaboración propia.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Tabla 5. Operacionalización de variables. Elaboración propia.

Variable nominal	Descripción de variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos	Autores
Patrimonio edificado	Conjuntos arquitectónicos reconocidos como valiosos, y con un gran valor histórico y cultural	Geometría	Documentación y Representación 3D, conservación, gestión y planificación	Mediciones convencionales, levantamientos fotogramétricos, Reconstrucción virtual, Registro documentación gráfica	ICOMOS, (Caraballo, 2011), (Casas 2016), (Gil Melitón & Lerma,2019), (Valle Melón, 2006)
Técnicas para la creación de modelos 3D a edificios patrimoniales	Procedimientos de adquisición de información digital a través de tecnologías y herramientas novedosas para la obtención de la configuración espacial del conjunto arquitectónico	Trabajo en campo	Costo, Calidad y tiempo de operación, Planificación de trabajo, Vuelo fotogramétrico, Distancia de muestro en tierra	Fotogrametría a corto rango, UAV (dron), cámara fotográfica, SIG, Estación Total	(Guiliano, 2014), (León Lescano et al., 2020), (Pérex, n.d.), (Quiroga et al., 2015), (Westoby et al., 2012), (Rosado,2014)
		Trabajo en gabinete	Hardware utilizados, softwares empleados, Costo y tiempo del procesamiento, Flujo de trabajo	Equipo de cómputo, Agisoft Metashape, Structure from Motion, Documentación gráfica	(Agisoft LLC,2018), (Kingsland, 2020), (Melón, 2006), (Castro Figueroa, 2016), (Robles et al., 2016)

De las diversas bases de datos consultadas, con respecto a las diferentes metodologías de trabajo para el levantamiento fotogramétrico y el posterior procesamiento de la información recabada para la modelación 3D de los elementos en cuestión, se desarrolló una metodología de trabajo a seguir en la campaña experimental, pero primeramente se aplicó la metodología a una prueba piloto donde se determinó la calidad y precisión de los resultados, siempre tomando en cuenta los tiempos y costos del proceso, haciendo los respectivos ajustes necesarios para su optimización.

Como menciona Remondino (2011), “La recreación de objetos 3D y sitios patrimoniales en su estado actual, requiere una metodología poderosa capaz de capturar y modelar digitalmente los finos detalles geométricos y de apariencia de dichos sitios”.

Remondino (2011), describe las propiedades a considerar para la modelación 3D de objetos o sitios patrimoniales:

- Exactitud: la precisión y la fiabilidad son dos factores importantes del trabajo topográfico, a menos que el trabajo se realice para una visualización simple y rápida.
- Portabilidad: una técnica, en particular para adquisiciones terrestres, debe ser portátil debido a problemas de accesibilidad para muchos sitios patrimoniales, ausencia de electricidad, limitaciones de ubicación, etc.
- Bajo costo: la mayoría de las misiones arqueológicas y de documentación tienen presupuestos limitados y no pueden pagar costosos instrumentos.
- Adquisición rápida: la mayoría de los sitios y áreas de excavación tienen limitado para la documentación para no molestar a los trabajos o a los visitantes.
- Flexibilidad: debido a la gran variedad y dimensiones de sitios y objetos, la técnica debe permitir diferentes escalas y debe ser aplicable en cualquier condición posible.

4.1. Diagrama general de flujo de trabajo



Figura 39. Diagrama de flujo de trabajo. Elaboración propia

4.1.1. Selección de muestra

Primeramente, para la campaña experimental se delimitó los inmuebles a recrear el modelo tridimensional. Para ello, se seleccionó los conjuntos arquitectónicos de interés para el centro INAH Aguascalientes, siendo los puentes catalogados como patrimoniales del Estado de Aguascalientes, como se muestra en la tabla 6. El principal objetivo de generar los modelos 3D es la configuración espacial de los inmuebles históricos.

La importancia de recrear la geometría o configuración espacial de los puentes catalogados como patrimoniales en el Estado de Aguascalientes recae en la preservación y salvaguarda de su legado, los cuales fueron herencia de una época donde fue necesaria su construcción para librar los arroyos existentes de aquellos tiempos. En el siglo XVIII, se formó la ruta "Camino Real de Tierra Adentro", donde los pobladores de la época

buscaban tener un recorrido desde la Ciudad de México hasta el norte del país, donde se presume que recorría una longitud mayor a 2600km, buscando en su mayor parte la exploración, explotación y comercialización de la minería. De tal manera, uno de los ramales principales cruzaba lo que es hoy en día el Estado de Aguascalientes, siendo así que, la mayoría de los puentes patrimoniales del estado, formaban parte del itinerario “Camino Real de Tierra Adentro”. Por tales motivos, en la actualidad, varios de los puentes no cuentan aún con un registro y documentación, y los demás, su información aún está incompleta o desactualizada, por lo que uno de los objetivos específicos de este trabajo es el registro, actualización y documentación de dichos puentes por medio de la aplicación de la fotogrametría aérea, para que sirva la información como fuente base a otros casos de estudio o investigación, así como también, para su conservación y restauración, sin dejar a un lado la divulgación de esta a los habitantes del Estado de Aguascalientes, para que así, puedan ser conocedores de la arquitectura, proceso constructivo, contexto de los materiales y de los alrededores de la época en la que fueron construidos, y que a través de un modelo digital puedan tener una representación más apegada a la realidad posible.

Tabla 6. *Puentes catalogados como patrimoniales en el Estado de Aguascalientes.*
Elaboración propia.

No.	Nombre	Ubicación (municipio)	Ficha
1	San Ignacio	Aguascalientes	Sí
2	El Chicalote	Aguascalientes	Sí
3	Blanco	Asientos	Sí
4	CECyTEA	Asientos	No
5	Guadalupe	Asientos	Sí
6	Tepozán	Asientos	Sí
7	Pabellón de Hidalgo	Pabellón de Hidalgo	Sí
8	El Tule	Asientos	No
9	Tepezalilla	Calvillo	Sí
10	Peñuelas	Aguascalientes	No
11	Presa Serna	Calvillo	No
12	Pargas	Aguascalientes	No
13	Cobos	Aguascalientes	No

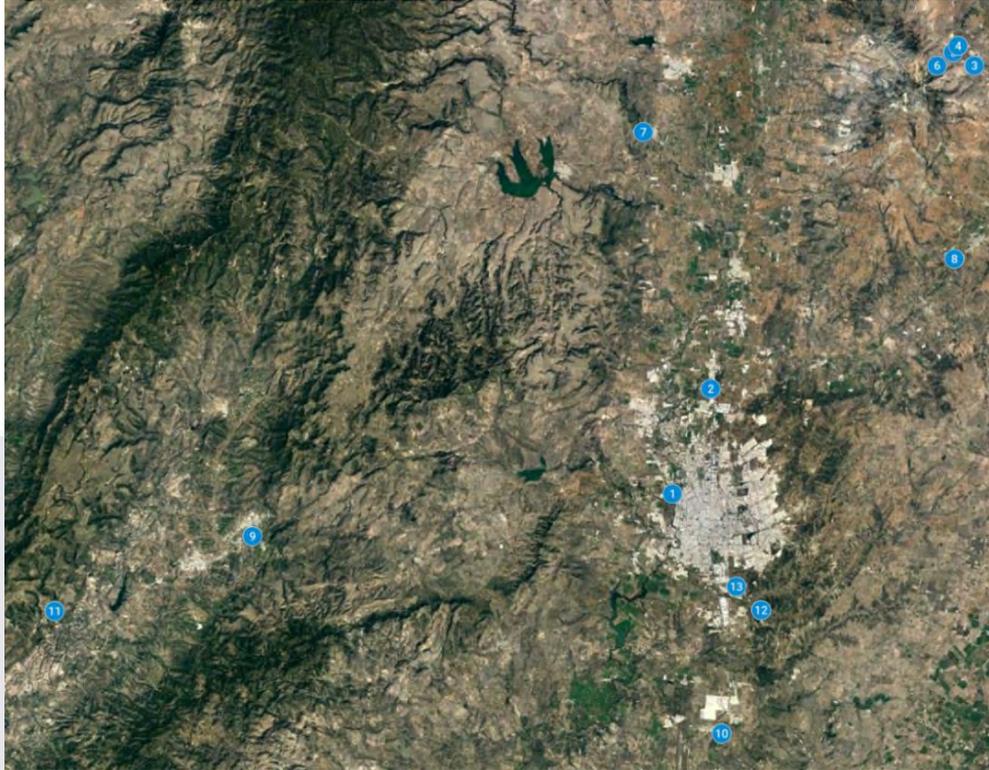


Figura 40. KMZ de las ubicaciones de los puentes del Estado de Aguascalientes catalogados como patrimoniales (Centro INAH Aguascalientes, 2022).

4.1.2. Planificación de trabajo en campo

La planificación de trabajo consiste en realizar una visita previa al sitio de trabajo para observar los siguientes factores que pudiesen influir para el trabajo en campo:

- Ubicación de los inmuebles: Esto permitió trazar la ruta de trabajo óptima para economizar combustible y tiempo de traslado.
- Permisos de acceso: Según la muestra seleccionada, se tuvo que investigar si el área donde se encuentra el inmueble es zona privada, y si lo fue, se pidió los respectivos permisos para el ingreso a la zona y poder llevar a cabo el trabajo en campo.
- Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) según la NOM-107-SCT3-2019: Siguiendo los requisitos bajo el marco jurídico que establece la presente norma, se seleccionó un dron a operar que cumpla con el peso máximo permitido (250g) y las distancias y zonas seguras de vuelo, como se muestra en la imagen 41.

CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA			
PESO MÁXIMO DE DESPEGUE		USO	Cumplimiento al Numeral de la presente Norma Oficial Mexicana
Igual o menor a 2 Kg	RPAS Micro	Recreativo	4.10, 4.11 y 5.1.
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 5.1, 5.2 y 8*
Mayor a 2 kg y hasta 25 Kg	RPAS Pequeño	Recreativo	4.10, 4.11 y 6.1.
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 6.2 y 8*
Mayor a 25 kg	RPAS Grande	Recreativo	4.10, 4.11 y 7.1.
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 7.2 y 8*

Figura 41. Operación de RPAS (NOM-107-SCT3-2019).

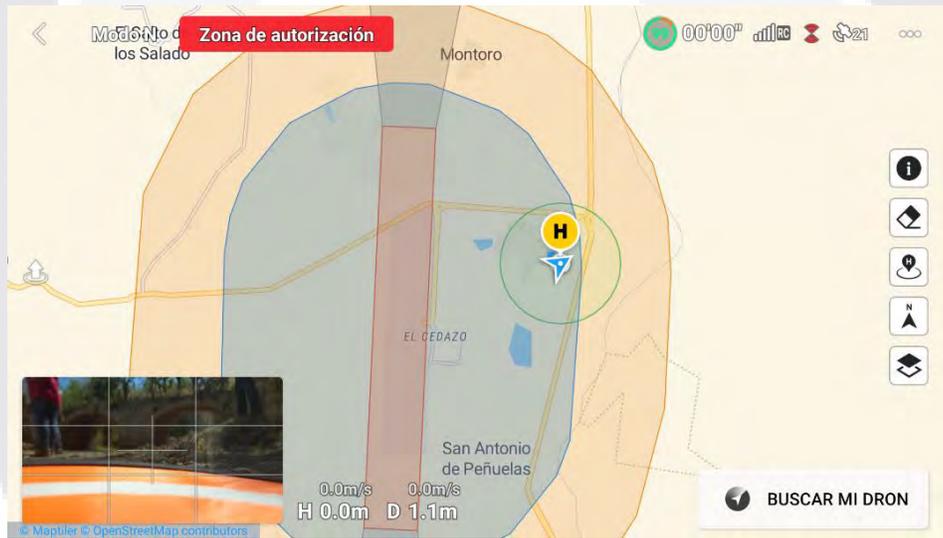


Figura 42. Zona restringida por cercanía a un aeropuerto. Elaboración propia.

- Obstrucciones: Un factor importante fue el observar qué objetos obstruyen la adquisición de fotos, como lo puede ser la vegetación densa, postes de luz, inmuebles aledaños, etc.
- Condiciones actuales del inmueble: Fue importante analizar las condiciones estructurales por cuestiones de seguridad, para tomar las decisiones correctas en la toma de fotografías de la manera más segura para el usuario.

De tal forma, si alguno de los puntos no pudiese cumplirse (excepto el primero) habría que descartar la muestra, o en su debido caso, seleccionar otra.

Una vez, cumpliendo estos criterios y aceptando la selección de muestra, se procede a la elección del día más adecuado para el trabajo en campo, donde se debe considerar el horario del levantamiento fotogramétrico, para evitar en medida de lo posible las proyecciones de sombras debido a los rayos solares y, por si fuese el caso de volver a ir otro día a seguir con el levantamiento, se procure que sea en el mismo lapso de tiempo u horario, para que las condiciones de sombras generadas por la luz del sol al inmueble sea las más semejantes posibles. Respecto a las condiciones meteorológicas, evitar los días de lluvia y escoger días con vientos menores a 10km/hr, esto por cuestiones de estabilidad del vuelo del dron.

Contar con una planificación de la ubicación o mapa de vuelo previa de la zona a realizar el trabajo haría que el trabajo fuese más eficiente y eficaz. (López Jobacho & Cortés Albalá, 2016). Por otro lado, se minimiza el riesgo de accidentes, se mejora la calidad en el post procesamiento del modelo tridimensional y se reducen tiempos de trabajo en campo, evitando que se haga repetitivo el trabajo a ejecutar.

4.1.3. Trabajo en campo

Ahora, ya que se tuvo la planificación adecuada para el trabajo en campo, se prosiguió a la adquisición de imágenes o fotografías necesarias para su post procesamiento. En este particular caso el equipo a utilizar es el siguiente mostrado en la tabla 7.

Tabla 7. Herramientas y equipos. Elaboración propia.

Herramientas	Materiales
Dron DJI mini 3 pro	Libreta, lápiz, plumón de agua.
Cámara fotográfica semi profesional Nikon COOLPIX P900	Marcas visibles que funcionen como puntos de control
Estación Total Ruide RCS 2"	
Distanciómetro Leica DT2	

Se tuvo otros aspectos a considerar para el trabajo en campo, como lo es la escala de trabajo, la distancia de muestreo máximo permitido y el solapamiento entre imágenes, esto con la finalidad de obtener un modelo tridimensional de buena calidad.

En la tabla 8 se puede observar cuáles son las escalas empleadas según el elemento patrimonial a intervenir, donde se busca manejar una escala entre 1:50 a 1:100.

Tabla 8. Escalas tradicionalmente empleadas en la representación de conjuntos históricos. (Melón, 2006).

Elementos arqueológicos y conjuntos históricos	Escalas
Objetos muy pequeños, así como marcas e incisiones	2:1, 1:1
Objetos mayores, como epigrafías, fragmentos arquitectónicos	1:2, 1:5, 1:10
Pequeños monumentos, particularmente importantes	1:20, 1:50
Edificios	1:50, 1:100, 1:200
Cascos Urbanos	1:500, 1:1000, 1:2000
Casco urbano con territorio anexo	1:5000, 1:10000
Estudio territorial	1:25000, 1:50000

Para la distancia de muestreo del suelo se tuvo que mantener en un rango lo más aproximado a 2mm/píxel para una escala de 1:50, como se puede observar en la tabla 9. Esto permitió que las mediciones del modelo generado sean las más exactas a la realidad posible.

Tabla 9. GSD en función de la escala (Molina et al., 2021).

Escala de Trabajo	GSD máximo (mm)
1:50	0,25
1:10	0,5
1:20	1
1:50	2
1:100	4

Por la situación de que se combinó dos tipos de cámaras diferentes que es la del dron DJI mini 3 pro, y la de la cámara semiprofesional NIKON COOLPIX P900, tienen diferentes especificaciones cada una de ellas, como se muestra en la tabla 10, por lo que el programa con el cual se procesó la información tomó como distancia al objeto de la

cámara más cercana, lo cual definió el parámetro de la distancia de muestreo en tierra o suelo (GSD). La cámara semiprofesional sirvió para brindar mayor adquisición de información para las zonas de baja altura del puente, como también para la captura de fotografías de la parte convexa del arco, zona que es difícil la manipulación del dron. Es claro que, para las partes superiores de los inmuebles se tuvo que fotografiar con la cámara del dron.

Tabla 10. Especificaciones de las cámaras utilizadas. Elaboración propia.

Cámaras	Distancia Focal	Tamaño máx. imagen	Sensor
DJI mini 3 pro	24mm	8064x6048	CMOS 1 / 1.3"
NIKON COOLPIX P900	35mm	4608x3456	CMOS 1 / 2.3"

La operación del dron debe tener una planificación de vuelo previamente analizada antes de ser llevada a cabo, teniendo todos los factores antes previstos en la planificación de trabajo, para tener en cuenta la altura de vuelo o distancia al objeto, y los solapamientos. Hoy en día, las cámaras fotográficas cuentan con una herramienta de “cuadros” que divide el área a cubrir por la fotografía en tercias de cuadrantes, como se muestra en la imagen 43, por lo que esto brindó apoyo, para de forma visual, tener un aproximado en el porcentaje de solapamiento entre cada imagen, lo cual, se buscó llegar a tener arriba del



Figura 43. Cuadrante o tercias en cámara del dron. Elaboración propia.

70% lateralmente. Cabe mencionar que la operación del dron o el vuelo del mismo se tuvo que llevar a cabo de forma manual.

El trabajo tuvo un patrón de vuelo de la siguiente manera, considerando la envergadura de cada inmueble, el tiempo estimado de duración de la batería del dron, y que se cumplan las condiciones antes mencionadas para la planificación de trabajo:

- Se determinó que el dron tenga la señal óptima con los satélites para realizar el despegue, las recomendaciones del fabricante estiman un mínimo de 10 satélites enlazados al dron antes del despegue y lo óptimo más de 20 satélites.

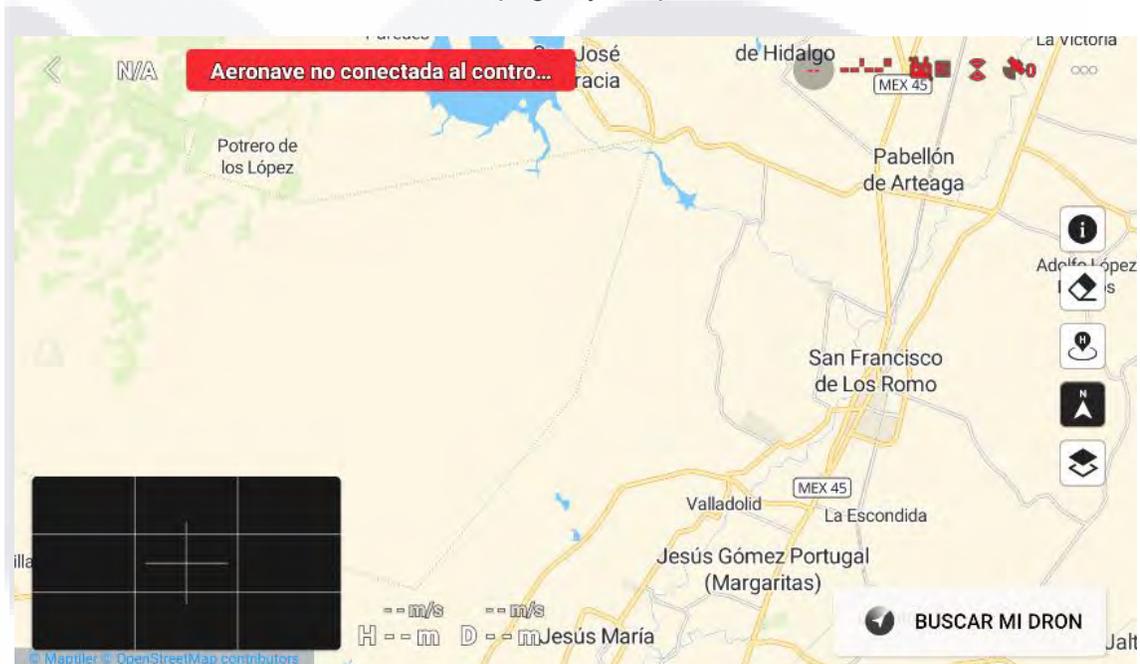


Figura 44. Ejemplo de satélites no localizados. Elaboración propia.

- Una vez que se tuvo la señal adecuada, se llevó el primer barrido de fotografías del inmueble con una visión angular de 90° paralelo al eje del plano, y siguiendo un patrón en forma de red, se procuró abarcar el solapamiento igual o mayor al 70% en cada fotografía.
- Después de que se abarcó toda el área de interés de manera plana, se prosiguió a cambiar la altura de vuelo, como también, el ángulo de la cámara, bajando gradualmente de 15° (por ejemplo: de 90° a 75°) por cada altura seleccionada, procurando hacer el barrido de fotografías de manera circular, o alrededor del inmueble, hasta llegar a unos 45° y una altura de vuelo lo más baja posible. Esto varió según las condiciones de los alrededores del inmueble y la envergadura de

este. Esto tiene la finalidad de poder adquirir más información de la verticalidad del conjunto arquitectónico, para que se pueda generar más detallado de la geometría.



Figura 45. Vuelo del dron a una baja altura y variación del ángulo de captura. Elaboración propia.

- Terminado el levantamiento fotogramétrico aéreo, se prosiguió a realizar el levantamiento fotogramétrico terrestre con la cámara semiprofesional que, de igual manera, con el apoyo de la herramienta de la tercia de cuadrantes, se dio un seguimiento para procurar el solapamiento entre cada imagen.
- Adquirido toda la información digital (fotografías), se tuvo el cuidado de respaldar la información y descartar las imágenes que estén borrosas, con mucha luz (quemadas), o muy oscuras.

Por otra parte, para contrastar si el método de adquisición de las fotografías es el más idóneo al momento de llevar a cabo el post procesamiento en cuestión de precisión del modelo tridimensional, se llevó a cabo un levantamiento topográfico tradicional con una estación total y un levantamiento convencional con un distanciómetro, con la finalidad de comparar las mediciones y compararlas, para descartar, modificar o aceptar el método de trabajo.



Figura 46. Levantamiento con estación total y distanciómetro. Elaboración propia.

Esto se aplicó a un solo inmueble para las respectivas comparaciones, y una vez que se consiguió buena precisión en el modelo a comparación de las otras formas de medición se continuó solo con los levantamientos fotogramétricos de los demás puentes.

4.1.4. Trabajo en gabinete

Al llegar a este punto del flujo de trabajo, es importante respaldar toda la información digital, por cualquier cuestión, puesto que no sería práctico realizar otro trabajo en campo del mismo conjunto arquitectónico, a menos que haya sido por falta de adquisición de información.

Para el procesamiento de las fotografías se utilizó el software *Agisoft Metashape Professional* (versión 1.7.2 build) para la generación del puente patrimonial en 3D, unificando en una única nube de puntos.

Para el resumen de trabajo en gabinete, se apoyó del proceso fotogramétrico elaborado por Zeledón, (2018).

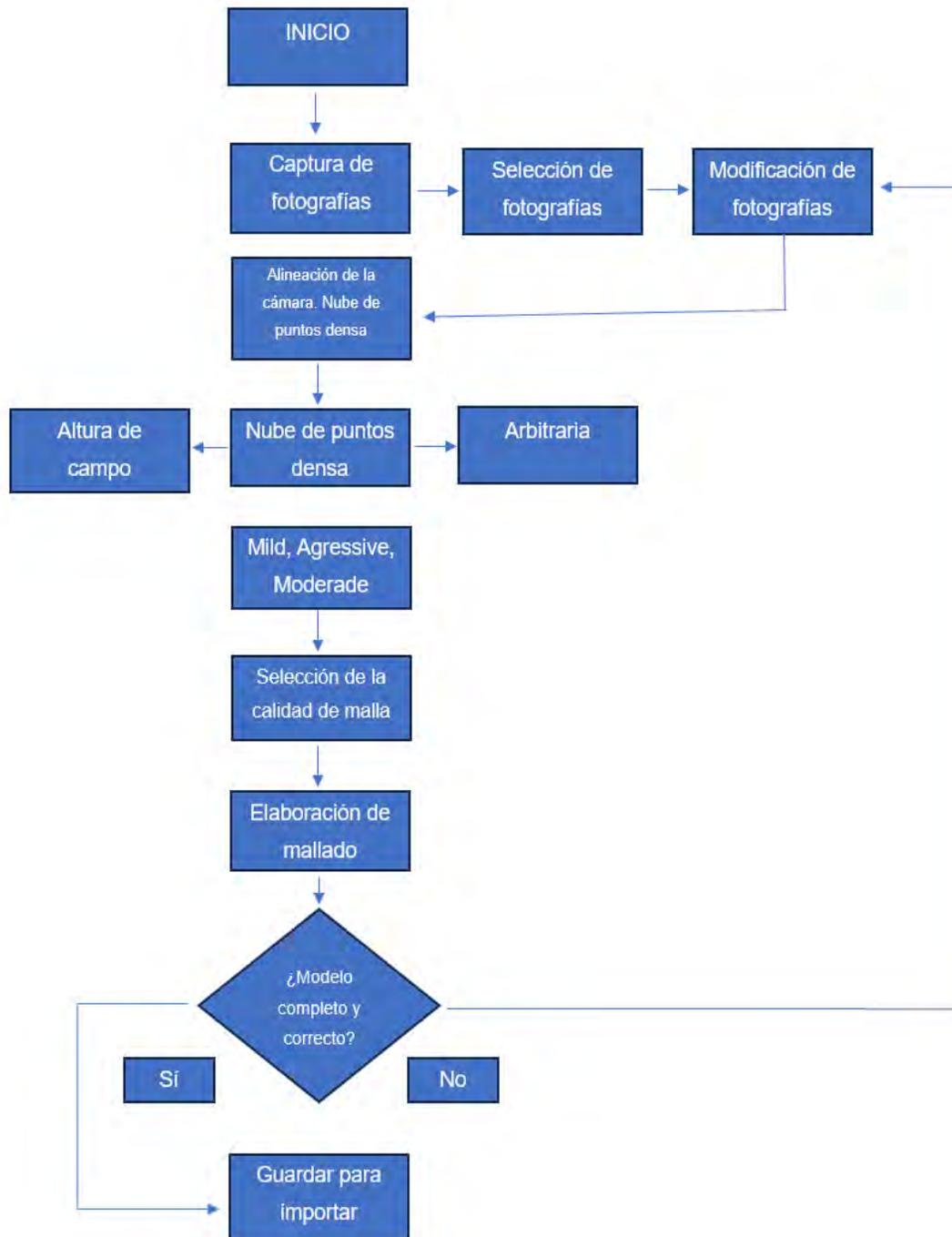


Figura 47. Proceso fotogramétrico (Zeledón, 2018).

Para la selección de los parámetros de cada etapa del flujo de trabajo del software, se llevaron a cabo ejercicios para estimar cuál era la mejor opción para su procesamiento donde se procuró reducir tiempo y al mismo tiempo obtener una buena confiabilidad en el modelado tridimensional generado:

- Para la orientación de las cámaras o fotografías se seleccionó la precisión alta, esto puesto que, es importante que se pueda alinear la mayoría de las imágenes que son tomadas entre la cámara del dron y la de la cámara semiprofesional, por lo que se considera esta etapa donde se debe exigir más al equipo de cómputo y donde puede demorar más tiempo en el procesamiento. Donde en la selección de puntos clave por foto fueron 100,000 y puntos de paso por foto 5,000.

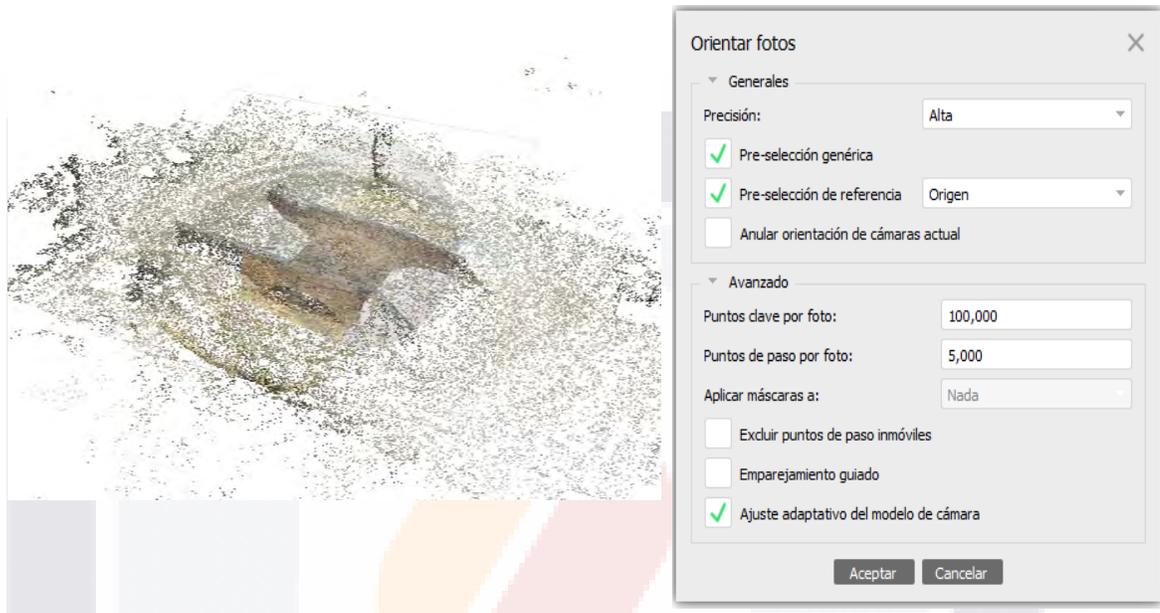


Figura 48. Selección de parámetros, orientación de fotos. Elaboración propia.

- En la etapa de la creación de la nube densa de puntos, la calidad se seleccionó de media, por la razón que no había gran variación en la calidad en la configuración espacial y, por el contrario, sí un aumento considerable en los tiempos de procesamiento. Además, en esta parte se seleccionó la estimación de nivel de confianza de los puntos, para determinar qué tan confiable es la nube densa generada, y esto permitió determinar qué áreas o zonas hubo carencia de información (fotografías) y, con ello, se puede volver a realizar el trabajo en campo específicamente en esas partes. El color azul significa excelente nivel de confianza y los puntos rojos bajo nivel de confianza o mucha carencia de información, donde por lo general estas zonas son partes oscuras o poca iluminación, o donde también hay mucha vegetación, como se puede ver en la imagen 49.

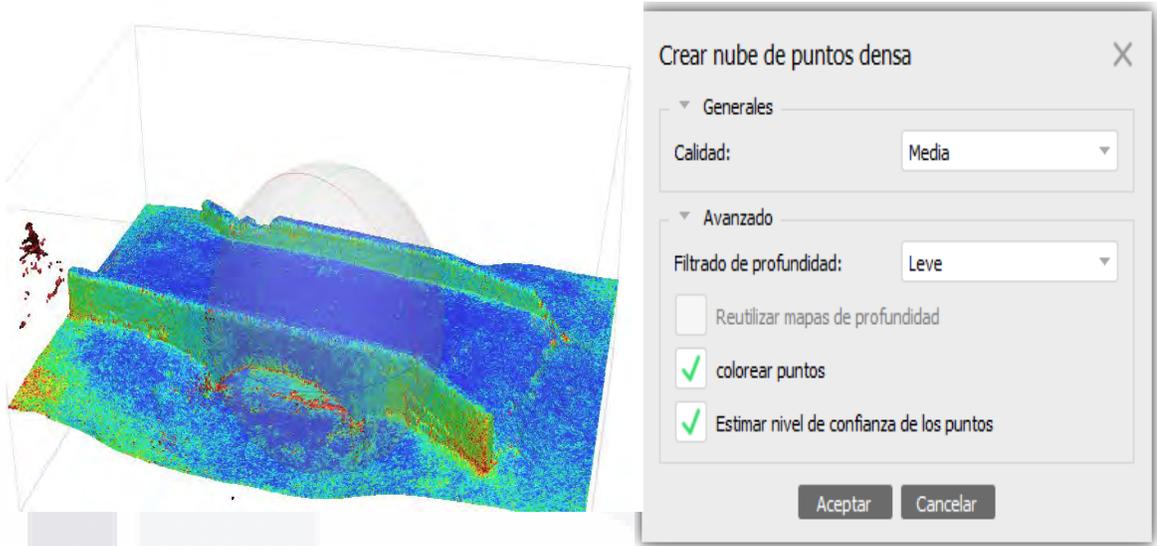


Figura 49. Selección de parámetros, creación de nube de puntos densa. Elaboración propia.

- Para la creación de la malla o la geometría del modelo, se llevó a cabo a partir de la nube densa de puntos generada, donde los tiempos de procesamiento eran relativamente bajos. La selección de los parámetros en esta etapa fue de igual manera a nivel medio.

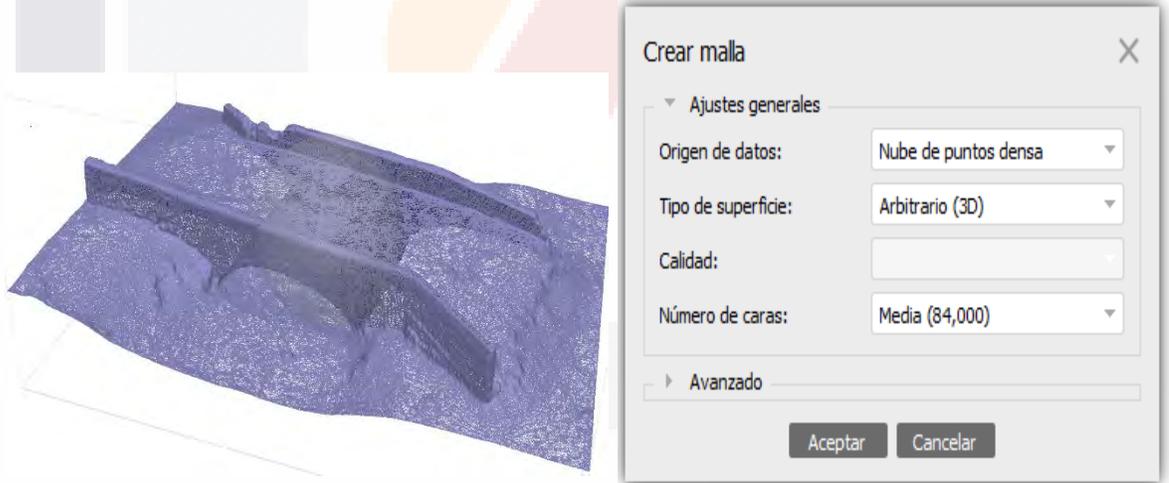


Figura 50. Selección de parámetros, creación de malla. Elaboración propia.

- En la etapa de texturizado, se seleccionó el modo de mezcla por mosaicos, donde básicamente el software pega a la malla múltiples pedazos pequeños de imágenes donde va en la zona, creando la sensación de el relieve del inmueble. Para los parámetros de esta selección se dejaron por defecto.

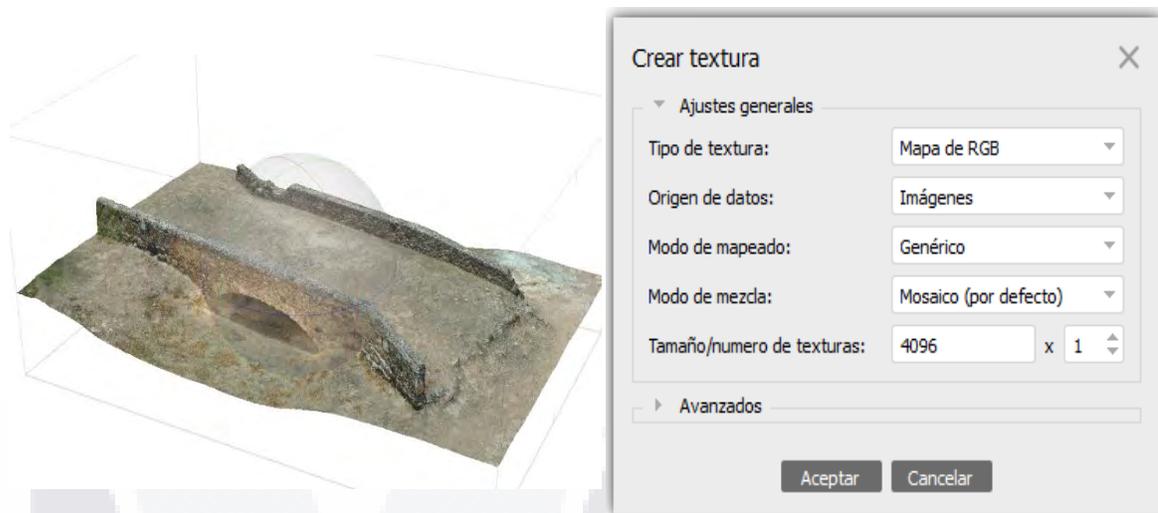


Figura 51. Selección de parámetros, creación de textura. Elaboración propia.

Dentro del flujo de trabajo del mismo software, se calibró las imágenes, como también, la eliminación de puntos no deseados o que no sirvan para el modelo, y optimizar el tiempo de procesamiento.

Fue importante para el presente trabajo, mostrar los modelos tridimensionales generados a personal del INAH, quienes determinaron si los modelos creados a través de la metodología empleada son buenos y de ayuda para sus intereses particulares. También, hasta este punto se pudo comparar la precisión en las mediciones entre el levantamiento fotogramétrico y los levantamientos tradicionales, donde se llevó a cabo ejercicios en el Puente de San Ignacio, donde se midieron las distancias que hay entre los arcos, esto por la practicidad de su medición y como se había mencionado antes para poder compararlos de una manera más fácil, y el error entre cada uno de las técnicas respecto al fotogramétrico varió de 0.5 al 2% respectivamente, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Medición con el empleo de diferentes equipos, en uno de los arcos del puente San Ignacio. Elaboración propia.

Equipo	Medición
Distanciómetro	3.801m
Estación Total (Levantamiento tradicional)	3.737m
Dron y cámara (Levantamiento fotogramétrico)	3.72m



Leica DISTO™ Plan 15:08:07 17.05.2023

Figura 52. Medición de apertura de los arcos del puente San Ignacio con distanciómetro. Elaboración propia.

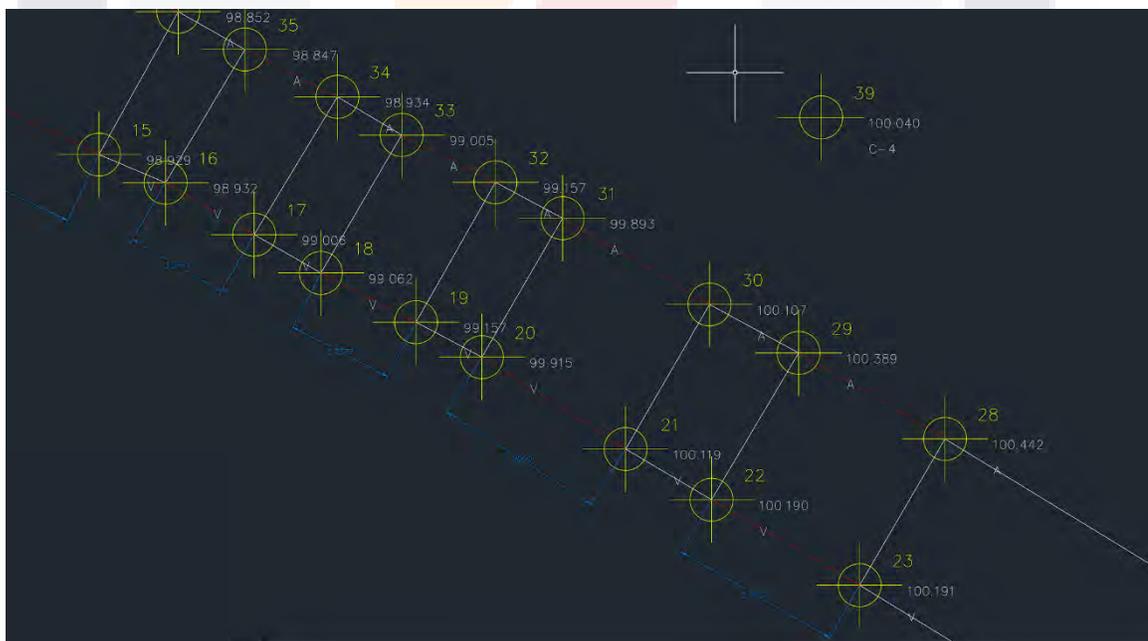


Figura 53. Medición de apertura de los arcos del puente San Ignacio con Estación Total, procesado en CIVIL CAD 3D.

Elaboración propia.



Figura 54. Medición de apertura de los arcos del puente San Ignacio a través del levantamiento fotogramétrico procesado en Agisoft Metashape. Elaboración propia.

Los puentes que se pudieron recrear su modelo tridimensional fueron aceptados por lo que la siguiente parte del trabajo es la generación de las ortofotos a partir del modelo tridimensional generado, para posteriormente pasar al registro y documentación gráfica.

La información que se generó es de crucial importancia para el salvaguarda y divulgación hacia la sociedad de futuras generaciones, lo cual requiere de un control de calidad, puesto que, para la próxima ocasión que se utilice dicha información evite altos costos de conservación, o que se realicen gastos no necesarios (Segarra Narváez, 2016).

4.1.4.1. Ortofoto para trazo de planos arquitectónicos

Una vez que se siguió el flujo de trabajo dentro del interfaz del programa *Agisoft Metashape* hasta la creación del modelo texturizado, se prosiguió a generar las ortofotos de las perspectivas de interés, lo cual en este particular trabajo, se requirió crear ortofotos de la planta y fachadas de los puentes patrimoniales.

Una de las ventajas que se tuvo al generar la ortofoto de vista en planta fue que, al ser generado con una cámara que cuenta con GPS y en la selección para crear la ortofoto fue de tipo geográfico, como se muestra en la figura 55 a), se obtuvo ortofotos en planta georreferenciadas bajo un sistema de coordenadas previamente seleccionadas. Sin

embargo, para la creación de ortofotos de las fachadas, la selección fue de tipo planar y en un plano de proyección de *vista actual*, según la perspectiva que se escogiera para dicha ortofoto.

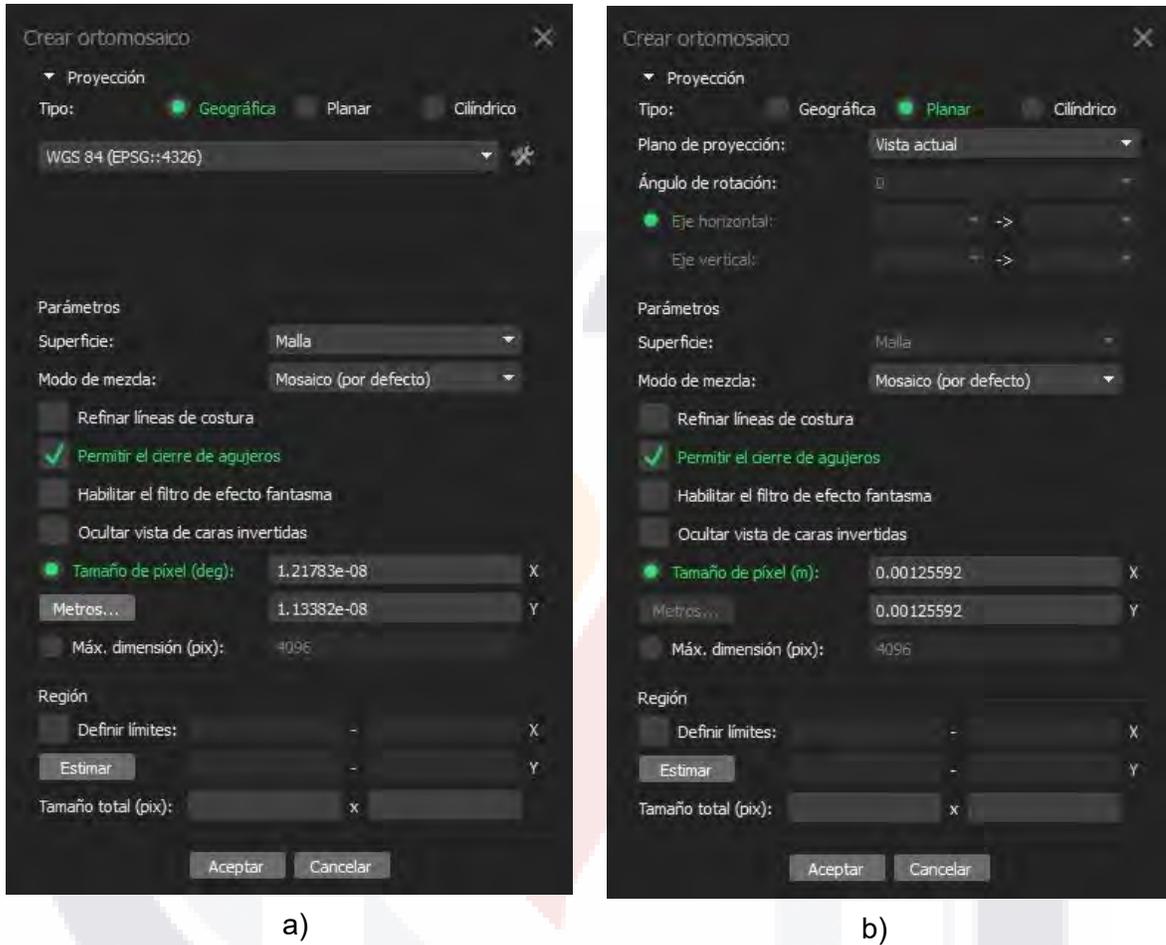


Figura 55. Selección de tipo de ortofoto según la proyección. Elaboración propia.

El seguimiento después de que se creó una ortofoto, fue la exportación de esta, para poder generar otra ortofoto en otra vista o perspectiva, donde para la ortofoto georreferenciada se exportó en formato TIF, esto para poder abrir el archivo en un programa de diseño asistido como lo es *CIVIL 3D* o *AutoCAD* y pudiese estar escalada a una dimensión real la ortofoto para el trazo de sus mediciones de interés. En el presente trabajo, primero se importó la ortofoto en el programa *CIVIL 3D* (versión 2023 para estudiante), donde se utilizó el comando *mapiinsert*, como se muestra en la figura 56 a). Esto debido a que, al insertar la ortofoto por medio de este comando, da la opción de seleccionar la posición de la imagen como su dimensionamiento o escala, y como la ortofoto se georreferenció desde su exportación del programa *Agisoft Metashape*, se

obtuvo la ubicación, orientación y dimensionamiento real de la ortofoto en el programa de Civil 3D, como se observa en la figura 56 b). Una vez insertada la imagen, se guardó el archivo en formato DWG, para posteriormente abrirse en *AutoCAD*, para el dibujo o trazo de las zonas de interés.



Figura 56. a) Comando *mapiinsert* de *CIVIL 3D*, b) Valores de inserción de ortofoto. Elaboración propia.

Para las ortofotos que fueron creadas de tipo planar, el formato de exportación fue en JPG. Dichas ortofotos en JPG al importarlas a *AutoCAD* no están escaladas, por lo que se tuvo que escalar con el apoyo de una medición como referencia, donde se apoyó de la misma herramienta de medición del programa *Agisoft Metashape*.

Ya que se trazó las zonas de interés de los puentes patrimoniales, se prosiguió a la creación de los planos siguiendo los lineamientos de la “Guía gráfica, fotográfica y de descripción arquitectónica para el catálogo nacional de monumentos históricos”, donde posteriormente, dichos archivos generados, puedan ser utilizados en el registro y catalogación para la documentación en la página oficial del INAH.



INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA

COORDINACIÓN NACIONAL DE MONUMENTOS HISTÓRICOS

SUBDIRECCIÓN DE CATÁLOGO Y ZONAS

GUÍA GRÁFICA, FOTográfica Y DE DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA PARA EL CATÁLOGO NACIONAL DE MONUMENTOS HISTÓRICOS



Figura 57. Guía gráfica, fotográfica y de descripción arquitectónica para el catálogo nacional de monumentos (INAH, 2023).

4.1.5. Documentación gráfica

Melón (2006), nos dice que “La documentación geométrica del patrimonio edificado debe responder a objetivos, en función de necesidades concretas”.

- Representar los modelos 3D, y sectorizado por partes.
- La salvaguarda de los datos. Presentación que garanticen la interoperabilidad con otros sistemas o softwares.
- La divulgación de resultados, planos, informes, publicaciones etc.

Para el presente trabajo, se llevó a cabo el registro y documentación de los inmuebles que se recreó los modelos tridimensionales.

De tal manera, se siguió los lineamientos de la “Guía para captura de fichas en el sistema de publicación y administración del catálogo nacional de monumentos históricos” para su registro, catalogación y documentación.

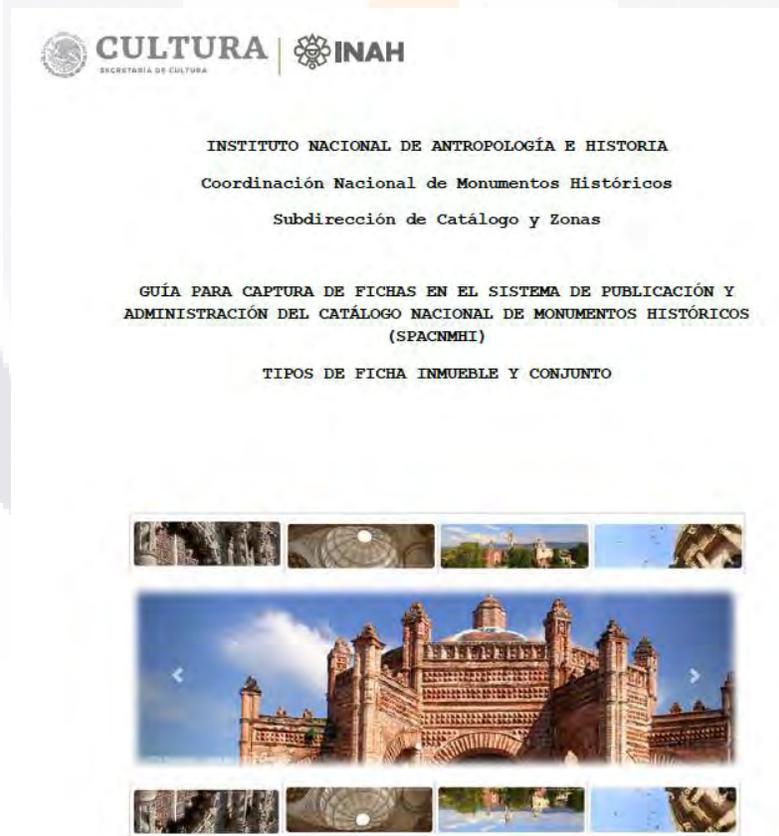


Figura 58. Guía para captura de fichas en el sistema de publicación y administración del catálogo nacional de monumentos históricos (INAH, 2022).

Una vez llenado los formatos en la página catalogonacionalmhi.inah.gob.mx, se prosiguió a dar el visto bueno para una pre - validación por parte de los encargados del INAH delegación Aguascalientes, y una vez que ya estén las fichas pre – validadas, pasará a una validación oficial, pero ahora por el INAH central del país, cumpliendo con la calificación mínima de información que se solicita para el registro de las fichas, como se muestra en la figura 60.



Figura 59. Página oficial del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles y al Centro de Documentación de la CNMH (catalogonacionalmhi.inah.gob.mx, s.f.)

FICHA NACIONAL DE CATÁLOGO

Número de captura: 1-0030400003 Calificación: **Incompleta**

[Expandir todos](#)

Los campos marcados con asterisco rojo (*) son obligatorios para solicitar la validación de la ficha.
Los campos marcados con asterisco azul (*) son requeridos para que la ficha alcance la calificación Aceptable.

TIPO DE FICHA	LOCALIZACIÓN	IDENTIFICACIÓN
ASPECTOS LEGALES	INFORMACIÓN HISTÓRICA	FUENTES CONSULTADAS
MONOGRAFÍA	CONTEXTO INMEDIATO	CARACTERÍSTICAS DEL PREDIO
DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA	CARACTERÍSTICAS FORMALES Y MATERIALES	BIENES MUEBLES E INMUEBLES POR DESTINO
ANÁLISIS DE RIESGOS	PRIORIDAD DE ATENCIÓN	ANEXOS
PARTICIPANTES	MATERIAL DE TRABAJO	DATOS COMPLEMENTARIOS
HISTORIAL DE NOTAS	HISTORIAL DE LA FICHA	

CENTRO DE DOCUMENTACION DE LA CNMH

PLANOTECA DEL AHJE	ARCHIVO HISTÓRICO JORGE ENCISO	FOTOTECA CONSTANTINO REYES-VALERIO
--------------------	--------------------------------	------------------------------------

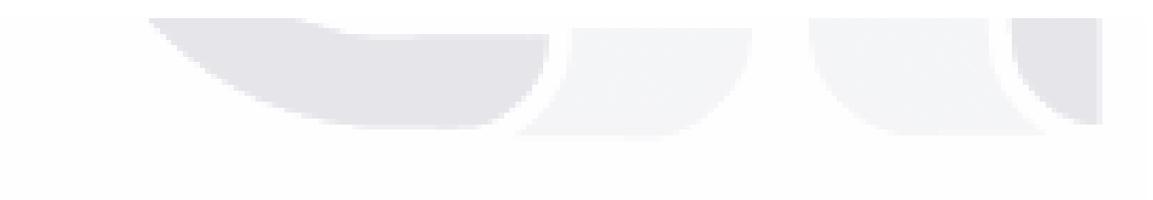
[Solicitar validación](#) [Regresar](#)

Figura 60. Requerimientos para el registro y catalogación en la página oficial del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles y al Centro de Documentación de la CNMH (catalogonacionalmhi.inah.gob.mx, s.f.).



CAPÍTULO 5. RESULTADOS

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”



5. RESULTADOS

Como resultado del presente trabajo y siguiendo la metodología de trabajo implementada, la selección de muestra se delimitó a los puentes catalogados como patrimoniales del Estado de Aguascalientes. Siendo así que el Estado cuenta con 13 puentes patrimoniales, los cuales, algunos ya cuentan con fichas documentadas, sin embargo, es información ya desactualizada o que carece de información descriptiva y gráfica. Por tales motivos, aunque la mitad de los puentes cuente ya con una ficha se procederá a realizar los modelos tridimensionales de todos los puentes a los que se les pueda aplicar la técnica de fotogrametría para su post - procesamiento, para su posterior registro y documentación. Para la planificación de trabajo primero se estableció un recorrido de rutas según la ubicación de los puentes patrimoniales, como se muestra en la figura 55.

Considerando las ubicaciones, se optó por realizar las visitas previas al trabajo en campo en 5 días diferentes, de tal forma que, se seccionó la primera parte los puentes ubicados al norte de la cabecera municipal, la segunda al sur de la misma, la tercera visita solamente al puente ubicado en Pabellón de Hidalgo, la cuarta todos los puentes ubicados en el municipio de Asientos y, por último, la quinta parte los que se encuentran en el municipio de Calvillo.

Una vez realizada las visitas y anotando las consideraciones a tomar en cada uno de los puentes para llevar a cabo el trabajo en campo, se descartó 6 de los 13 puentes patrimoniales, por las siguientes cuestiones:

- Densa vegetación: El puente Chicalote, el puente Presa Serna, Guadalupe cuentan a sus alrededores con mucha vegetación por lo que es una limitante para la aplicación de la fotogrametría o, en otras palabras, la captura de las imágenes.
- Zona privada y acceso restringido: El puente COBOS se tuvo una limitante de acceso, solamente donde se permitió el ingreso por un breve lapso de tiempo, siendo que no se podría ingresar posteriormente a realizar el trabajo.
- Área de difícil circulación: El puente Tepozán además de tener vegetación que cubría ciertas zonas del paramento del puente, la parte de rodamiento era de alta velocidad de circulación, y también, transitaban muchas camionetas de mina. El puente Guadalupe en la parte del curso del arroyo fue complicada transitarla caminando para fotografiar la parte del interior de la bóveda o arco, además de que no se encontró un acceso para poder llegar ahí.

Por lo tanto, la selección original de las muestras se redujo a la cantidad de 7 puentes patrimoniales, a los cuales, sí se les pudo aplicar la metodología de trabajo, como también, el registro para la catalogación y documentación de los puentes.

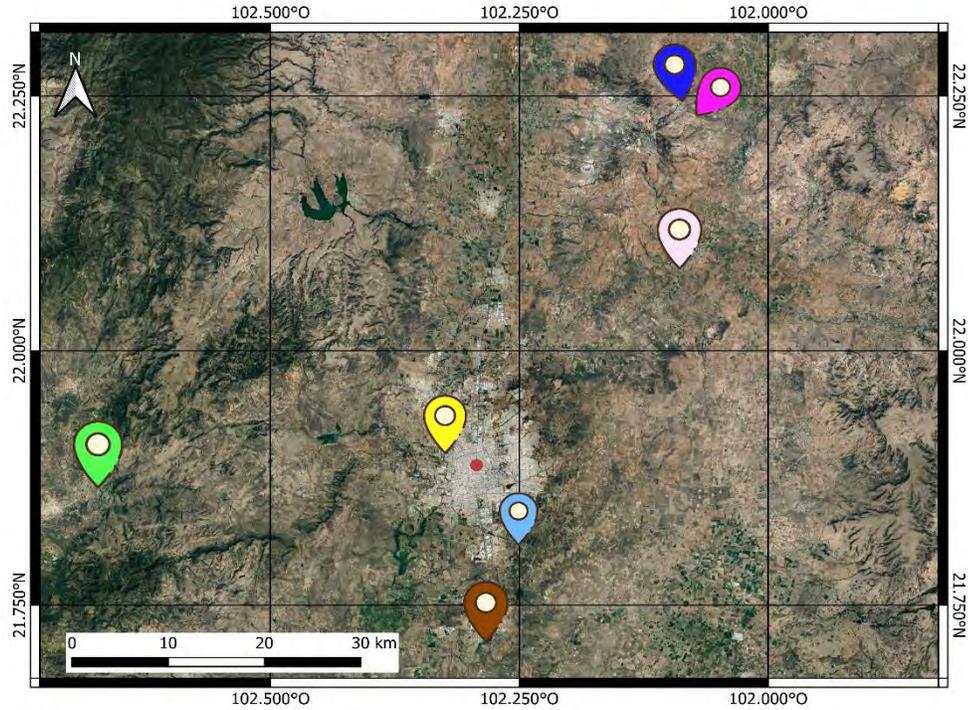


Figura 61. Ubicaciones de los puentes a los que se le aplicó la metodología de trabajo. Elaboración propia.

Tabla 12. Muestra de los puentes patrimoniales en el Estado de Aguascalientes. Elaboración propia.

No.	Puentes Patrimoniales	Ubicación (municipio)
1	San Ignacio	Aguascalientes
2	Blanco	Asientos
3	CECyTEA	Asientos
4	El Tule	Asientos
5	Tepezalilla	Calvillo
6	Peñuelas	Aguascalientes
7	Pargas	Aguascalientes

5.1. Puente San Ignacio

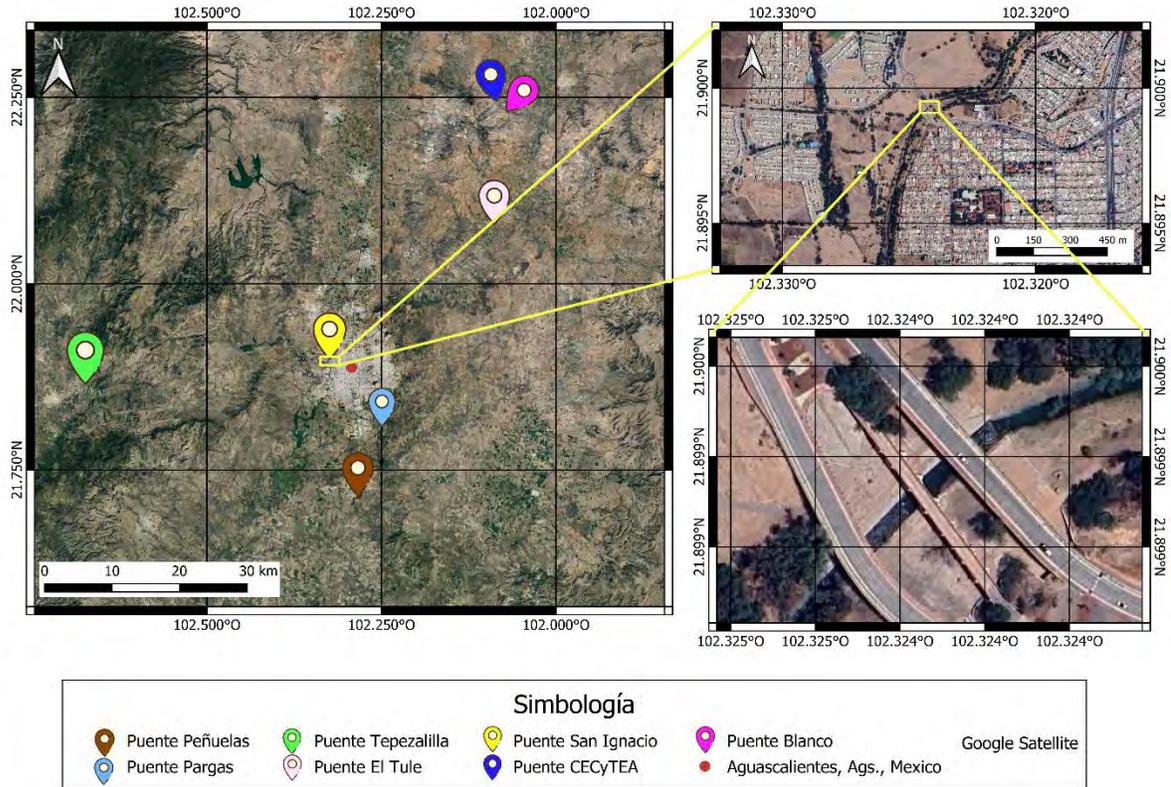


Figura 62. Ubicación del puente San Ignacio. Elaboración propia.

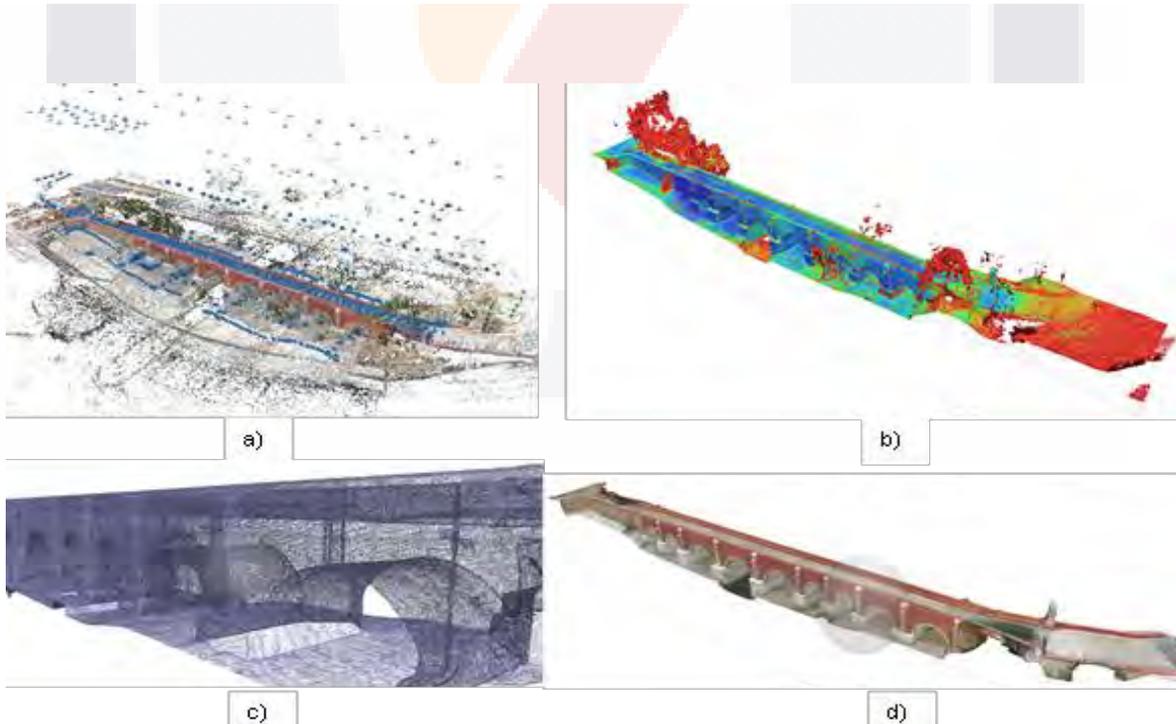


Figura 63. Modelo 3D del puente San Ignacio, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 13. Valores y tiempos en post procesamiento, puente San Ignacio. Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	1336/1108	67
Nube densa de puntos	61,493,182	58
Malla (caras/vértices)	1,949,910 / 978,416	12
Textura	-	14
GSD	2.11mm/píxel	TOTAL = 151

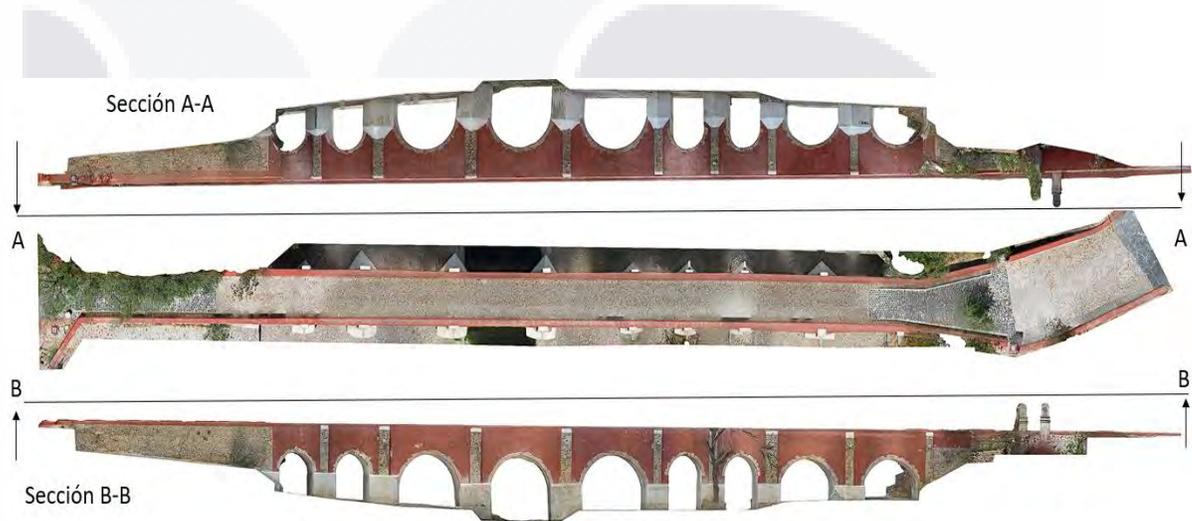


Figura 64. Ortofotos de planta y fachadas, puente San Ignacio. Elaboración propia.

- Localización: El puente se encuentra en el municipio de Aguascalientes, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son en latitud 21°53'57.31", en longitud 102°19'27.23" y en altitud 1840 msnm.
- Información histórica: Su época de construcción data en el siglo XVIII. Este puente formó parte del itinerario "Camino Real de Tierra Adentro" que iba del camino de Aguascalientes bifurcando hacia dos caminos, el camino de Calvillo y el camino a Zacatecas, pasando por este último por las haciendas de Jesús María y Pabellón de Hidalgo.
- Contexto inmediato: El puente se encuentra localizado a 3.5km al norponiente del centro histórico del municipio de Aguascalientes, donde actualmente cruza el río San Pedro. Existen 2 puentes modernos que lo rodean por ambos lados que se utilizan para el tráfico vial. Actualmente, el puente solo es de uso peatonal. Se

llega al puente por la Avenida Antiguo Camino a San Ignacio, en la colonia Línea de Fuego.

- Descripción arquitectónica: El puente fue reconstruido, por lo que el material principal de las fachadas es un aplanado color rojo oxidado, se presume que el material original es de una toba blanquecina porosa. Su longitud de rodamiento es de 105.83m, un ancho libre de 3.61m y una altura desde la corona del pretil a la parte más baja donde cruza el arroyo de 8.9m. El rodaje es un empedrado de piedra bola. El puente cuenta con 9 arcos, donde 4 son de medio punto y los 5 restantes son arcos rebajados. La luz máxima de los arcos de medio punto es de 7.17m, y la luz más grande de los arcos rebajados son de 3.82m aproximadamente. También, el inmueble cuenta con 8 tajamares y 8 contra tajamares. El puente reconstruido contiene 11 bajantes pluviales. Del lado suroriente existen aún 2 monolitos con inscripción grabadas. De igual manera, en los arcos, en la clave existe aún en estado regular- malo unas marcas que se presume simbolizaban un hecho relevante.
- Características formales y materiales: Partido arquitectónico lineal. Aplanado rojo oxidado. El pavimento es un empedrado de piedra bola.

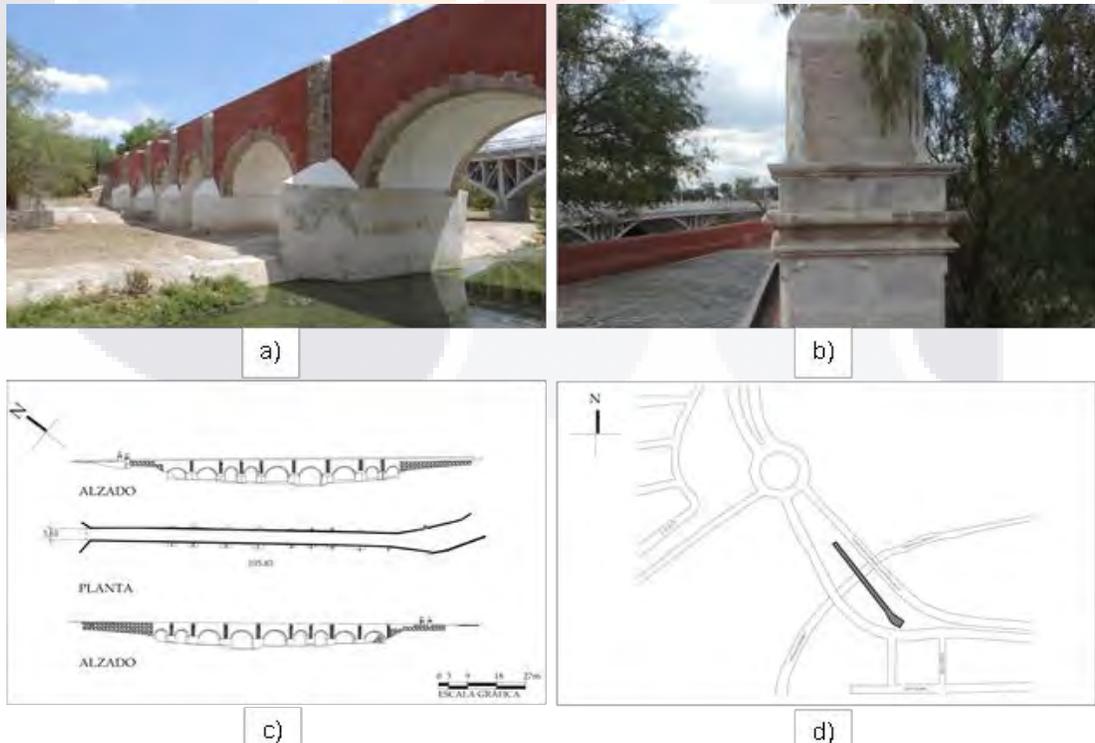


Figura 65. a) Fachada principal, b) detalle de monolito, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente San Ignacio. Elaboración propia.

5.2. Puente Blanco

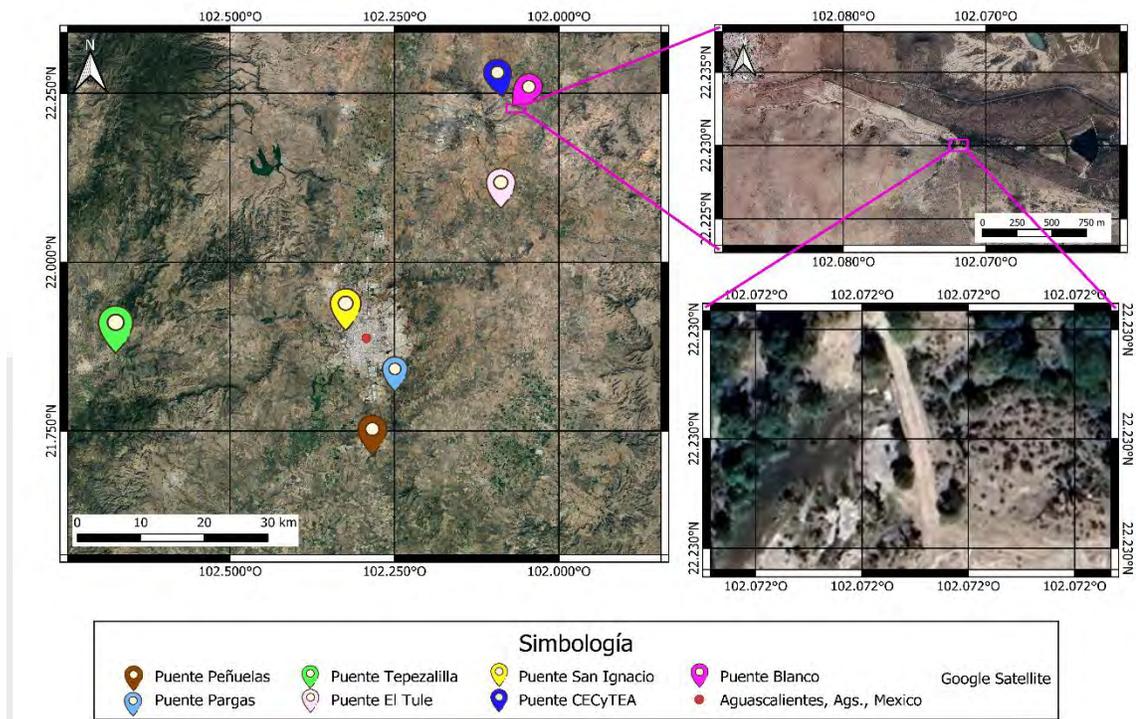


Figura 66. Ubicación del puente CECyTEA. Elaboración propia.

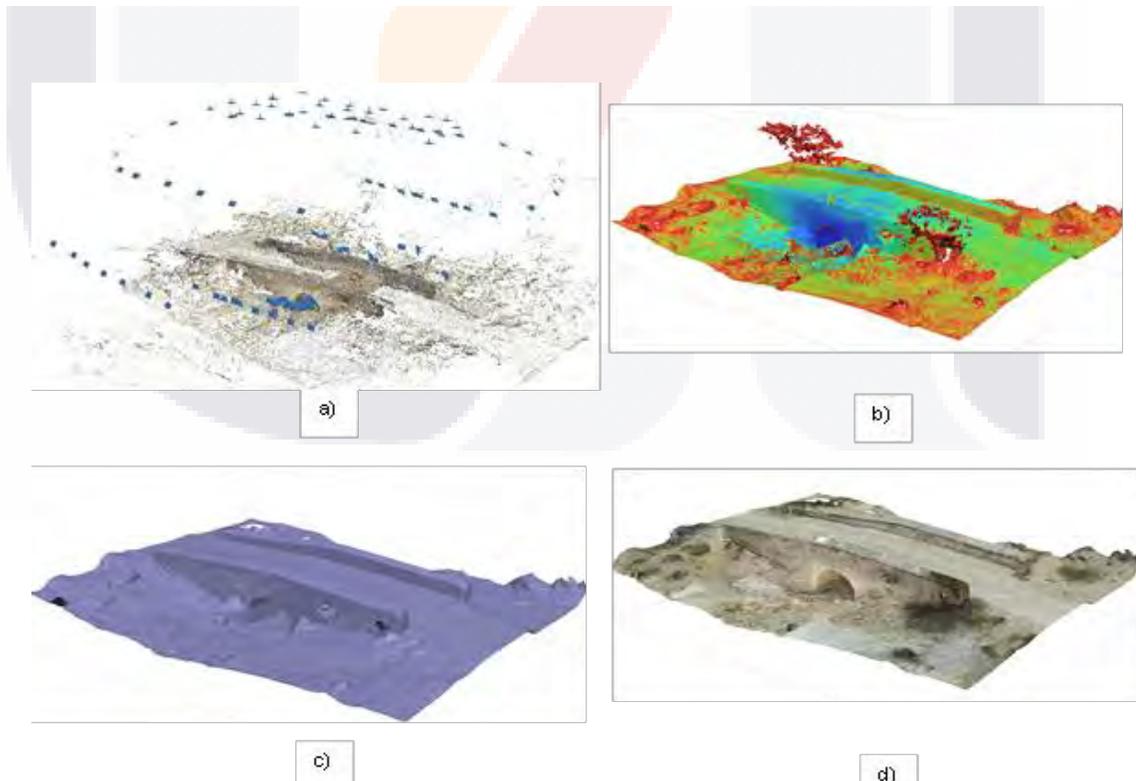


Figura 67. Modelo 3D del puente Blanco, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d)

Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 14. Valores y tiempos en post procesamiento, puente Blanco. Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	235/235	9
Nube densa de puntos	16,370,388	9
Malla (caras/vértices)	2,339,087 / 1,204,283	5
Textura	-	7
GSD	1.26 mm/píxel	TOTAL = 30

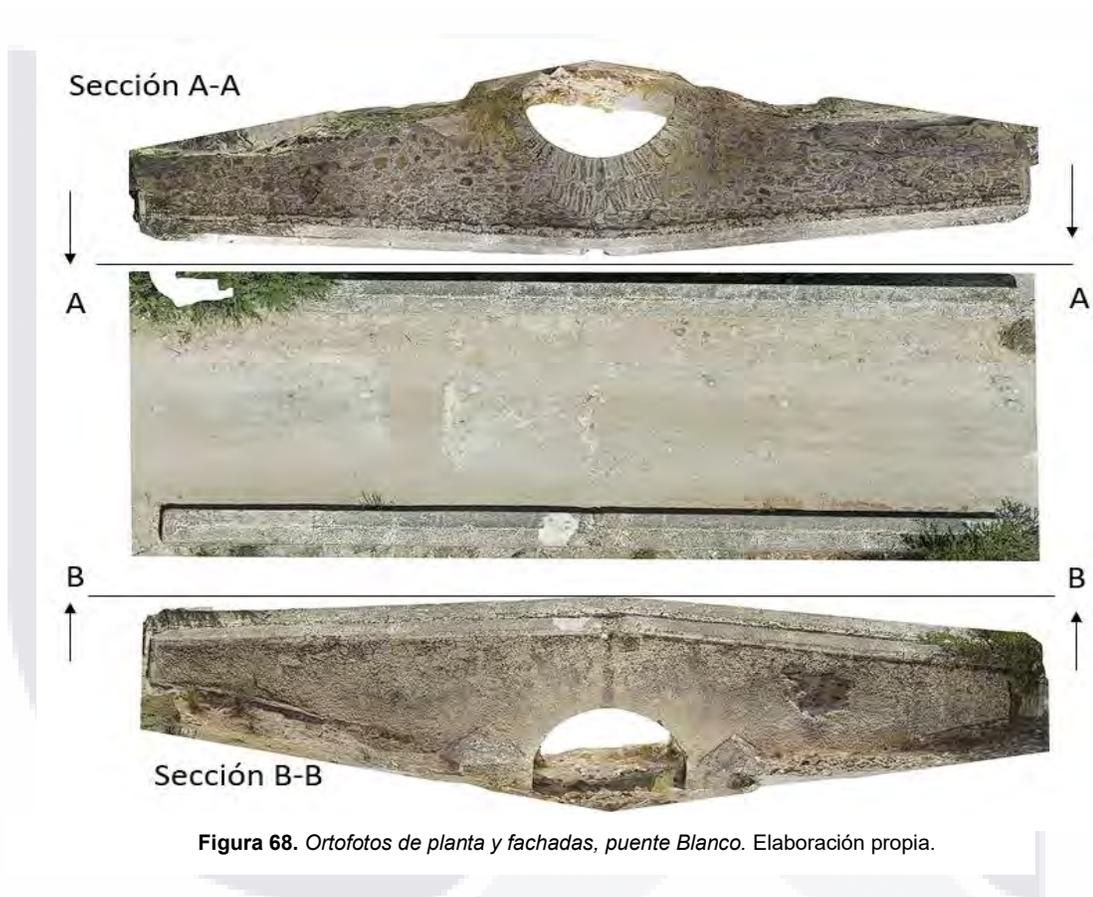


Figura 68. Ortofotos de planta y fachadas, puente Blanco. Elaboración propia.

- Localización: El puente se encuentra ubicado en el municipio de Asientos, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son en latitud $22^{\circ}13'48.10''$, en longitud $102^{\circ}4'18.86''$ y una altitud de 2114 msnm.
- Información histórica: Su época de construcción data en el siglo XVIII. Este puente formó parte del itinerario “Camino Real de Tierra Adentro” en el tramo que llevaba de Aguascalientes a Zacatecas por Cañada Honda, Santa María de Gallardo, El Tule y otras haciendas; además de ser el punto de encuentro de uno de los

ramales del camino a Zacatecas a San Luis, de acuerdo con el mapa del Estado de Aguascalientes, elaborado por Isodoro Epstein en 1857.

- Contexto inmediato: El puente se encuentra ubicado 1.8km al oriente de la cabecera municipal de Asientos, donde se presume que cruzaba un antiguo arroyo. El camino para llegar al puente es un desvío de la carretera Rincón de Romos - Loreto de terracería seguido por un empedrado de piedra bola.
- Descripción arquitectónica: El puente tiene una longitud de vía de 14.30m, un ancho de 3.68m, y una altura desde la corona hasta la parte más baja del arroyo de 3.20m. El pavimento es de piedra bola, con pretil de altura de 1.00m en su parte más alta. El puente cuenta con un arco de medio punto con una luz de 2.5m aproximadamente, dovelas en ambas fachadas de piedra y 2 tajamares en la fachada poniente.
- Características formales y materiales: El partido arquitectónico es lineal. La fachada principal es un aplanado blanco. El material predominante es piedra, con un ancho del paramento de 0.65m. La forma de entrepiso es abovedada de cañón. El pavimento es un empedrado de piedra bola.

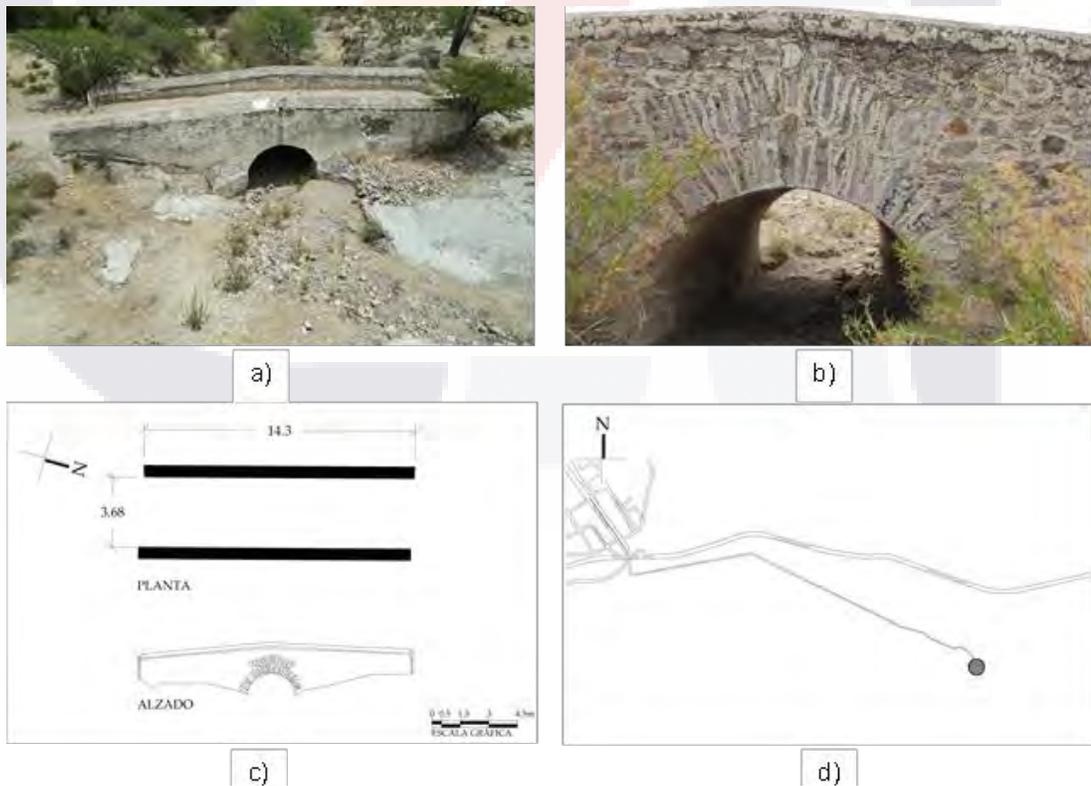


Figura 69. a) Fachada principal, b) detalle de arco y dovelas, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente Blanco. Elaboración propia.

5.3. Puente CECyTEA

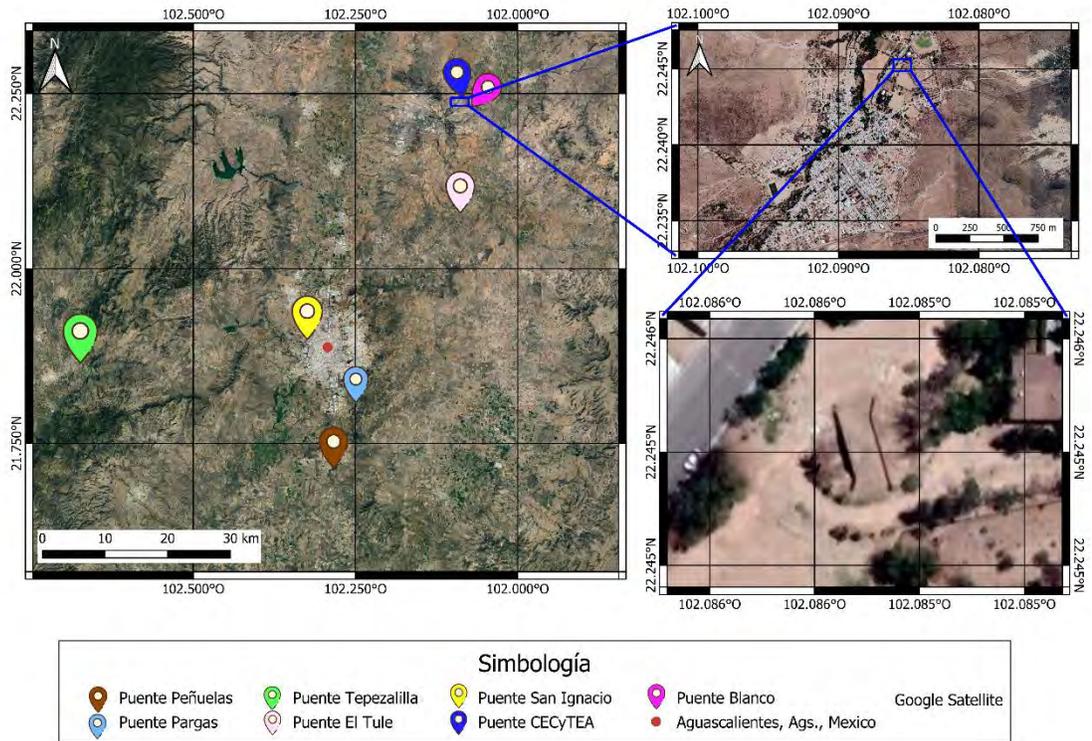


Figura 70. Ubicación del puente CECyTEA. Elaboración propia.

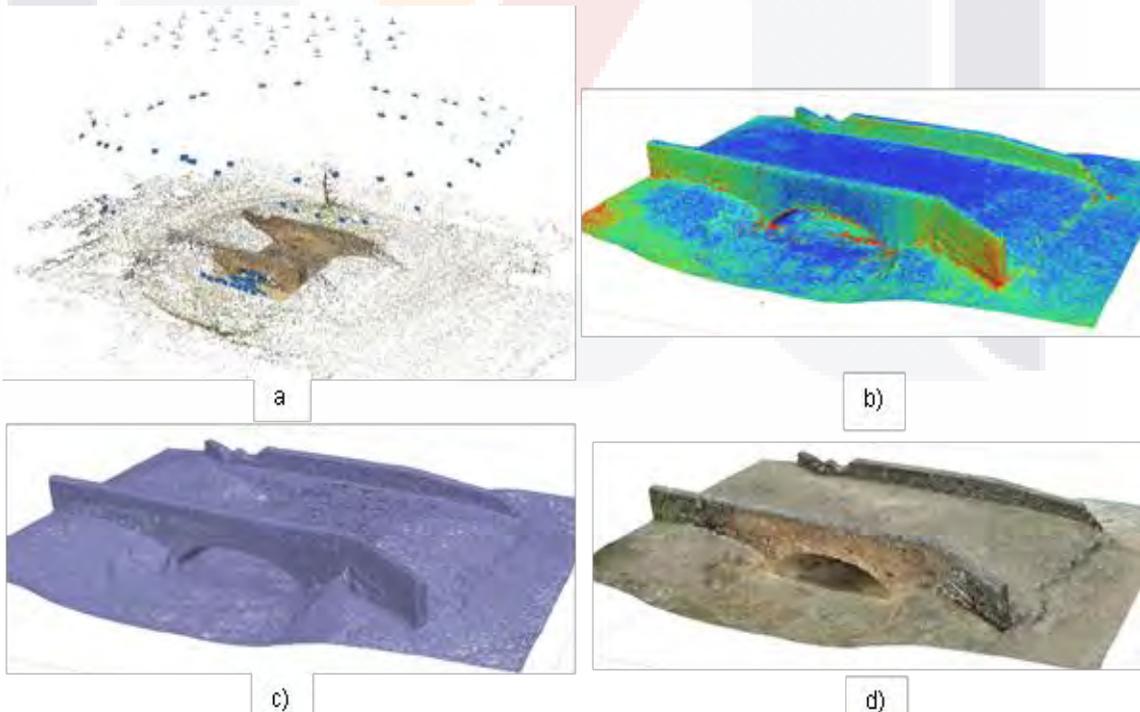


Figura 71. Modelo 3D del puente CECyTEA, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d)

Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 15. Valores y tiempos en post procesamiento, puente CECyTEA. Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	230/229	8
Nube densa de puntos	7,339,528	10
Malla (caras/vértices)	730,695 / 637,709	4
Textura	-	6
GSD	2.06 mm/píxel	TOTAL = 28



Figura 72. Ortofotos de planta y fachadas, puente CECyTEA. Elaboración propia.

- Localización: El puente se encuentra ubicado en el municipio de Asientos, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son en latitud 22°14'43.44", en longitud 102°5'7.78' y en altitud 2168 msnm.
- Información histórica: Su época de construcción data en el siglo XVIII. Este puente formó parte del itinerario "Camino Real de Tierra Adentro" en el tramo Real de Asientos a San Francisco de los Adame en Zacatecas, de acuerdo al mapa del

Estado de Aguascalientes, elaborado por Isidoro en 1857. Se desconoce la fecha en la que pasó a ser propiedad del CECyTEA.

- Contexto inmediato: El puente se ubica a dentro de las instalaciones del CECyTEA al norte del municipio de Real de Asientos.
- Descripción arquitectónica: El puente tiene una longitud de rodamiento de 17.67m, un ancho de 5.8m, y una altura desde la corona a la parte más baja del arroyo de 2.8m. El pavimento es de piedra bola, con pretil de altura de 1.3m. El puente cuenta con un arco tipo escarzano con dovelas en ambas fachadas del puente, con una luz de 5.7m.
- Características formales y materiales: El partido arquitectónico es lineal. El material predominante es piedra bola asentado de manera irregular con morteros y rajuela de piedra. Los muros o paramento son de piedra con un ancho del pretil de 0.40m. La estructura de entre piso es de piedra en forma abovedada. El pavimento es un empedrado de piedra bola.

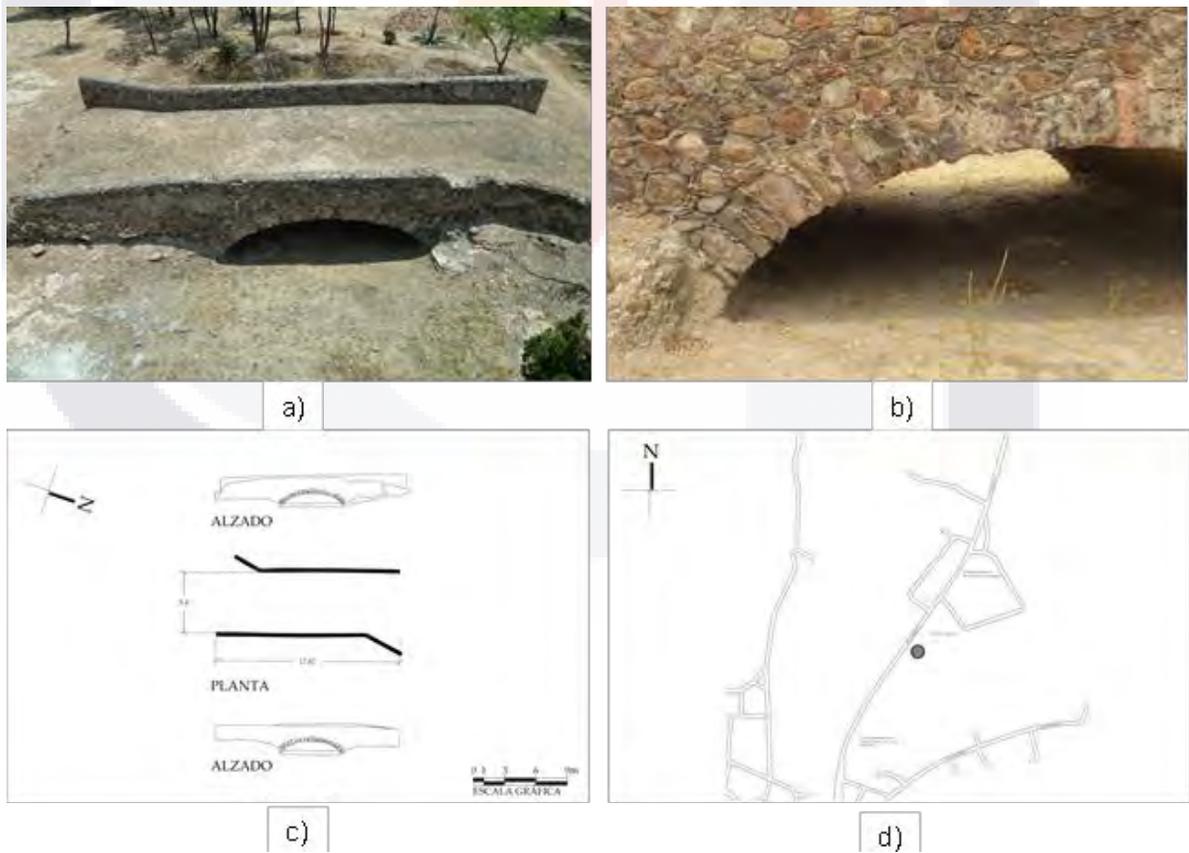


Figura 73. a) Fachada principal, b) detalle de arco y dovela, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente CECyTEA. Elaboración propia.

5.4. Puente El Tule

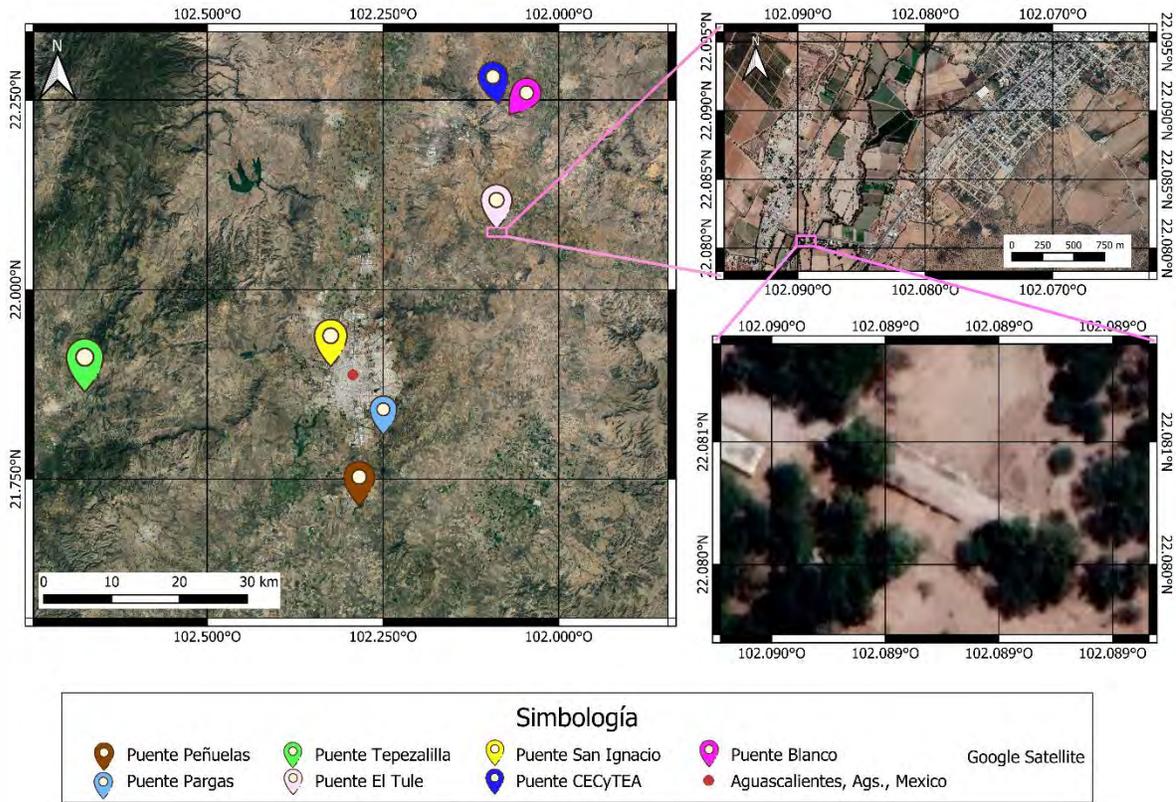


Figura 74. Ubicación del puente El Tule. Elaboración propia.

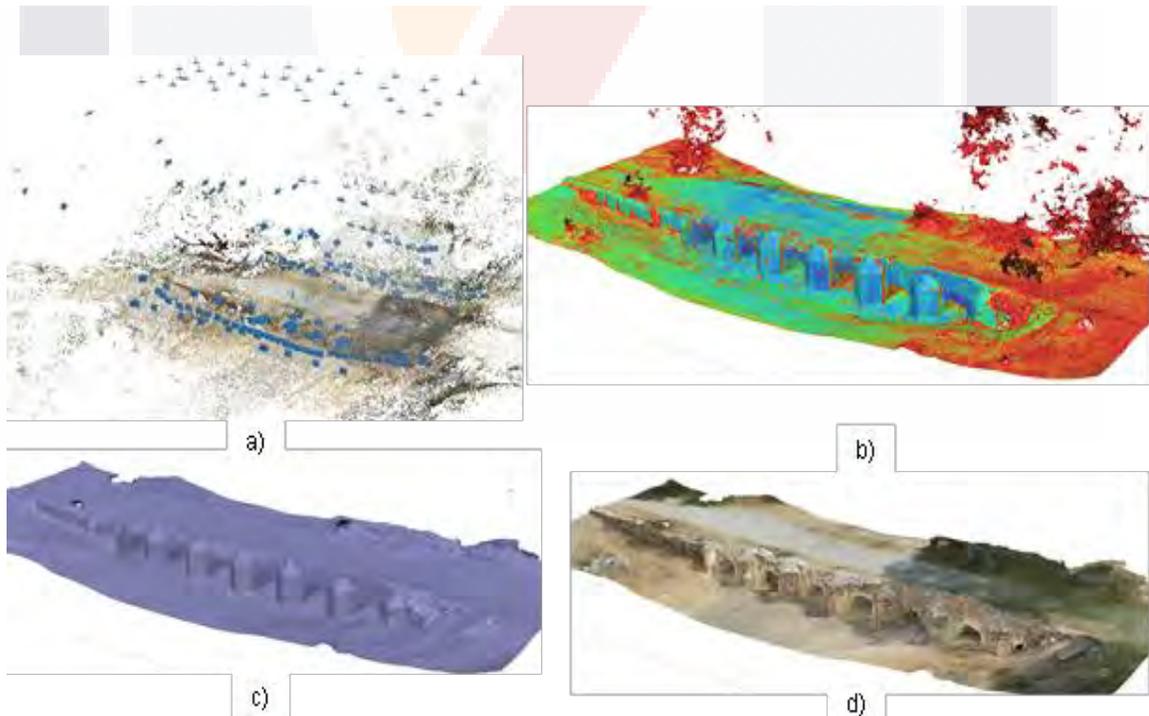


Figura 75. Modelo 3D del puente El Tule, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 16. Valores y tiempos en post procesamiento, puente El Tule. Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	496/482	20
Nube densa de puntos	29,334,694	21
Malla (caras/vértices)	4,306,616 / 2,157,922	10
Textura	-	13
GSD	1.40 mm/píxel	TOTAL = 64



Figura 76. Ortofotos de planta y fachadas, puente El Tule. Elaboración propia.

- Localización: El puente se encuentra ubicado en Asiento, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son en latitud 22°4'49.72", en longitud 102°5'21.48" y en altitud 1987 msnm.
- Información histórica: Su época de construcción data en el siglo XVIII. Este puente formó parte del itinerario "Camino Real de Tierra Adentro" en el tramo que llevaba de Asientos a Aguascalientes por las haciendas de Viudas de Oriente, El Tule,

Santa María de Gallardo y Cañada Honda, de acuerdo con el mapa del Estado de Aguascalientes, elaborado por Isidoro Epstein en 1857.

- Contexto inmediato: Ubicado a 300m de la comunidad El Tule y 560m de la carretera Aguascalientes – San Marcos, cruzando un arroyo sobre un camino de terracería.
- Descripción arquitectónica: El puente El Tule tiene una longitud de rodamiento aproximada de 35.67m, un ancho de 5.92m y una altura desde la corona a la parte más baja del arroyo de 2.60m. El pavimento es de terracería. Cuenta con 7 arcos de medio punto, sin embargo, por condiciones ambientales, el puente se encuentra semi enterrado. La luz es de 1.6m del arco más ancho, además, tiene dovelas de piedra conglomerada. La fachada en la orientación norte cuenta con 7 tajamares, y una abertura a los costados entre los arcos como una especie de encajonamiento para puertas.
- Características formales y materiales: El acabado de la fachada principal es de mamposteo de piedra bola colocado de manera irregular, asentada con morteros y rajuela de piedra. El ancho del paramento es de 0.60m. La estructura de entre piso es de piedra. El rodamiento está conformado por una terracería.

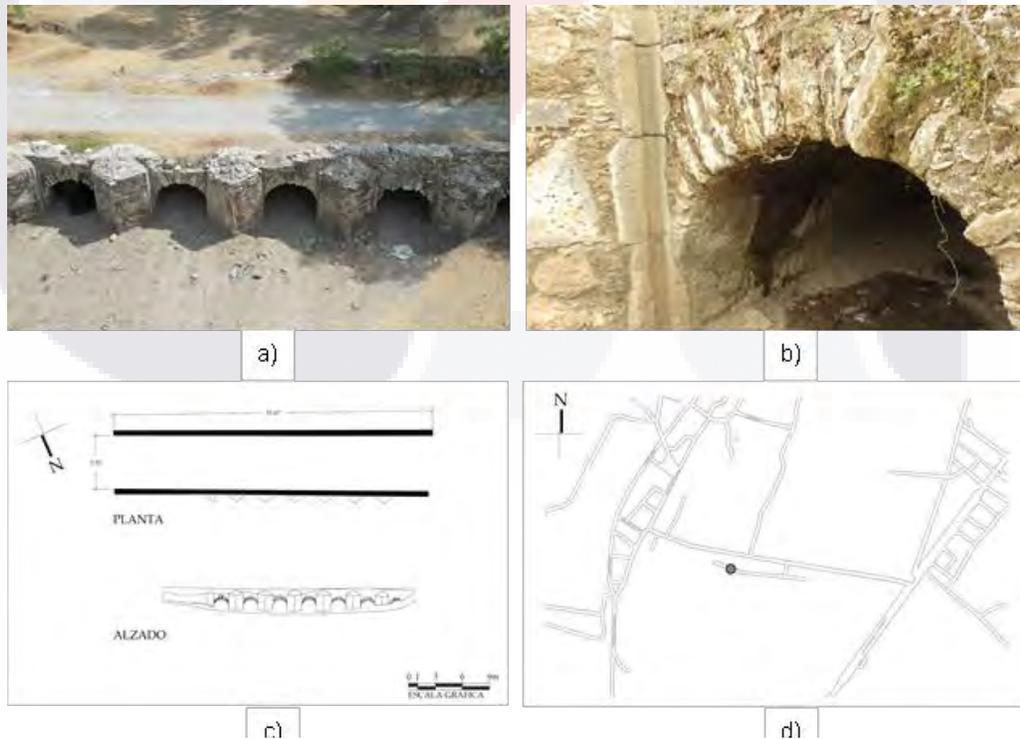


Figura 77. a) Fachada principal, b) detalle de arco, dovelas y estructura para puerta, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente El Tule. Elaboración propia.

5.5. Puente Tepezalilla

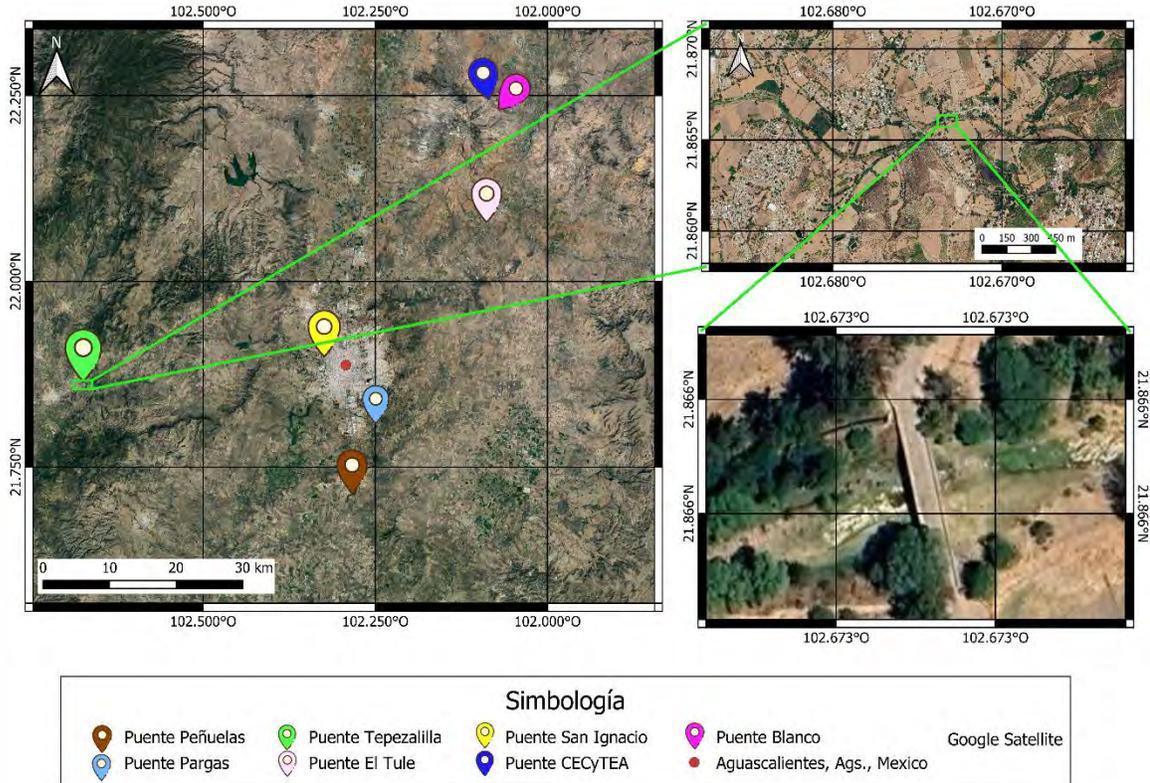


Figura 78. Ubicación del puente Tepezalilla. Elaboración propia.

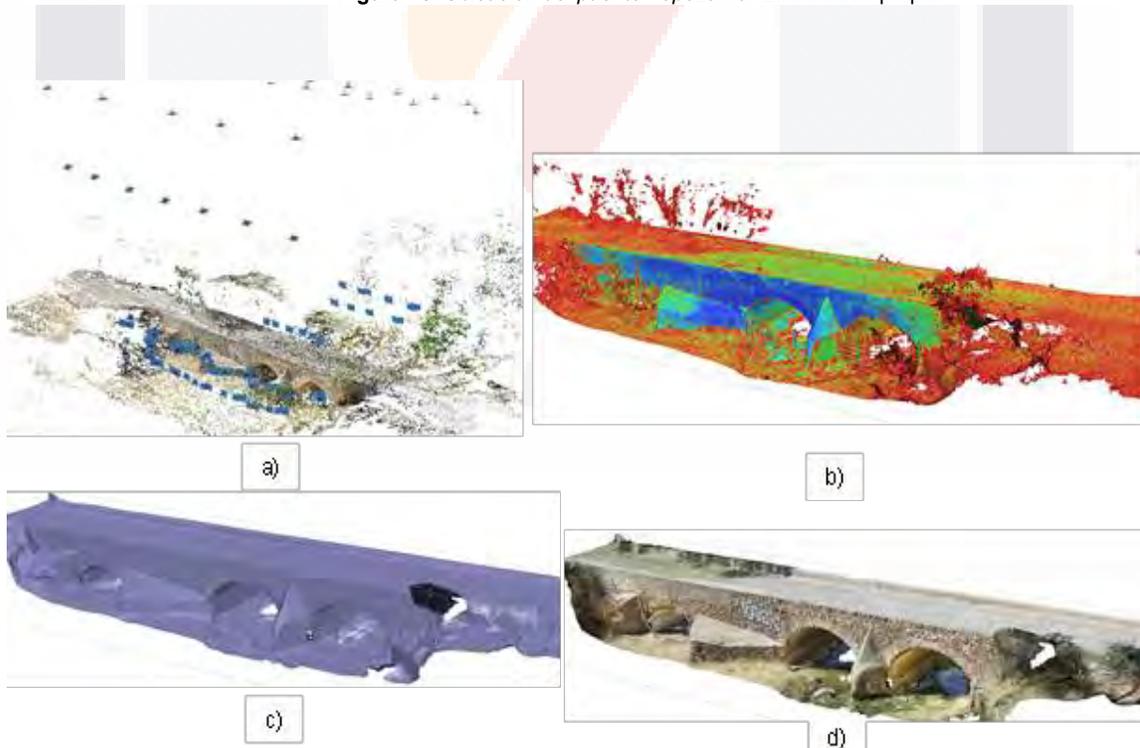


Figura 79. Modelo 3D del puente Tepezalilla, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 17. *Valores y tiempos en post procesamiento, puente Tepezalilla.* Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	351/256	15
Nube densa de puntos	61,493,182	9
Malla (caras/vértices)	1,949,910 / 978,416	13
Textura	-	6
GSD	2.11mm/píxel	TOTAL = 43

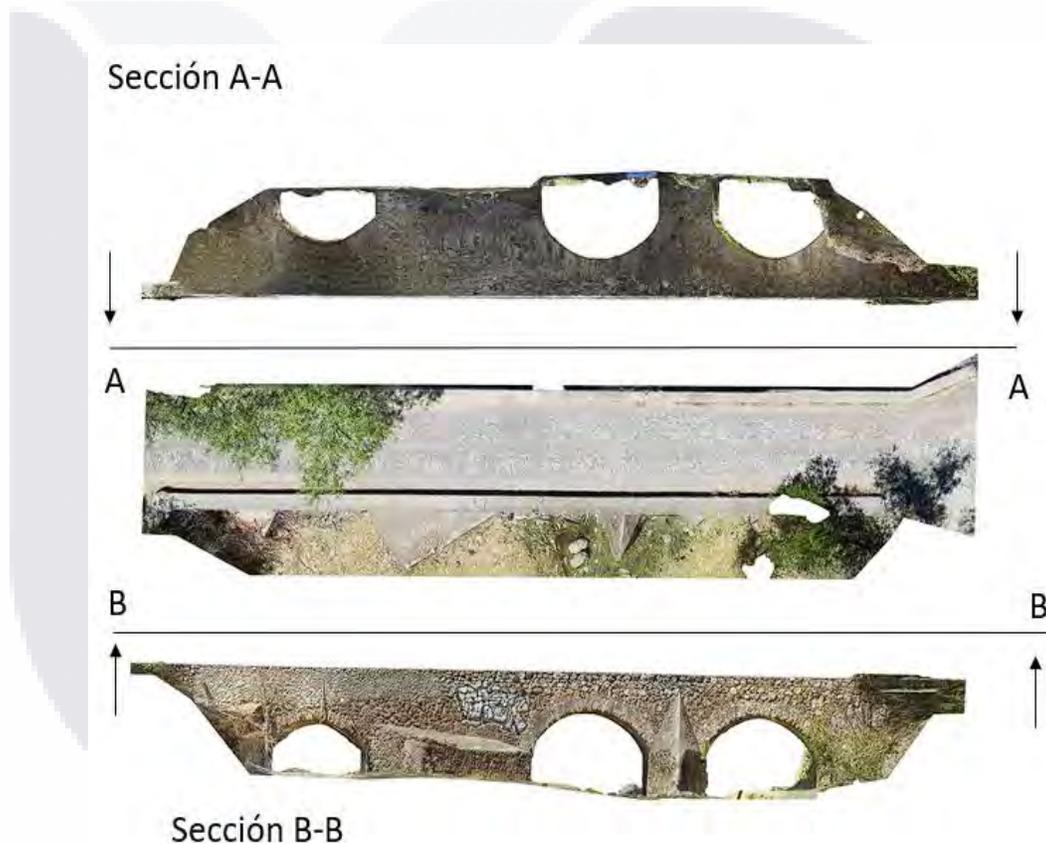


Figura 80. *Ortofotos de planta y fachadas, puente Tepezalilla.* Elaboración propia.

- Localización: El puente se encuentra ubicado en Calvillo, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son en latitud 21°51'57.59", en longitud 102°40'23.96" y en altitud 1670 msnm.
- Información histórica: Su época de construcción data en el siglo XVIII. Este puente formó parte del camino a Calvillo que llevaba de Aguascalientes a esta comunidad por Curtidores, Cieneguita, El Sauz y Tepezalilla, de acuerdo con el mapa del Estado de Aguascalientes, elaborado por Isodoro Epstein en 1857.

- Contexto inmediato: El puente se ubica a 230m de la comunidad Tepezalilla al poniente de este, y a 1km al sur de Ojocaliente que cruza el río Adolfo López Ballin, siguiendo un camino empedrado de piedra bola.
- Descripción arquitectónica: El puente tiene una longitud de rodaje de 35.38m aproximadamente, un ancho de 4.04m y una altura desde la corona a la parte más baja del paso de arroyo actual de 4.40m. El pavimento es un empedrado de piedra bola, con pretil de 0.50m de altura. El puente cuenta con 3 arcos, 2 de tipo medio punto y el otro de tipo escarzano, con una luz de 4.60m y 4.20m respectivamente. Tiene 3 tajamares entre arcos de forma piramidal.
- Características formales y materiales: El partido arquitectónico es lineal. El acabado de la fachada principal es de mamposteo de piedra braza, asentado con mortero de manera irregular y rajuelas de piedra. El ancho del paramento es de 0.50m. La techumbre es de forma abovedada de cañón corrido, con un fondo de 5.20m. El pavimento es un empedrado de piedra bola.

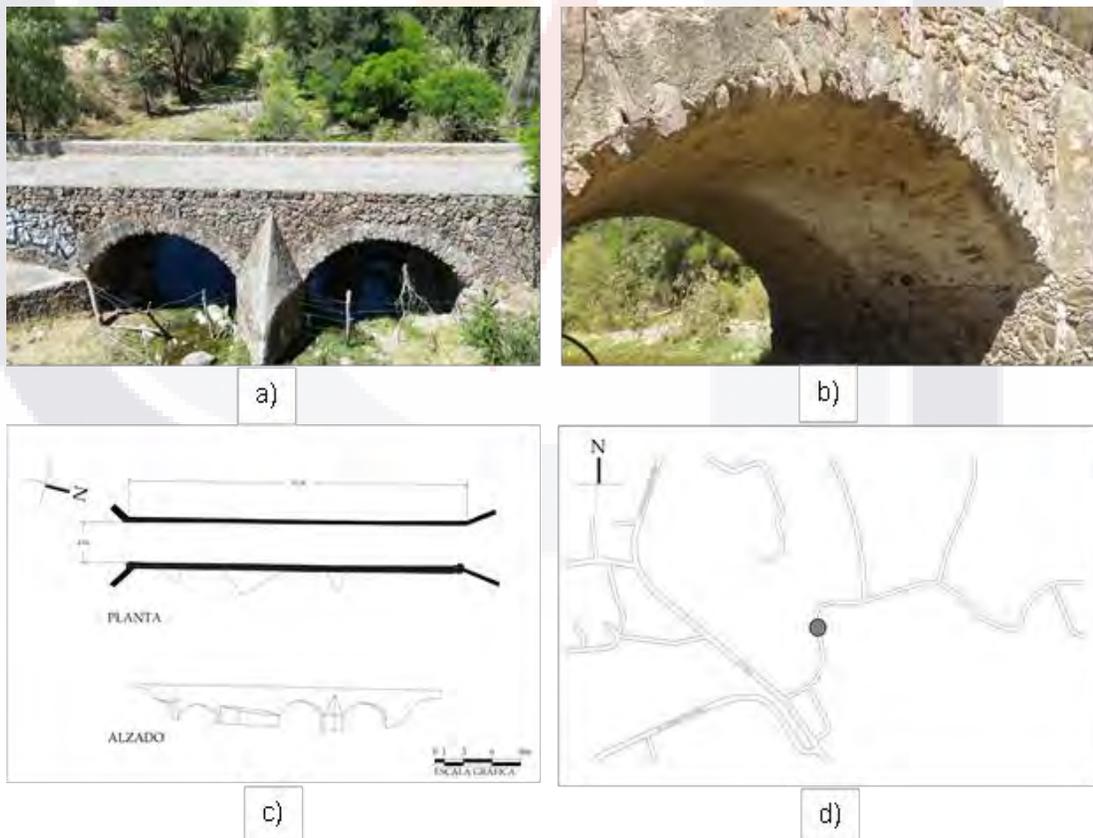


Figura 81. a) Fachada principal, b) detalle de arco y dovelas, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente El Tule. Elaboración propia.

5.6. Puente Peñuelas

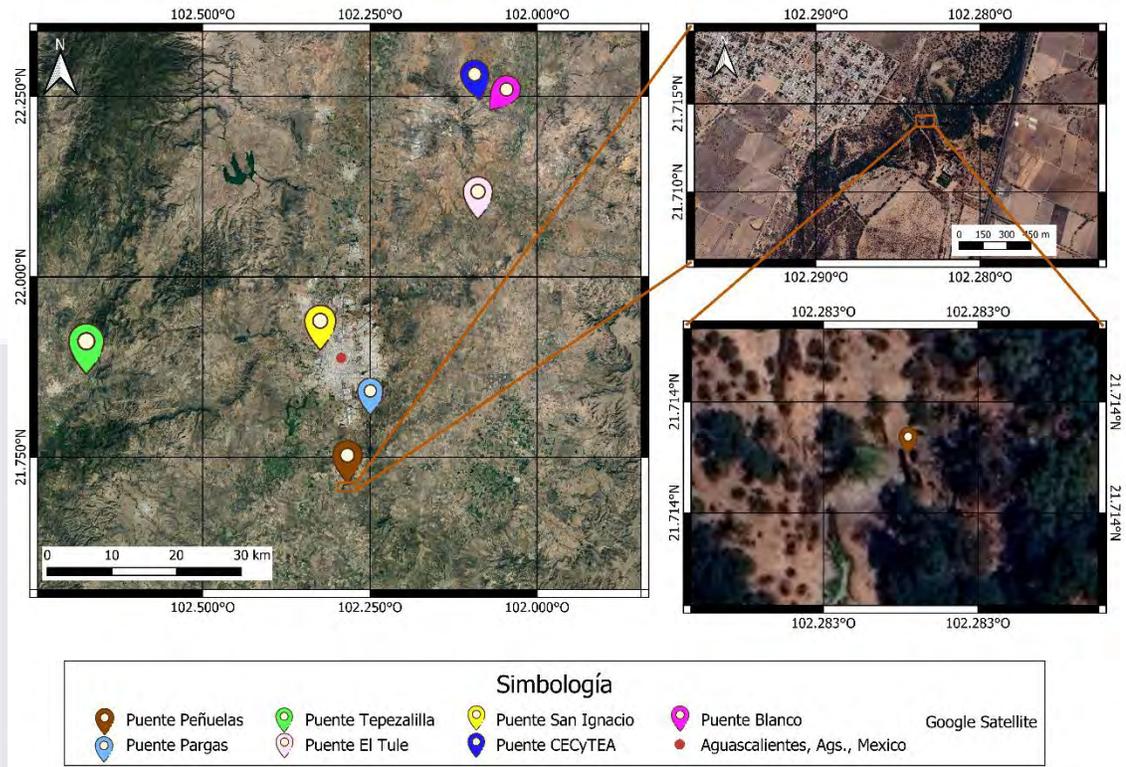


Figura 82. Ubicación del puente Peñuelas. Elaboración propia.

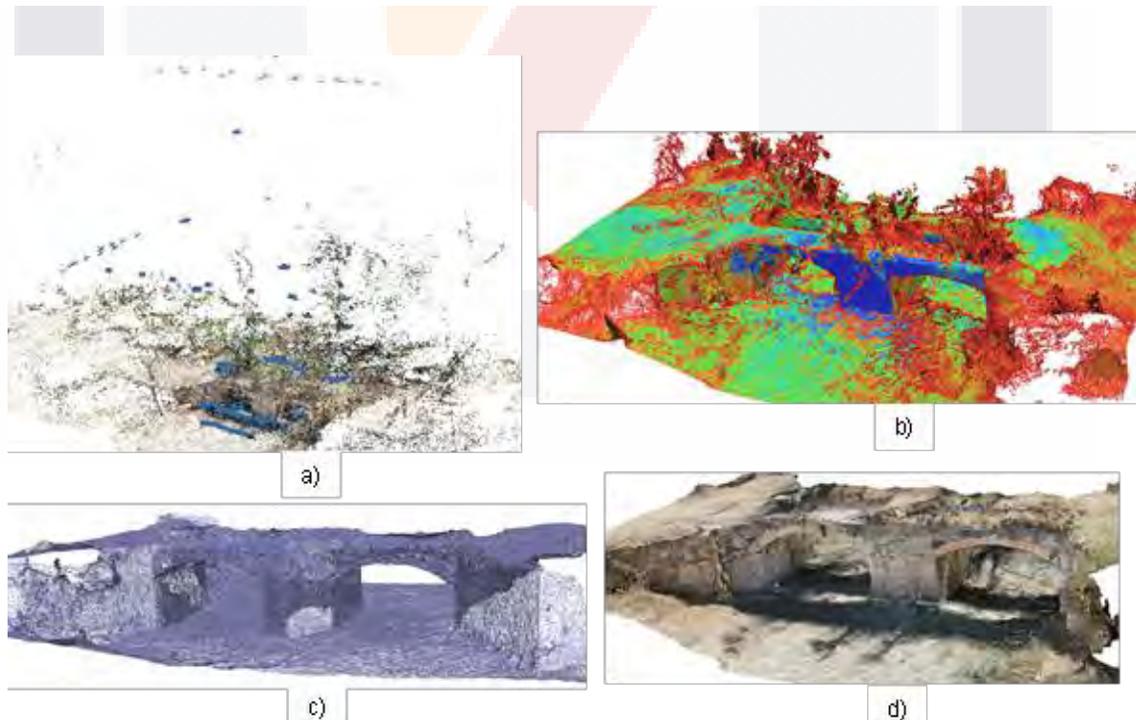


Figura 83. Modelo 3D del puente Peñuelas, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 18. Valores y tiempos en post procesamiento, puente Peñuelas. Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	478/473	8
Nube densa de puntos	9,829,805	14
Malla (caras/vértices)	506,883 / 281,223	6
Textura	-	5
GSD	2.12 mm/píxel	TOTAL = 33



Figura 84. Ortofotos de planta y fachadas, puente Peñuelas. Elaboración propia.

- Localización: El puente se encuentra ubicado en Aguascalientes, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son en latitud 21°42'50.79", en longitud 102°17'0.13" y en altitud 1857 msnm.
- Información histórica: Su época de construcción data en el siglo XVIII. Este puente formó parte del itinerario "Camino Real de Tierra Adentro" en un tramo de conexión entre el camino de Aguascalientes para México por la Encarnación, y otra de menor jerarquía que comunicaba la hacienda de Peñuelas con la de Santa Inés,

de acuerdo con el mapa del Estado de Aguascalientes, elaborado por Isodoro Epstein en 1857.

- Contexto inmediato: El puente se encuentra aproximadamente a 18km al sur de la cabecera municipal de Aguascalientes, a las afueras de la Ex Hacienda Peñuelas, y 350m al oriente de la comunidad El Refugio de Peñuelas. La zona de alrededor es de densa vegetación, donde se presume que cruzaba un pequeño arroyo para el paso a carruajes de la época.
- Descripción arquitectónica: El puente tiene una longitud de rodamiento de 10m, un ancho de 3.30m, y una altura desde el rodaje al rodamiento a la parte más baja del arroyo de 2.75m. EL pavimento es de piedra bola, no cuenta con pretil porque ha colapsado. El puente cuenta con dos bóvedas de cañón corrido tipo escarzano con dovelas de tabique rojo en ambas fachadas del puente, una luz de 3.70m.
- Características formales y materiales: El partido arquitectónico es lineal. La fachada principal es de un mampuesto de piedra y tabique, asentado de manera irregular con mortero y rajuelas de piedra. La estructura vertical es un pilar de sección rectangular de 2.20m por 3.30m. La forma de entepiso es abovedada. La pavimentación es de piedra bola aterrado.

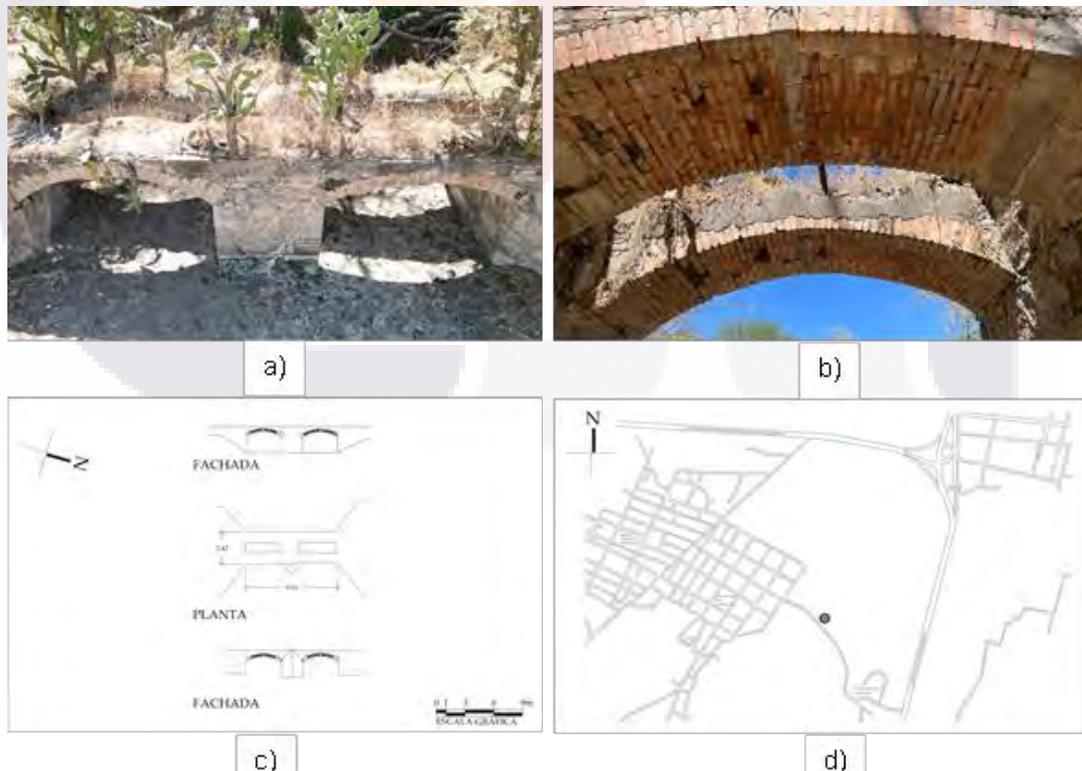


Figura 85. a) Fachada principal, b) detalle de arco y dovelas, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente Peñuelas. Elaboración propia.

5.7. Puente Pargas

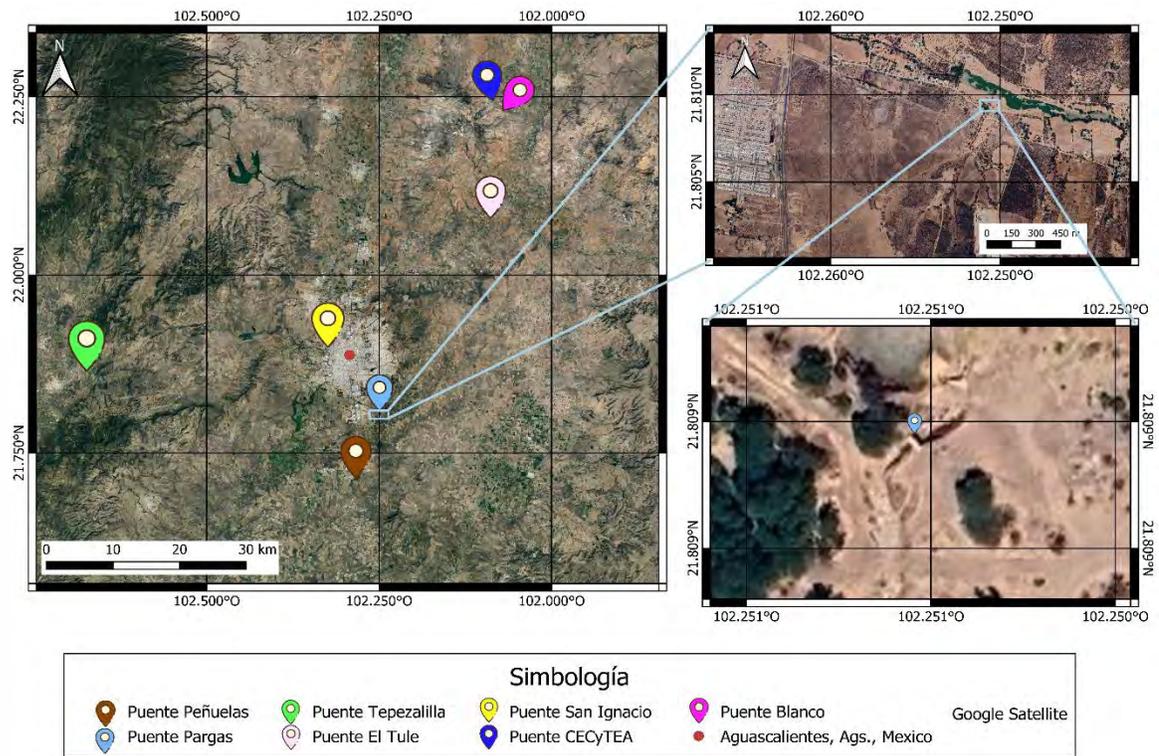


Figura 86. Ubicación del puente Pargas. Elaboración propia.

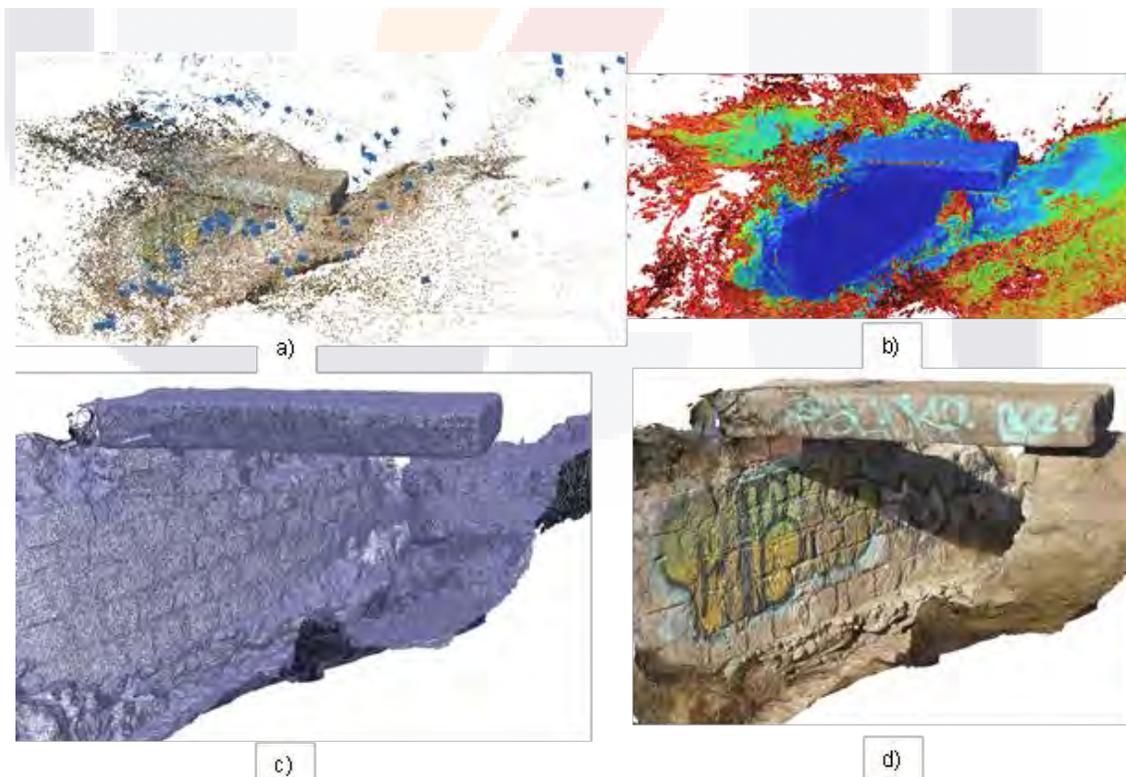


Figura 87. Modelo 3D del puente Pargas, a) Nube dispersa de puntos, b) Nube densa de puntos, c) Malla y d) Texturizado. Elaboración propia.

Tabla 19. Valores y tiempos en post procesamiento, puente Pargas. Elaboración propia.

Etapa (proceso)	Valor	Tiempo (min)
Cámaras/Orientadas	165/163	6
Nube densa de puntos	12,637,825	7
Malla (caras/vértices)	489,352 / 245,882	4
Textura	-	4
GSD	2.01mm/píxel	TOTAL = 21

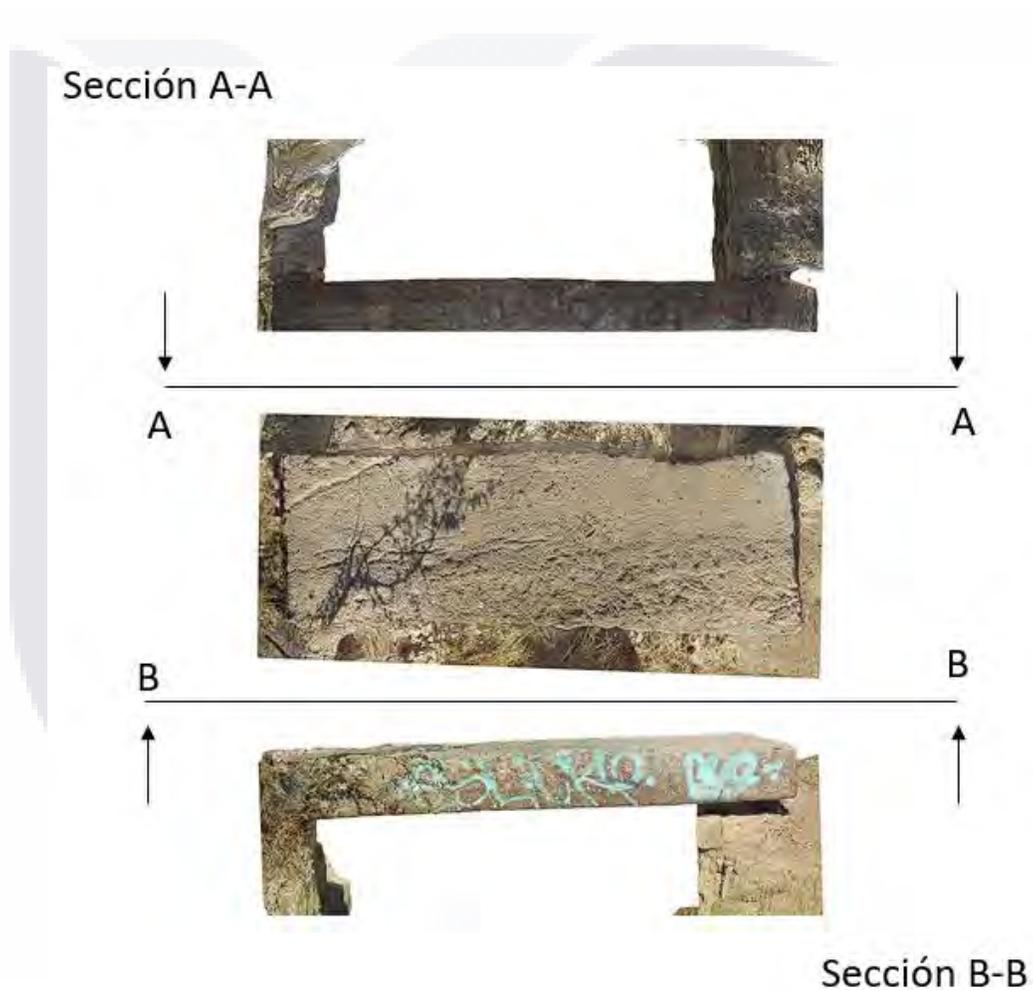


Figura 88. Ortofotos de planta y fachadas, puente Pargas. Elaboración propia.

- Localización: El puente se ubica en el municipio de Aguascalientes, Aguascalientes. Sus coordenadas geográficas son latitud 21°48'33.71", longitud 102°15'2.02" y altitud 1908 msnm.
- Información histórica: Este puente no se encontró en el mapa del Estado de Aguascalientes, elaborado por Isodoro Epstein en 1857.

- Contexto inmediato: Se encuentra aproximadamente a 8km al sur de la cabecera municipal del Estado de Aguascalientes, a un costado de la presa Pargas, donde se presume que cruzaba un pequeño arroyo, recorriendo una vereda.
- Descripción arquitectónica: El puente es un elemento pétreo monolítico o dintel de 3m de longitud y 1m de ancho, apoyado sobre dos puntos, con una altura desde la parte más alta de la losa a la parte más baja del arroyo de 2.5m.
- Características formales y materiales: El partido arquitectónico es lineal. La estructura horizontal es un elemento pétreo monolítico. Los apoyos son sobre dos puntos altos del terreno, estabilizado en las paredes con un mamposteo de piedra y asentado con mortero.



Figura 89. a) Fachada principal, b) detalle por debajo de puente, c) croquis arquitectónico y d) croquis de localización del puente Pargas. Elaboración propia.

CAPÍTULO 6. DISCUSIONES

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”



6. DISCUSIONES

Con los modelos 3D obtenidos a partir de la metodología implementada, se observa que, hay variaciones respecto a los tiempos del post procesamiento, como se muestra en la tabla 20, y a la vez, las diferencias en el número de puntos, caras y vértices generados de cada puente. Esto es debido a la envergadura, complejidad y estereotomía propia de cada puente patrimonial al que se le aplicó la metodología. Por tales motivos, cada puente tuvo un número diferente de fotografías capturadas, donde en el post procesamiento hubo variaciones respecto al total de imágenes captadas y las orientadas, como se muestra en la tabla 22.

Tabla 20. *Tiempos en el post procesamiento total.* Elaboración propia.

No	Puente	Tiempo post procesamiento (min)
1	San Ignacio	151
2	Blanco	30
3	CECyTEA	28
4	El Tule	64
5	Tepezalilla	43
6	Peñuelas	33
7	Pargas	21

Tabla 21. *Efectividad (%) entre la captura de fotografías y la orientación de estas.* Elaboración propia.

No.	Puente	Fotografías capturadas	Orientadas	Efectividad (%)
1	San Ignacio	1336	1108	83
2	Blanco	235	235	100
3	CECyTEA	230	229	99
4	El Tule	496	482	97
5	Tepezalilla	351	296	84
6	Peñuelas	478	473	99
7	Pargas	165	163	99

Por otro lado, el trabajo en campo influyó de manera significativa para estimar el nivel de confiabilidad de los puntos en la nube densa, donde los factores más influyentes para que un modelo se generara con alta confiabilidad en sus resultados fueron: el número de imágenes capturadas, como también, la distancia del objeto a la cámara, el posicionamiento y la calidad de cada imagen tomada; esto en función del contexto de los alrededores de cada puente patrimonial puesto que, para el trabajo en campo, era lo que influía para la adquisición de la información digital según las condiciones de cada inmueble.

6.1. Puente San Ignacio

Para el puente de San Ignacio, tanto el trabajo en campo como el trabajo en gabinete fue el que tomó más tiempo, evidentemente por ser el puente más grande, en el cual se tuvieron que tomar aproximadamente más de 1300 fotografías para su recreación virtual, aunque no se pudieron orientar todas las imágenes. Además, tomó alrededor de dos horas y media para su reconstrucción tridimensional. El puente de San Ignacio fue la única muestra de las seleccionadas en el cual se tuvo que realizar el trabajo en campo en 3 días diferentes. El primero para la obtención de la información de los arcos y al interior de ellos con la cámara semi profesional; el segundo para la captura de las fotografías a través del dron utilizado, sin embargo, por la limitación del tiempo de vuelo, se tuvo que hacer un levantamiento más en un tercer día para completar la información digital. Como se puede observar en la figura 90, las zonas con puntos rojos de la nube densa generada son árboles de tamaño considerable, que para la fotogrametría son obstrucciones para la adquisición de información, y esto da impedimento para la creación del enmallado que es lo que recrea la geometría del inmueble, generándose de esta manera huecos en el modelo como se puede apreciar en la figura 91. También, otro factor donde por medio del programa se estimó baja confiabilidad de los puntos fue donde cruza actualmente el arroyo del Río San Pedro, por dos razones; la primera es por la limitante de transitar por debajo del arco donde cruza dicho arroyo para la toma de las fotografías, y la otra, por el reflejo del flujo del agua, por lo que el programa no procesa este tipo de zonas porque lo interpreta como información nula o inexistente. Aun así, se logró modelar de manera adecuada la mayor parte del puente San Ignacio.

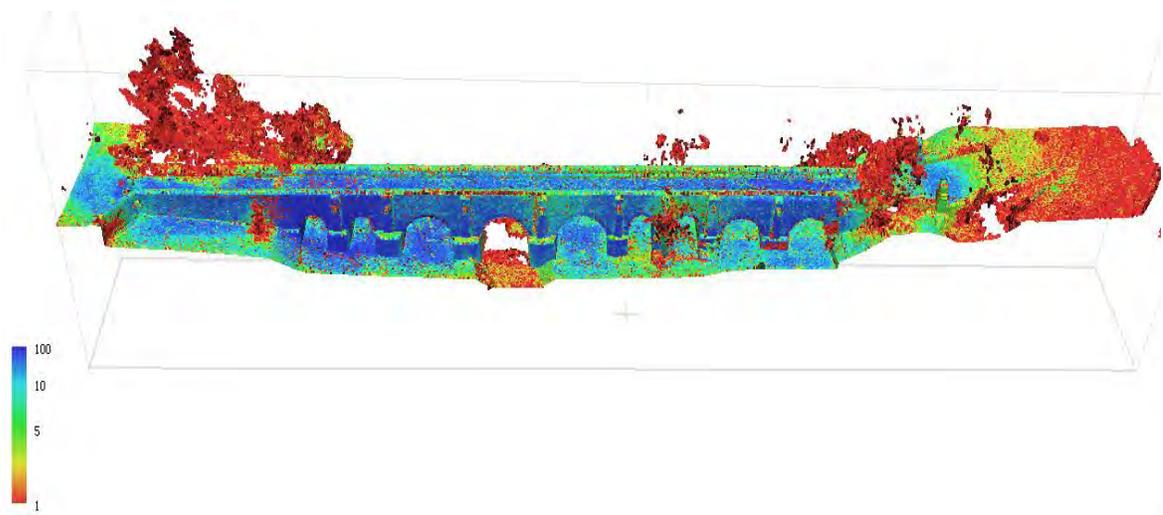


Figura 90. Nivel de confiabilidad en la nube densa de puntos, puente San Ignacio. Elaboración propia.



Figura 91. Detalle de huecos en modelo 3D, puente San Ignacio. Elaboración propia.

6.2. Puente Blanco

El puente Blanco, no representó dificultad alguna para su levantamiento fotogramétrico, primeramente; por ser un puente no complejo, no había vegetación densa en el lugar circundante, aunque sí había la presencia de dos mezquites, por lo que en esas zonas se estimó baja confiabilidad en los puntos de la nube densa, como se observa en la imagen 92, generando huecos solo en estas zonas, como se muestra en la figura 94, pero por

otro lado, la parte inferior de la bóveda tuvo alta confiabilidad en sus puntos puesto que, se capturó de forma idónea numerosas fotografías y con buen posicionamiento. También, el contexto de los alrededores del inmueble eran los óptimos para llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico terrestre. Se requirió un solo día de trabajo en campo y, en donde se tomaron alrededor de 235 fotografías para su post procesamiento, en donde tomó un tiempo muy bajo de 30 minutos para su recreación tridimensional.

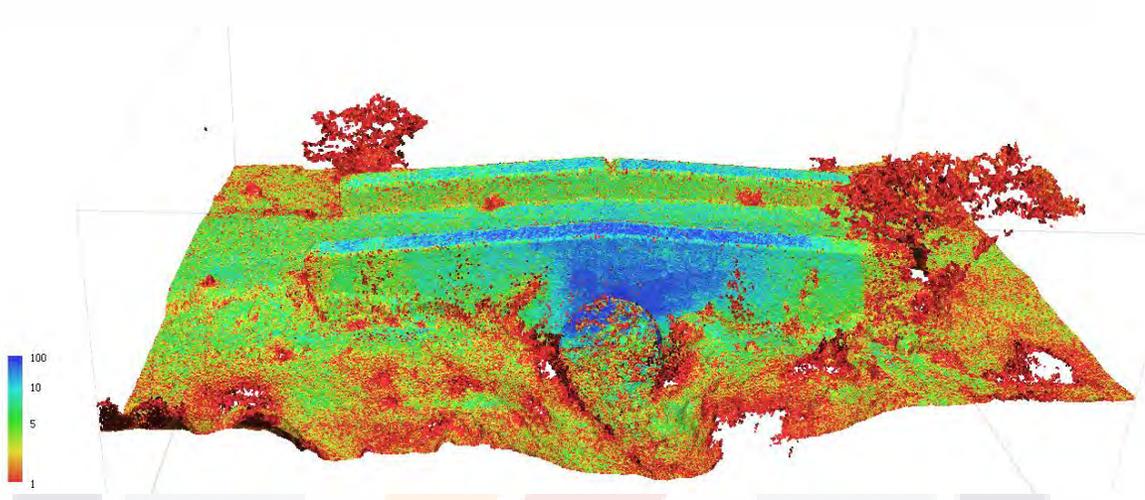


Figura 92. Nivel de confiabilidad en la nube densa de puntos, puente Blanco. Elaboración propia.

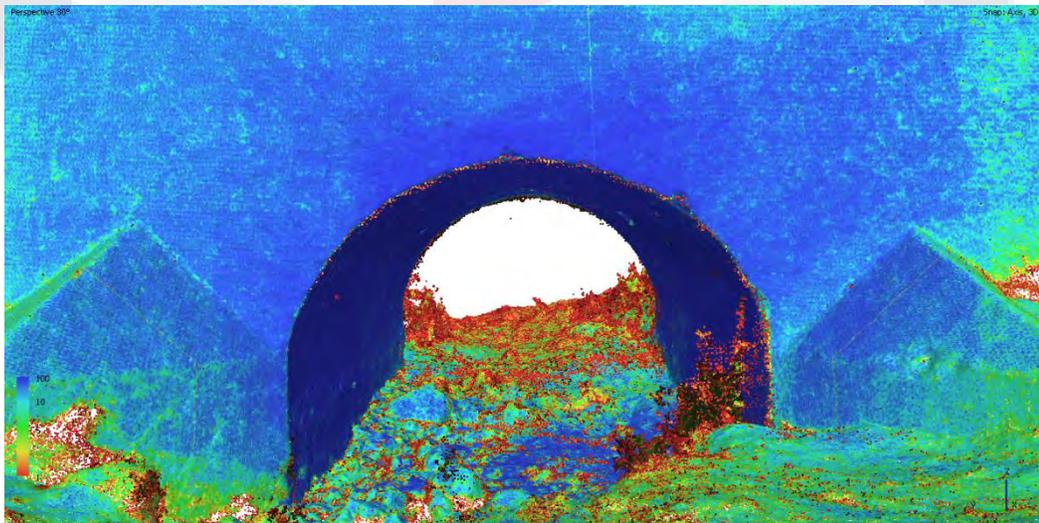


Figura 93. Detalle de arco en la estimación de confiabilidad de puntos de la nube densa, puente Blanco. Elaboración propia.



Figura 94. *Detalle de hueco en modelo 3D, puente Blanco. Elaboración propia.*

6.3. Puente CECyTEA

Para el puente de CECyTEA, lo que representó algo de dificultad fueron los permisos para ingresar y hacer el levantamiento, puesto que, el puente se encuentra ubicado adentro de las instalaciones de un centro de educación, por lo que también se procuró realizar el trabajo en horario donde los alumnos estuvieran en clase, para evitar cualquier tipo de incidente. Con respecto al trabajo en campo, también se consideró que estuvo fácil de llevar a cabo, solo se requirió un día para la captura de las fotografías. El trabajo en gabinete también tuvo un corto tiempo de procesamiento, alrededor de los 28 min. También como se puede observar en la figura 95, se observa que la mayor parte de la reconstrucción de la nube densa de puntos tuvo una alta estimación en el nivel de confiabilidad. Por otra parte, hubo una variación en la temperatura de la textura generada en las fachadas del presente puente, como se observa en la figura 96. Esto se debió a cuando se hizo primer el levantamiento fotogramétrico aéreo, el día se encontraba nublado, desafortunadamente, para el momento en que se comenzó el levantamiento fotogramétrico terrestre se despejó, por lo que se generó una textura con una temperatura más cálida en las partes centrales de la fachada del puente.

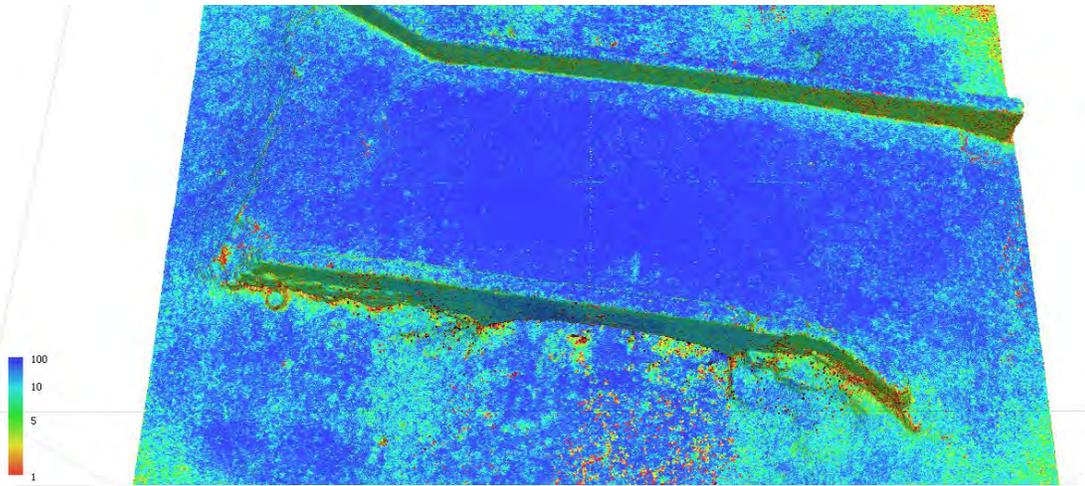


Figura 95. Nivel de confiabilidad en la densa nube de puntos. Elaboración propia.



Figura 96. Detalle en cambio de temperatura en textura del modelo 3D, puente CECyTEA. Elaboración propia.

6.4. Puente El Tule

En el puente El tule, se tuvo una complejidad para poder llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico con la cámara semiprofesional, puesto que, por las condiciones en las que se encontraba el puente, el cual da un aspecto como si estuviese enterrado, la circulación y el levantamiento fotogramétrico terrestre por el interior de los arcos lo volvió muy difícil para la captura de las fotografías, además, había carencia de iluminación; esto al momento de generar el modelo tridimensional, específicamente la textura, no hubo una buena homogenización en los colores, habiendo variaciones en ciertas zonas, como se muestra en la figura 98. Aun así, se pudo orientar de manera adecuada las fotografías tomadas tanto de la cámara semiprofesional como la cámara del dron, pudiendo así

recrear con buenos resultados la configuración espacial del inmueble. El tiempo estimado total para su post procesamiento de la información fue aproximadamente la hora, el doble que el puente Blanco.

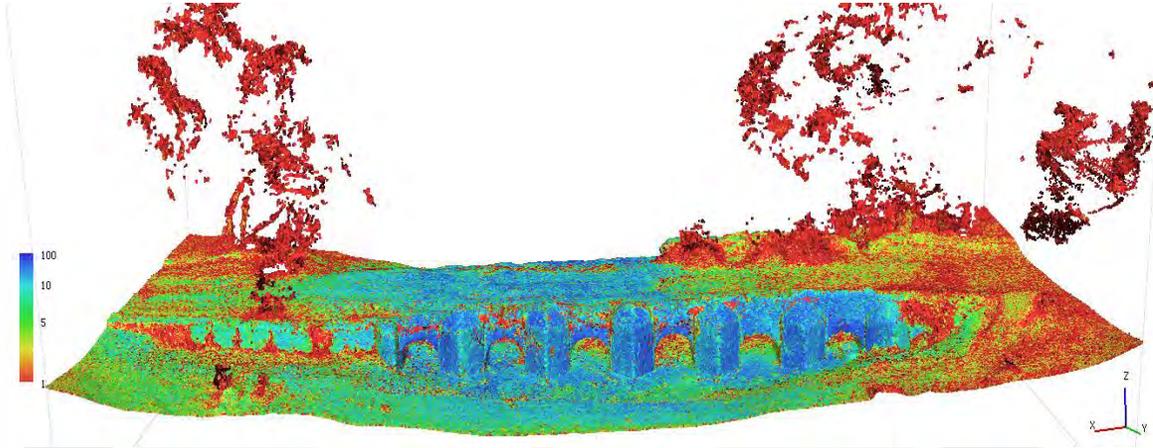


Figura 97. Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente El Tule. Elaboración propia.



Figura 98. Detalle de color de temperatura en la parte inferior de una de las bóvedas. Elaboración propia.

6.5. Puente Tepezalilla

En el puente Tepezalilla, la dificultad que representó fue para tomar las fotografías aéreas con el dron, esto debido a que es un puente donde aún circulan vehículos en su

rodamiento, entonces no hubo un seguimiento en cuestión del tiempo entre las capturas de las fotografías, por lo que no se pudieron tomar tantas imágenes aéreas de tal manera que se buscara el buen solapamiento entre estas. Además, la presencia de algunos árboles dificultó la toma de las fotografías aéreas, por lo que se generó baja estimación en el nivel de confiabilidad de puntos en varias zonas, como se observa en la figura 99, y por tal razón generó huecos en modelo 3D, como se observa en la figura 100. Por otro lado, la complementación de las imágenes con la cámara semiprofesional se pudo llevar de manera adecuada, tomando un total entre los dos equipos de 351, donde solo se pudieron orientar 296 fotografías, dando un 84% de efectividad en la captura de imágenes, como se muestra en la tabla 21. Esto debido a que muchas imágenes se tomaron demasiado cercas del inmueble, por lo que no hubo un solapamiento para continuar con la orientación y ubicación de los puntos.

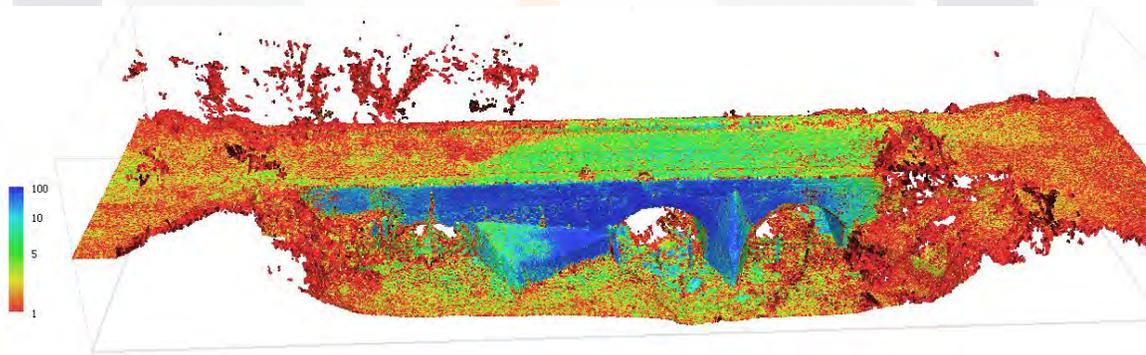


Figura 99. Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente Tepezalilla. Elaboración propia.



Figura 100. Detalle de hueco en modelo 3D, puente Tepezalilla. Elaboración propia.

6.6. Puente Peñuelas

Para el puente Peñuelas, se tuvo la mayor dificultad tanto para llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico, como para la recreación de la configuración espacial del mismo, por el hecho que las condiciones alrededor del puente, que era la densa vegetación, lo volvía muy complejo de poder obtener imágenes adecuadas. El vuelo del dron también se volvió peligroso por poder impactar el equipo con uno de los árboles de los alrededores, no se pudo seguir el patrón de captura como en los otros puentes. Lo que se buscó fue tomar las imágenes desde posiciones que pudiera haber solapamiento con las imágenes capturadas con la cámara semiprofesional. Se pudo recrear con buena confiabilidad en su geometría y textura los arcos y fachadas, sin embargo, el rodamiento no se pudo generar de la manera idónea, porque había mezquites por encima de esta. Se generó en la nube densa muchas zonas con baja confiabilidad en sus puntos, como se puede observar en la figura 101. Al procesar la información y eliminar estas zonas las cuales carecen de información del puente, generan huecos en el modelo tridimensional, como se observa en la figura 102. El modelo 3D del puente Peñuelas en comparación de los demás puentes, fue el más deficiente en la reconstrucción de su geometría por las cuestiones antes mencionadas. Aun así, el puente fue dado como visto bueno por el centro INAH Aguascalientes, porque cumple con la mayor generación su geometría, donde se pudo extraer información y apreciar las partes que componen el puente.

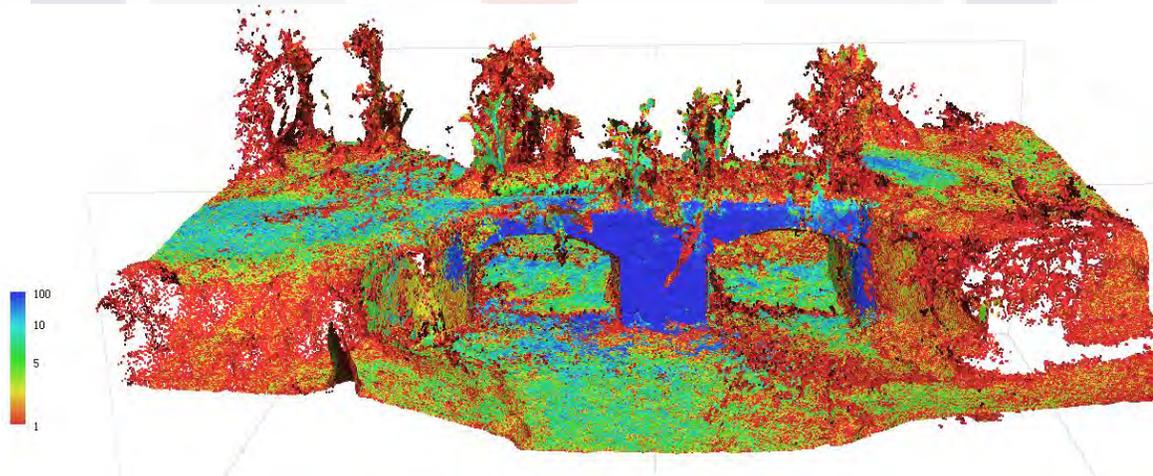


Figura 101. Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente Peñuelas. Elaboración propia.



Figura 102. Detalle de huecos en modelo 3D, puente Peñuelas. Elaboración propia.

6.7. Puente Pargas

Por último, el puente Pargas, es un puente de lo más sencillo en cuanto a su arquitectura y construcción, donde solo se tiene una estructura monolítica pétreo apoyada en dos puntos y, tanto su trabajo en campo como su trabajo en gabinete fueron simples y rápidos de llevar a cabo. Tuvo el menor número de fotografías capturadas con un total de 165, donde se pudieron orientar 163, y un tiempo total de post procesamiento de 21 minutos. La estimación de la generación de la nube densa de puntos fue excelente, como se muestra en la figura 103. A los alrededores sí se tuvo bajo nivel de confianza, pero se pudieron eliminar esos puntos por medio de un filtrado, herramienta que se tiene en el mismo programa de *Agisoft Metashape*, donde no se perjudicó la configuración espacial del puente.

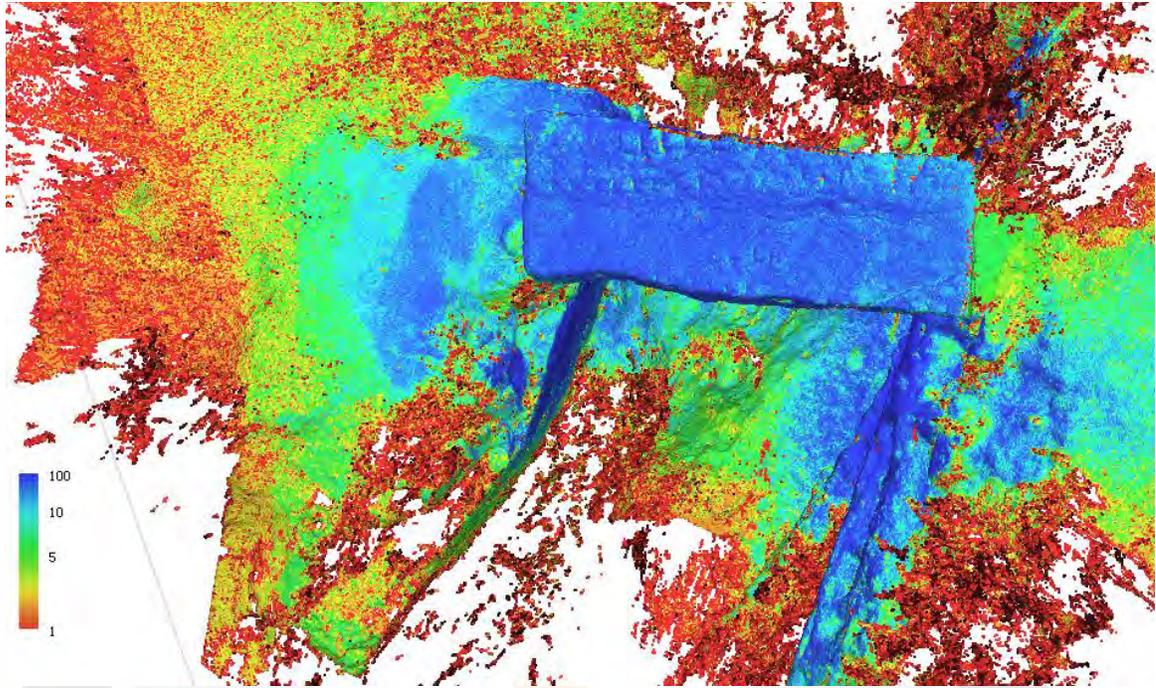


Figura 103. Nivel de confiabilidad de la densa nube de puntos, puente Pargas. Elaboración propia.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”

7. CONCLUSIONES

7.1. Conclusión general

La conservación y restauración del patrimonio edificado juega un papel importante para la salva guarda de la cultura y la trascendencia de estos a las futuras generaciones. Por ello, es importante la implementación de técnicas novedosas y no invasivas para el análisis de los inmuebles históricos, en lo que respecta a la configuración espacial, puesto que, los trabajos de esta índole, por lo general, son de un alto costo.

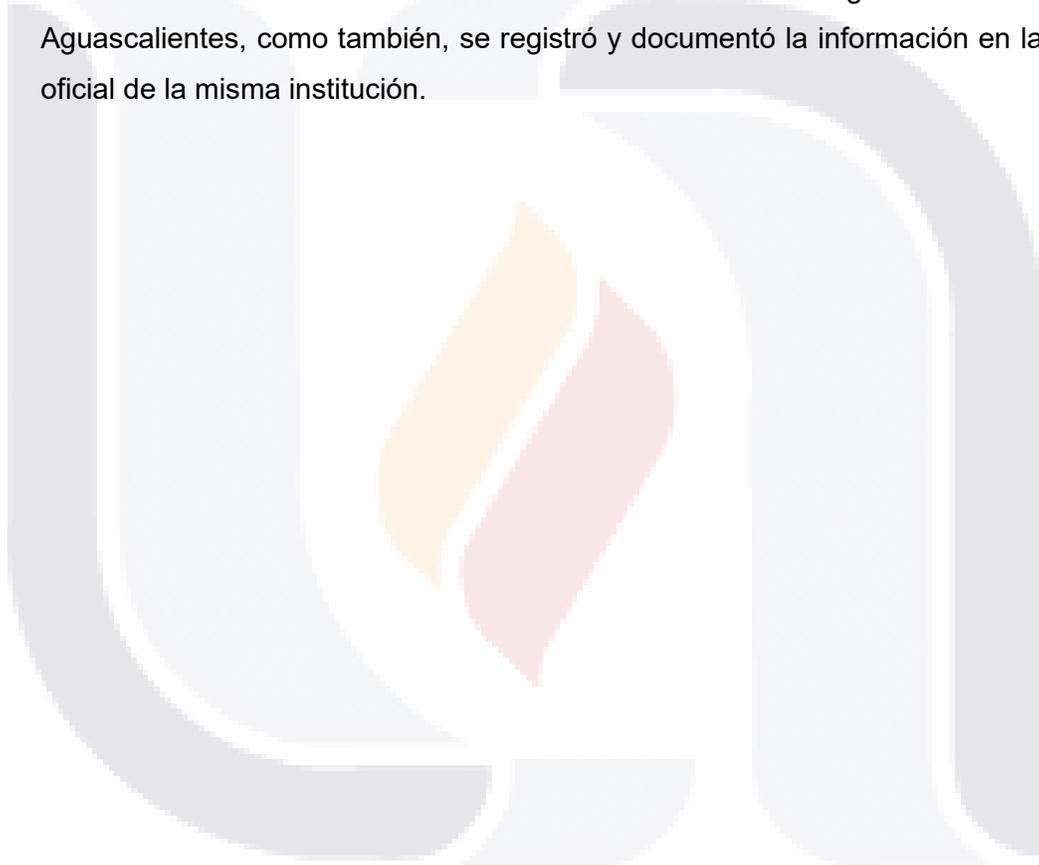
De tal manera se concluye que se alcanzó el objetivo general del presente trabajo, donde a través del empleo de una metodología práctica y de bajo costo aplicando la técnica de fotogrametría aérea, se logró alcanzar a recrear con alta confiabilidad en los resultados los modelos tridimensionales, obteniendo la configuración espacial de 7 de los 13 puentes catalogados como patrimoniales en el Estado de Aguascalientes y, por otro lado, con dichos modelos generados se extrajo información para el registro y documentación de estos bajo los lineamientos del centro INAH. En este contexto, dicha información generada servirá como base a casos de estudios futuros, así como para la conservación y difusión del patrimonio edificado y, con tal suerte, se pueda seguir creciendo el acervo digital aplicando dicha metodología a los inmuebles históricos, generando mayor conciencia en la sociedad de la importancia en la protección del patrimonio edificado.

7.2. Conclusiones particulares

- A) Se realizó una exhaustiva investigación del estado del conocimiento donde se hayan empleado metodologías en la aplicación de la técnica de fotogrametría y que, a la vez, hayan obtenido buenos resultados, donde el presente trabajo para el desarrollo de la metodología se basó en las recomendaciones y conclusiones de dichos trabajos.
- B) Se seleccionó como muestra en conjunto con el centro INAH Aguascalientes los puentes catalogados como patrimoniales del Estado de Aguascalientes, siendo que se tenía desactualizada o nula información en la mayoría de estos inmuebles y, además, que sirvieran como inmuebles pioneros en la reconstrucción de la configuración espacial por medio de una metodología práctica y de bajo costo con buenos resultados.
- C) Se desarrolló una metodología de trabajo práctica y de bajo costo, utilizando un dron que cumpliera con los requerimientos de operación y vuelo, pero a la vez, con buenas

especificaciones en la cámara y complementando el trabajo con una cámara semiprofesional para los levantamientos fotogramétricos terrestres.

- D) Se logró recrear la geometría y textura para el modelamiento 3D con la utilización del software *Agisoft Metashape*, donde por medio del mismo software se estimó el nivel de confiabilidad del modelo 3D, acreditando el trabajo que se llevó en campo.
- E) Se contrastó la información de carácter métrico con el empleo de otros tipos de levantamientos, teniendo una precisión de centímetros de diferencia respecto al levantamiento fotogramétrico, aceptando la información generada con los modelos tridimensionales. Los modelos tridimensionales fueron entregados al centro INAH Aguascalientes, como también, se registró y documentó la información en la página oficial de la misma institución.



7.3. Nicho de trabajo

En el presente trabajo solo se logró recrear 7 de los 13 puentes patrimoniales del Estado de Aguascalientes, seleccionados como muestra de trabajo. Los puentes patrimoniales donde no se logró llevar a cabo la metodología desarrollada fueron los que se muestran en la tabla 22. Siendo de esta manera que aún se tiene pendiente la recreación de la configuración espacial de dichos inmuebles para futuros trabajos prácticos.

Tabla 22. *Puentes patrimoniales los cuales no se recreó su modelo 3D.* Elaboración propia.

Puentes patrimoniales del Estado de Aguascalientes		Ubicación (Municipios)
1.	Chicalote	Aguascalientes
2.	Guadalupe	Asientos
3.	Tepozán	Asientos
4.	Pabellón de Hidalgo	Pabellón de Hidalgo
5.	Presa Serna	Calvillo
6.	Cobos	Aguascalientes

Para el puente Chicalote, Presa Serna y Guadalupe no se logró recrear los modelos 3D por su densa vegetación de los alrededores que cubren las fachadas del inmueble, lo cual es un impedimento para la aplicación de la técnica de la fotogrametría y su trabajo en campo. Se necesitaría de solicitar un trabajo de deshierbe y, en su caso, realizar el trabajo en una temporada del año donde no haya lluvias.

Para el puente Pabellón de Hidalgo, por sus características del inmueble es una limitación al visualizar el modelo en el *Agisoft Metashape*, ya que el software trabaja con una visualización al exterior de la geometría de los objetos generados. Se requeriría de la investigación en el uso de otro software especializado en la recreación de modelos 3D a través de la aplicación de fotogrametría, donde se logre navegar o visualizar los modelos desde la parte interna.

En el peculiar caso del puente Cobos, la limitante fueron los permisos de acceso, por ser zona privada, además, que el inmueble se encontraba repleto de escombros de basura, lo cual era un impedimento para trabajar por tiempos prolongados en el lugar.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

“APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA PARA LA
ELABORACIÓN DE MODELOS 3D DE EDIFICIOS PATRIMONIALES
DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES”

8. REFERENCIAS

- Agisoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual Standar Edition, Version 1.4* (p. 66).
- Bellido-Márquez, M. del C. (2020). Documentación escrita y fotográfica parametrizada del Monumento a Francisco de Paula Valladar (Granada) como útil para su valoración, difusión y conservación. *Arte y Políticas de Identidad*, 23, 199–229. <https://doi.org/10.6018/reapi.461231>
- Buill, Felipe., Núñez Andrés, M. A. (María A., & Rodríguez Jordana, Joan. (2007). *Fotogrametría arquitectónica*.
- Calero-Castillo, A. I., Carrasco-Huertas, A., Durbán-García, M., & Durán-Suárez, J. A. (2020). Documentation and virtual reconstruction applied to the restoration of large format pictoric works: The mural canvas painting from the Zambrano Pharmacy. *Virtual Archaeology Review*, 11(23), 141–152. <https://doi.org/10.4995/var.2020.13343>
- Caraballo, C. P. (2011). Patrimonio cultural. In *Boletín Cultural y Bibliográfico* (Vol. 5, Issue 08). <https://es.unesco.org/fieldoffice/santiago/cultura/patrimonio>
- Carvajal Ramírez, F., Navarro Ortega, A. D., Agüera Vega, F., Martínez Carricondo, P., & Mancini, F. (2019). Virtual reconstruction of damaged archaeological sites based on Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry and 3D modelling. Study case of a southeastern Iberia production area in the Bronze Age. *Measurement*, 136, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.092>
- Castilla, F. J., Ramón, A., Adán, A., Trenado, A., & Fuentes, D. (2021). 3D Sensor-Fusion for the Documentation of Rural Heritage Buildings. *Remote Sensing*, 13(7), 1337. <https://doi.org/10.3390/rs13071337>
- Castro Figueroa, M. A. (2016). *Evaluación y calibración de las técnicas de fotogrametría digital aplicadas a la caracterización geométrica de obras patrimoniales*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/658>
- Colica, E., D’Amico, S., Iannucci, R., Martino, S., Gauci, A., Galone, L., Galea, P., & Paciello, A. (2021). Using unmanned aerial vehicle photogrammetry for digital geological surveys: case study of Selmun promontory, northern of Malta.

Environmental Earth Sciences, 80(17), 551. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09846-6>

DeLony, E. (2011). *Context for World Heritage Bridges - International Council on Monuments and Sites*. <https://www.icomos.org/fr/ressources/publications/librairie-de-l-icomos/116-english-categories/resources/publications/234-context-for-world-heritage-bridges>

Desa, H., Azizan, M. A., Zulkepli, N. N., & Romeli, N. (2021). Heritage building modelling: Photogrammetry challenges in producing an as built drawing (ABD) Using Unmanned Aerial System (UAS). *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 7(4), 227–230. <https://doi.org/10.2991/JRNAL.K.201215.003>

Díaz Zeledón, R. A. (2018). *Análisis estructural de elementos arquitectónicos erosionados aplicando fotogrametría*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1768>

García-Molina, D. F., González-Merino, R., Rodero-Pérez, J., & Carrasco-Hurtado, B. (2021). 3D DOCUMENTATION FOR THE CONSERVATION OF HISTORICAL HERITAGE: THE CASTLE OF PRIEGO DE CÓRDOBA (SPAIN). *Virtual Archaeology Review*, 12(24), 115–130. <https://doi.org/10.4995/VAR.2021.13671>

Gil-Melitón, M., & Lerma, J. L. (2019). Patrimonio histórico militar: digitalización 3D de la espada nazarí atribuida a Ali Atar. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 52. <https://doi.org/10.4995/var.2019.10028>

Giuliano, M. G. (2014). Cultural heritage: An example of graphical documentation with automated photogrammetric systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5), 251–255. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-251-2014>

Hayakawa Casas, J. C. (2016). Gestionando el patrimonio edificado de Lima. Apuntes para la construcción de un marco teórico. *Turismo y Patrimonio*, 10, 29–39. <https://doi.org/10.24265/turpatrim.2016.n10.02>

ICOMOS. (1965). Carta Internacional Sobre La Conservacion Y La Restauracion De Monumentos Y Sitios (Carta De Venecia 1964). *II Congreso Internacional de*

Arquitectos y Tecnicos de Monumentos Historicos, 4.
http://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf

ICOMOS. (2008). *ICOMOS-16 a AG-Québec 2008-Interpretación y Presentación de Sitios de Patrimonio Cultural-p*.

ICOMOS. (2013). Carta de Burra. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. http://www.culturante.pt/fotos/editor2/1999-carta_de_burra_para_lugares_de_significado_cultural-icomos_australia.pdf

Jalón, M. L., Chiachío, J., Gil Martín, L. M., & Hernández Montes, E. (2021). Probabilistic identification of surface recession patterns in heritage buildings based on digital photogrammetry. *Journal of Building Engineering*, 34, 101922. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101922>

Jankauskienė, D., Kuklys, I., Kuklienė, L., & Ruzgienė, B. (2020). Surface modelling of a unique heritage object: Use of UAV combined with camera and lidar for mound inspection. *Research for Rural Development*, 35, 207–212. <https://doi.org/10.22616/RRD.26.2020.030>

Jefatura del Estado. (1994). Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. *Boletín Oficial Del Estado*, 156–191.

Kingsland, K. (2020). Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 18, e00157. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>

León Lescano, N., Barnet, Y., & Racchumi Santillan, A. (2020). Captura de datos 3D para virtualizar patrimonio cultural. *Campus*, 25(30), 309–328. <https://doi.org/10.24265/campus.2020.v25n30.07>

López Jobacho, R., & Cortés Albalá, I. (2016). El estudio de edificaciones mediante modelados informáticos. Reelaboración de documentación gráfica del edificio Escuelas Nuevas en El Pedroso. *EGE-Expresión Gráfica En La Edificación*, 9, 95. <https://doi.org/10.4995/ege.2016.12476>

Mañana-Borrazás, P., Blanco-Rotea, R., & Rodríguez-Paz, A. (2009). Geometrical documentation of cultural heritage elements with terrestrial laser scanning. The

Lapa's Experience in Galicia. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, LVI(122), 33–65. <http://digital.csic.es/handle/10261/20449>

Marcos-Robles, J. L., Sánchez Sastre, L. F., Gil Docampo, M. de la L., Ortiz Sanz, J., & Martínez Rodríguez, S. (2016). Empleo de la fotogrametría de rango cercano y RPAs para la determinación de biomasa en parcelas agrícolas. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 19, 118–130. <https://doi.org/10.17013/risti.19.118-130>

Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Yero-Paneque, L., & Agüera-Vega, F. (2021). Combination of HBIM and UAV photogrammetry for modelling and documentation of forgotten heritage. Case study: Isabel II dam in Níjar (Almería, Spain). *Heritage Science*, 9(1), 95. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00571-8>

Ojeda-Bustamante, W., González-Sánchez, A., Mauricio-Pérez, A., & Flores-Velázquez, J. (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(4), 157–166. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-10>

Olcina Lagos, S. (2020). *Herramientas de documentación del patrimonio histórico en la España decimonónica: El caso de la provincia de Alicante*. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/107985>

Pepe, M., & Costantino, D. (2020). UAV Photogrammetry and 3D Modelling of Complex Architecture for Maintenance Purposes: the Case Study of the Masonry Bridge on the Sele River, Italy. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 191–203. <https://doi.org/10.3311/PPci.16398>

Picon-Cabrera, I., Rodríguez-González, P., Toschi, I., Remondino, F., & González-Aguilera, D. (2021). Reconstrucción de edificios y análisis urbanístico de centros históricos con fotogrametría aérea. *Informes de La Construcción*, 73(562), e398. <https://doi.org/10.3989/ic.79082>

Quintilla Castan, M., & Agustín-Hernández, L. (2023). Los Sistemas de Documentación como instrumento de conservación del Patrimonio Arquitectónico. Experiencias en España y Europa. *Erph_ Revista Electrónica de Patrimonio Histórico*, 32, 41–75. <https://doi.org/10.30827/erph.32.2023.24569>

Quirós Rosado, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil* (Universidad de Extremadura, Ed.; 1a Edición).

Remondino, F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138. <https://doi.org/10.3390/rs3061104>

Sánchez, A. V. G. (2021). *Propuesta de una metodología para desarrollar y evaluar técnicas de fotogrametría como herramientas para la realización del mapeo de patologías en elementos patrimoniales*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/2186>

Segarra Narváez, M. V. (2016). *Metodología para la documentación del patrimonio cultural edificado de la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25578#>

Sender Contell, M., Gil Piqueras, M. T., Cortés Alcober, P., & Serra Lluch, J. de R. (2005). El levantamiento topográfico y arquitectónico como fase preliminar a las intervenciones arqueológicas y de restauración sobre patrimonio maya. *XIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas En Guatemala, 2005*, 475–485. <http://riunet.upv.es/handle/10251/12603>

Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS) - Consejo Científico Internacional. (n.d.). Retrieved March 4, 2023, from <https://council.science/es/member/isprs-international-society-for-photogrammetry-and-remote-sensing/>

UNAM. (n.d.). <https://www.mecate.esteticas.unam.mx/fotogrametria.html>. Mecate, Instituto de Investigaciones Estéticas UNAM.

Valle Melón, J. M. (2006). Reflexiones sobre la Documentación Geométrica del Patrimonio. *Papeles Del Portal*, 3, 97–123.

Vavulin, M. V., Chugunov, K. V., Zaitceva, O. V., Vodyasov, E. V., & Pushkarev, A. A. (2021). UAV-based photogrammetry: Assessing the application potential and effectiveness for archaeological monitoring and surveying in the research on the ‘valley of the kings’ (Tuva, Russia). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 20, e00172. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00172>

Vizcaíno Hernández, I. E. (2018). *Propuesta y evaluación de una metodología para la determinación del peso propio en elementos constructivos y ornamentales de edificios patrimoniales empleando fotogrametría digital de corto rango*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1581>

Vladimir G, B., & Centy, T. (2016). Caracterización del patrimonio cultural edificado como parte del desarrollo sostenible en la ciudad de Chalchuapa, el Salvador. *INVENTUM*, 11(21), 73–89. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.11.21.2016.73-89>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Zúñiga, J. (2016). Generación De Modelos Tridimensionales a Partir De Fotogrametría Y Su Aplicación En Geología Estructural. *Repositorio Académico de La Universidad de Chile*, 122. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141334>