
LOS ESCÁNERES DE BARRIDO LÁSER Y LUZ BLANCA. HERRAMIENTAS PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO MATERIAL¹

Jessica Ramírez Méndez, Valeria Valero Pié y Ángel Mora Flores

Los objetos culturales, tanto los antiguos como los contemporáneos, son producto de su contexto histórico. En ellos se reflejan las características del periodo en el que fueron concebidos y, posteriormente, transformados: las formas de vida, los movimientos artísticos del momento, los avances tecnológicos, la economía, entre muchas otras. En consecuencia, es necesaria la conservación de los bienes heredados en tanto que nos dotan de información útil acerca de nuestro pasado y nos orientan para conocer nuestro devenir como sociedad, función que sería difícil de alcanzar sin el adecuado registro y el detallado levantamiento arquitectónico de estos bienes.

Con un riguroso levantamiento arquitectónico, acompañado de una cuidadosa investigación documental, podemos entender la obra que se está estudiando, es decir, conocer su origen y sus vicisitudes, así como sus modalidades constructivas, formales y espaciales. “El levantamiento, por lo tanto, es obra de medición, de clarificación geométrica, de conocimiento histórico y, principalmente, es operación de lectura orientada hacia el conocimiento crítico del bien cultural.”²

El objeto del presente artículo es exponer las ventajas que se han encontrado en la realización de levantamientos arquitectónicos con el uso de la tecnología de barrido láser y de luz blanca para la conservación del patrimonio material de nuestro país. En este sentido, hablar de conservación lleva implícito su estudio, protección, restauración, difusión y divulgación. Asimismo, nos proponemos presentar y discutir algunas de las experiencias que el Instituto Nacio-

1 Una primera versión de las reflexiones vertidas en este capítulo introductorio se presentó en el Primer Congreso Internacional Patrimonio Cultural y Nuevas Tecnologías: una visión contemporánea, INAH, 2014.

2 Mario Docci y Diego Maestri, *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*, Bari, Editori Laterza, 1984, p. 4 [traducción libre de Valeria Valero].

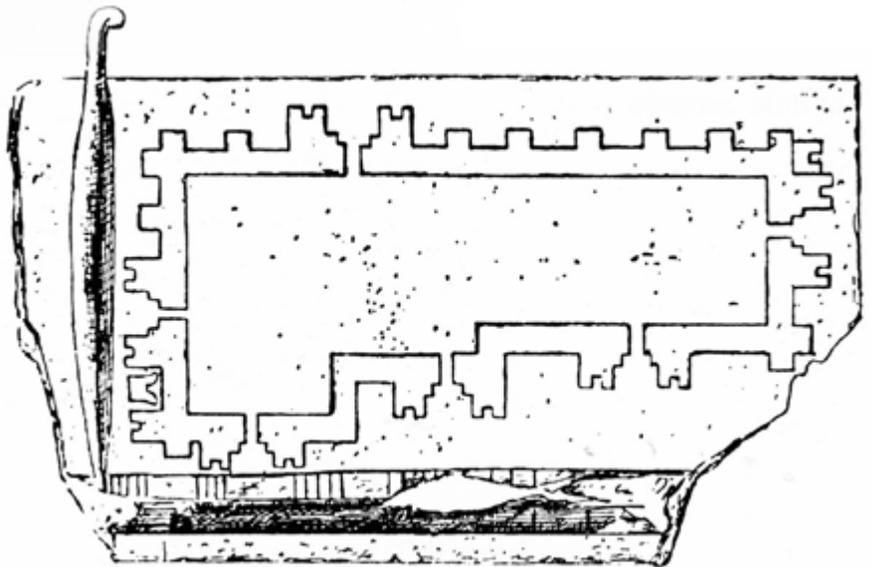
nal de Antropología e Historia (INAH), a través de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (CNMH), ha tenido con la reciente incursión y práctica en estas tecnologías de postrema generación.

SEMBLANZA HISTÓRICA DEL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

El hombre siempre ha buscado tanto un diálogo con el ambiente que lo rodea y con las transformaciones que sobre este ha realizado como la forma de medirlas y representarlas por medio de convenciones gráficas establecidas.

Desde la Antigüedad, se han realizado mediciones y representaciones de la realidad territorial, urbana y arquitectónica en la que las distintas civilizaciones se han desenvuelto, lo que demuestra el interés y la capacidad del ser humano de trasladar una realidad tridimensional a una representación bidimensional (figuras 1 y 2).³

Figura 1. Transcripción gráfica de un bajorrelieve esculpido en la base de la estatua de Gudea encontrada en Tellah, que representa una muralla urbana, 2000 a. C. Tomado de Mario Docci, *Il rilievo architettonico...*, p. 18.



3 Se han encontrado en los territorios pertenecientes a la antigua Mesopotamia tablillas de barro, esculturas, pinturas y relieves con representaciones de ciudades amuralladas, edificios fortificados y plantas arquitectónicas de casas. Una de las más antiguas (7200-6800 a. C.) muestra la distribución de las edificaciones de una ciudad a las faldas de un volcán. Estas evidencias indican que se tenían el conocimiento y el manejo de instrumentos de medición, los principios necesarios para la realización de levantamientos arquitectónicos, así como sistemas de representación gráfica en los que se incluye el concepto de planta arquitectónica. En Egipto, la medición de la Tierra, la astronomía y el levantamiento arquitectónico adquieren gran importancia por el conocimiento mismo que aportaron a las ciencias, pero también por razón de que fueron fundamentales para la definición del territorio, de la propiedad y de la división de los campos. Se tiene conocimiento de que utilizaban instrumentos simples, como el compás, la plomada y la cuerda con nudos, con los que lograban una gran precisión en sus levantamientos. Los antiguos griegos heredaron gran parte de estos saberes y, mediante sus tratados, mapas y escritos se sabe que alcanzaron avances significativos en astronomía, geometría y topografía. Mario Docci y Diego Maestri, *op. cit.*, pp. 17-27.

A partir de las bases sentadas por las antiguas culturas para el desarrollo del mundo occidental, en el Imperio romano se profesionalizaron las actividades relacionadas con la medición y se creó la figura del *agrimensor* para llevar a cabo las operaciones relativas al levantamiento arquitectónico y urbano a partir de un lenguaje técnico y escalas gráficas homologados. Una obra de levantamiento urbano que amerita ser destacada, ya que es signo de la gran maestría alcanzada por los agrimensores, es la llamada *Forma Urbis* (figura 3).

Figura 2. Transcripción gráfica de una pintura que representa la sección de una casa egipcia con las distintas actividades cotidianas que se desarrollaban en ella. Tomado de Mario Docci, *Il rilevamento architettonico...*, p. 24.

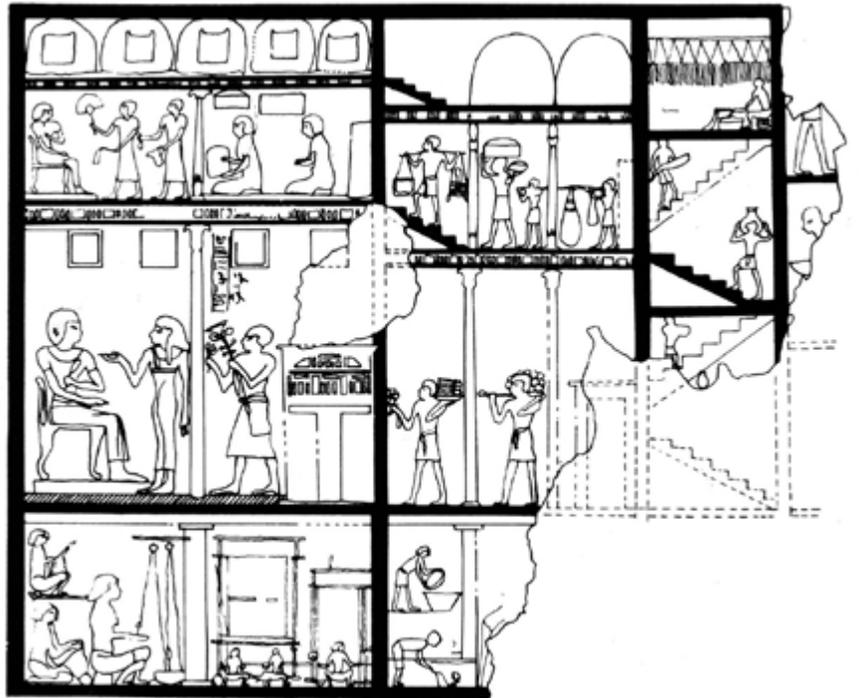


Figura 3. Fragmentos de mármol de la denominada *Forma Urbis Romae*, en los que se distinguen las *domus* y los grandes edificios públicos; primer cuarto del siglo III d. C. Tomado de Mario Docci, *Il rilevamento architettonico...*, p. 33.



Se trata de un catastro realizado en la prefectura urbana a partir de las reformas impulsadas por Settimo Severo a principios del siglo III d. C. Este documento es, en efecto, el primer plano de Roma con base en una campaña de levantamiento urbano con que se cuenta. Una comparación realizada con el catastro actual arrojó pocas diferencias, con lo que se demostró el alto grado de precisión que tenían los instrumentos utilizados por los agrimensores romanos.⁴

En Mesoamérica, el análisis realizado a 500 piezas encontradas en la región maya, talladas en jade y cloromelanita, ha permitido saber que estos objetos clasificados por los antropólogos, como hachas, cinceles y pulidores, son, en realidad, instrumentos de medición de alta precisión.⁵ A través del estudio de estas piezas, es factible pensar que los mesoamericanos midieron sus obras con instrumentos de gran exactitud y se pudo comprobar que los mayas, en particular, fueron grandes geómetras, es decir, grandes medidores de la Tierra.

Ahora bien, como método para comprender cabalmente una obra, el levantamiento arquitectónico vivió uno de sus mejores momentos entre finales del siglo XV y principios del siglo XVI, gracias a los grandes arquitectos italianos del Renacimiento.⁶ Este periodo, primordialmente en los albores del siglo XVI, se caracterizó por el uso reglamentado de las proyecciones ortogonales, la representación en planta, alzado y cortes, además de detalles constructivos. El estudio de los monumentos antiguos se hacía de manera muy rigurosa, sistemática y objetiva, ya que se buscaba el conocimiento científico a través de las mediciones precisas. Cabe aclarar que, en general, la tarea del levantamiento se realizaba para entender las reglas con que fueron concebidos los edificios antiguos y, con ellas, crear la nueva arquitectura. En otras palabras, el ejercicio del levantamiento arquitectónico fue el instrumento principal tanto para la autoformación profesional de los estudiosos como para su comprensión del hecho arquitectónico (figura 4).

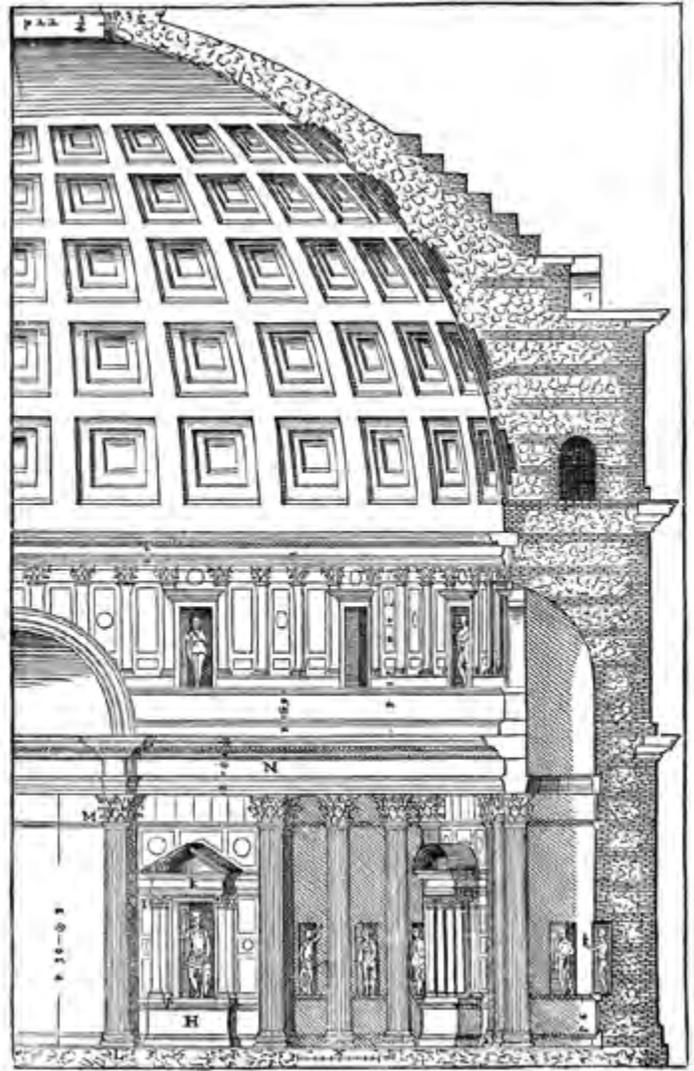
En los siglos XVII y XVIII se produjo un gran perfeccionamiento en las técnicas del levantamiento arquitectónico y de la representación gráfica, así como un importante desarrollo en las correspondientes al levantamiento urbano y territorial. En Europa se emprendieron grandes campañas de registro de los monumentos antiguos con fines principalmente de difusión. Este campo tuvo una gran divulgación gracias al nacimiento de la geometría descriptiva,⁷ cuya paternidad

4 Mario Docci y Diego Maestri, *op. cit.*, pp. 30-32.

5 Se ha observado que estos medidores fueron diseñados con arcos de circunferencia en sus perímetros, de tal manera que, al rotar estas piedras, se desplazan medidas de longitud sobre su filo y sobre las dos caras ortogonales. Estos medidores fueron pensados para dimensionar objetos con superficies cónicas, cilíndricas o esféricas. El resultado final de las mediciones prehispánicas es tan exacto como el producido con el metro. Antonio Prado, "De herramientas a instrumentos", en *XIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, editado por J. P. Laporte, H. Escobedo, B. Arroyo y A. C. de Suasnívar, Guatemala, Museo Nacional de Arqueología y Etnología, 1999 (versión digital).

6 Michela Cignola, "Il rilevamento per la conoscenza del costruito", en *Metodi e tecniche della rappresentazione*, Cassino, Università degli Studi di Cassino, 2001, p. 15.

Figura 4. Sección transversal parcial del Panteón de Agripa en Roma, realizada por Andrea Palladio para *Los cuatro libros de la arquitectura*. El gráfico muestra, entre otros detalles, la parte interna de los muros. Cabe hacer notar la escala gráfica que aparece en la parte baja al centro del gráfico. Tomado de Mario Docci, *Il rilevamento architettonico...*, p. 81.



se le adjudica a Gaspard Monge, quien reorganizó el sistema educativo francés y, en 1795, impartió las primeras lecciones públicas de esta materia.⁸

En la Nueva España, a finales del siglo XVIII y debido a la influencia de las ideas ilustradas europeas, comenzó una nueva interpretación del pasado indígena mediante el estudio de sus testimonios materiales, ya que éstos permitían desvelar el “origen” —la historia— de los primeros pobladores. Las autoridades españolas apoyaron el creciente interés de los criollos por indagar

7 De acuerdo con el propio Gaspard Monge, “la geometría descriptiva tiene dos objetivos: el primero es dar métodos para representar sobre un papel de dibujo, que no tiene más de dos dimensiones, á saber, longitud, latitud; todos los cuerpos de la naturaleza, que tienen tres, longitud, latitud y profundidad, con tal que estos cuerpos puedan ser determinados rigurosamente. El segundo objeto es dar el modo de reconocer por medio de una exacta descripción las formas de los cuerpos, y deducir todas las verdades que resultan, bien sean de sus formas, bien de sus posiciones respectivas”, Gaspard Monge, *Geometría descriptiva. Lecciones dadas en las escuelas normales en el tercero año de la República*, Madrid, Imprenta Real, 1803.

8 Michela Cignola, *op. cit.*, p. 16.

este pasado. En 1784, se hicieron por vez primera planos y dibujos de Palenque, la ciudad perdida en la selva. Otro ejemplo emblemático de este nuevo método de análisis a través de los levantamientos arquitectónicos fue la expedición que por el centro y el sureste de la Nueva España realizó, entre 1805 y 1807, Guillermo Dupaix, comisionado por Carlos IV para elaborar planos de los monumentos antiguos.⁹

El siglo XIX se caracterizó por un señalado y creciente interés en la restauración de la arquitectura monumental y se dio inicio a esta actividad como una ciencia, así como a los grandes debates en torno de esta. Paul Marie Latarouilly, al igual que Eugen Viollet Le Duc, afirmaba, como parte de su teoría, que la restauración tiene la necesidad de entrar en el ánimo del arquitecto-creador primitivo, entender el espíritu de la obra y aplicarlo a su reconstrucción, por lo que la finalidad del levantamiento arquitectónico como operación crítica era llevar el organismo arquitectónico a su estado original, es decir, buscar la imagen del edificio que el arquitecto que lo diseñó hubiera querido que fuera y no limitarse a la situación actual.

Hoy en día el levantamiento arquitectónico es reconocido como una operación sumamente compleja que debe ser ejecutada con el mayor rigor científico, con medios e instrumentos adecuados, y aplicado con distintos fines, así como en distintos campos de estudio, como son la historia, la historia del arte, la arqueología, la restauración, entre muchos otros.¹⁰

Como se ha podido observar con este breve recorrido histórico, cada época ha entendido el levantamiento arquitectónico con base en el modo de observar los objetos, de elegir los aspectos considerados fundamentales, de utilizar los instrumentos de medición del momento y de graficarlos según normas y convenciones específicas. Toda vez que nuestra época no está exenta de esta condición, los levantamientos que en ella se hacen son representativos del modo actual de ver y entender el mundo que nos rodea.

El papel que ha desempeñado a lo largo de la historia la evolución de los instrumentos de medición, es decir, de los aparatos que se usan para comparar magnitudes físicas tomando en cuenta las unidades de medida previamente establecidas, ha sido fundamental para lograr los fines que cada época ha buscado a través de los levantamientos arquitectónicos. Actualmente se utiliza una gran variedad de instrumentos para llevar a cabo mediciones de las distintas magnitudes físicas existentes, desde cintas métricas, reglas y odómetros, hasta sofisticados niveles láser, estaciones totales y, por supuesto, los escáneres de barrido láser y luz blanca; a estos dos últimos nos referiremos a continuación.

9 Enrique Florescano, "La creación del Museo Nacional de Antropología", en *El patrimonio nacional de México II*, México, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Fondo de Cultura Económica, 2013, pp. 147-171.

10 Mario Docci y Diego Maestri, *op. cit.*, p. 3.

ESCÁNERES LÁSER Y DE LUZ BLANCA EN EL ESTUDIO DE PATRIMONIO MATERIAL

Durante la década de 1960, el desarrollo de la tecnología de escaneo se empleó con la intención de recrear espacios de manera virtual, así como la superficie de objetos. Se basaba, principalmente, en la utilización de luces, cámaras y proyectores para realizar el registro tridimensional. Debido a las diversas limitaciones que se experimentaban —básicamente, el tiempo que se invertía en el proceso de escaneo con resultados de baja precisión—, en los años ochenta los anteriores dispositivos fueron reemplazados por escáneres de barrido láser y de luz blanca, con lo que se obtuvieron mejores resultados. En el último par de decenios, la aplicación de esta tecnología se llevó a la industria petrolera para documentar plataformas y refinerías.¹¹ Hoy en día, gracias a la portabilidad y el perfeccionamiento de los escáneres de largo alcance, se utiliza en el registro de la arquitectura patrimonial arqueológica e histórica.

El propósito principal de un escáner láser es reconstruir la geometría precisa de un objeto. En el caso particular de un monumento histórico o arqueológico, se realizan múltiples tomas o escaneos para cubrir todos los espacios requeridos que posteriormente son interpretados en gabinete.

Esto último se hace mediante un proceso sistemático que registra cada una de las tomas con la ayuda de *Cyclone*, software especializado conformado por varios módulos para procesos específicos, como la interpretación de la nube en programas asistidos por *computer-aided design* (CAD) y modelado, así como el proceso de empalme y limpieza de información ajena a la estructura arquitectónica, lo que permite conformar una reconstrucción digital analítica tridimensional única. Otro de los procesos es la unificación que permite eliminar los puntos que coinciden en la misma coordenada, ya que, al realizar las diversas tomas, hay espacios que pueden verse desde varios sitios. Ello permite reducir el peso del archivo digital y la demanda técnica del equipo informático en el que se realizará la interpretación.

Al respecto cabe señalar que, para realizar una reconstrucción digital, se hacen varios centenares de tomas, cada una de las cuales requiere en promedio 15 minutos, en la que debe existir una previa planeación que identifique las ubicaciones posteriores para cada toma (figuras 5 y 6).¹² Además, para su almacenamiento, se necesita un espacio de disco duro que va desde los 100 GB hasta 0.5 TB, en la que se incluye el posproceso de información.

11 Ander Cervero, "Extracción y clasificación de objetos a partir de una nube de puntos registrada con un escáner láser móvil", Oviedo, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, 2016 (versión digital).

12 La estimación del tiempo se basa en la utilización del modelo HDS ScanStation P20.



Figura 5. Toma 1. Perspectiva en nube de puntos del templo y antiguo convento San Juan Bautista, Tlayacapan, Morelos. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2012.



Figura 6. Toma 2. Perspectiva en nube de puntos del templo y antiguo convento San Juan Bautista, Tlayacapan, Morelos. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2012.





Figura 7. Perspectiva en nube de puntos del templo y antiguo convento de Nuestra Señora de la Asunción, Tochimilco, Puebla. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2013.



Ejemplo de esto es la reconstrucción tridimensional del conjunto conventual de la Asunción de Nuestra Señora en el municipio de Tochimilco (figura 7), en el estado de Puebla, localizado en las faldas del volcán Popocatepetl e inscrito en la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO. El modelo de este se realizó con 579 tomas.¹³

La información tridimensional de los monumentos es obtenida de forma superficial mediante la cantidad de luz que es reflejada o emitida por los materiales como una propiedad física, generándose un espectro de color de diversas gamas de amarillos, verdes y naranjas, principalmente.

13 El trabajo fue realizado, mediante la contratación del servicio especializado de levantamiento arquitectónico tridimensional, por la empresa 3D Laser Solutions, S. A. de C. V.

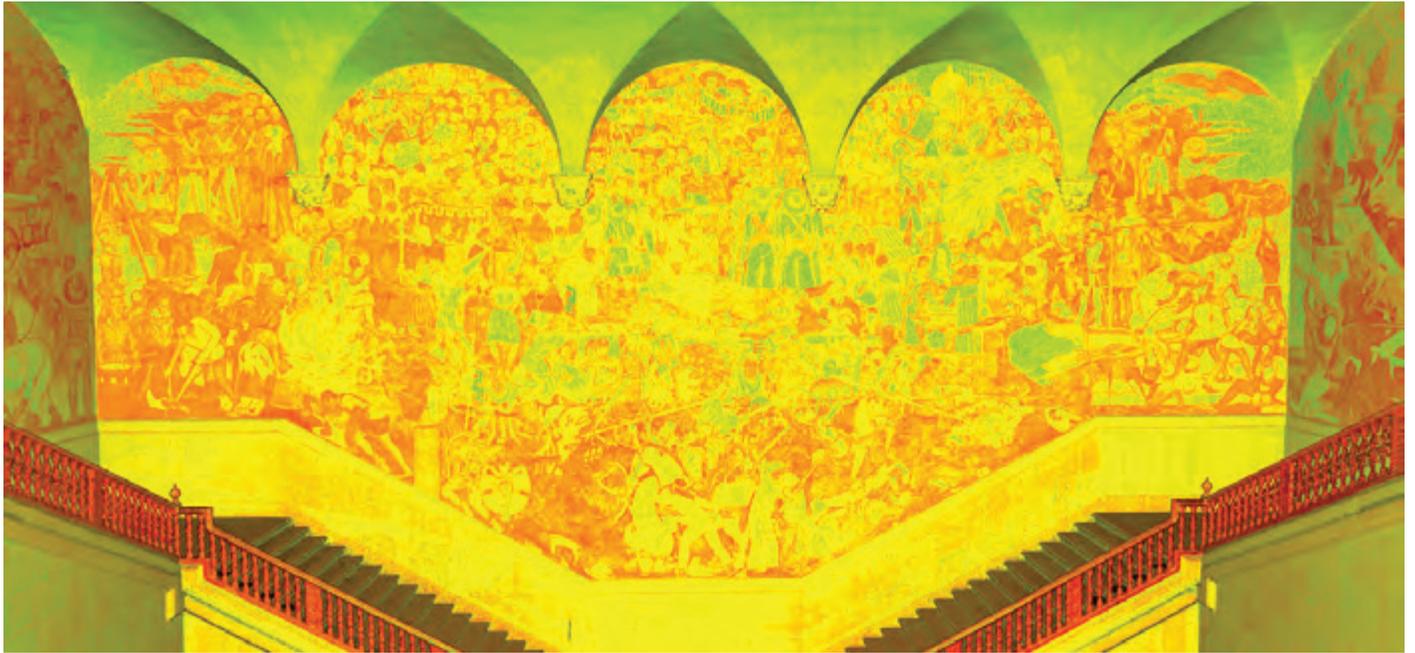


Figura 8. Pintura mural *La epopeya del pueblo mexicano* en nube de puntos, ubicada en la escalera monumental del Palacio Nacional. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2015.



Existen diferentes láseres, en los que el tipo uno y dos corresponden a los escáneres de largo alcance con los que actualmente se trabaja y que tienen como principal característica una baja potencia que puede ser aplicada a diversos tipos de materiales, pintura mural (figura 8), elementos arquitectónicos, entre otros, sin causar alteración alguna en su fábrica.

La tecnología se caracteriza por el largo alcance que puede llegar hasta los 300 m con un margen de error menor a los 6 mm en 50 m; tiene como materia prima nubes de puntos que se ubican en coordenadas únicas con valores en XYZ, lo que posibilita obtener millones de mediciones de alta precisión (figura 9).

Un primer elemento de conservación que ha posibilitado el escáner de barrido láser es la integración de una base de datos de reconstrucciones tridimensionales que se resguarda en la Unidad de Informática de la CNMH y que, hasta finales de 2016, contenía 90 levantamientos arquitectónicos con distintos avances, los cuales se respaldan por medio de una *Network Attached Storage* (NAS), nombre dado a una tecnología de almacenamiento por la que se envía la información al *site* institucional.

Solo por mencionar un ejemplo de gran complejidad arquitectónica, está el templo y antiguo convento franciscano de Santa Ana, Tzintzuntzan, en el estado de Michoacán (figura 10). El trabajo de escaneo se inició en el 2009 y se concluyó en el 2013, con un total de 224 tomas obtenidas para registrar cabalmente

Figura 9. Escáner láser, modelo HDS ScanStation 2, utilizado por el LIAD-CNMH en el 2009.



Figura 10. Perspectiva en nube de puntos del templo y antiguo convento franciscano de Santa Ana, Tzintzuntzan, Michoacán. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2009

la morfología del conjunto conventual y, paralelamente, generar planimetrías y altimetrías de alta precisión como información base para desarrollar el proyecto ejecutivo de intervención.

Otros ejemplos que forman parte de la base de datos son inmuebles de la Ciudad de México, como el Palacio Nacional con sus cuatro fachadas; el patio principal (figura 11), y los patios Marianos, así como las escaleras de la Emperatriz, la monumental y el Recinto a don Benito Juárez; las fachadas de la Catedral Metropolitana (figura 12); las zonas arqueológicas del Templo Mayor (figura 13) y Tlatelolco. Por su parte, al interior de la República mexicana, se cuenta, por ejemplo, con el fuerte de San Juan de Ulúa (figura 14) y el baluarte de Santiago (figura 15), ambos en el Puerto de Veracruz, así como con el Templo de la Serpiente Emplumada, en la zona arqueológica de Teotihuacan (figura 16): este fue uno de los primeros levantamientos arquitectónicos realizados por el personal del laboratorio en apoyo al proyecto de investigación arqueológica denominado *Tlalocan, Camino bajo la tierra de Teotihuacan*, al que se le ha dado seguimiento durante 11 etapas de registro tridimensional que ha dado como resultado el escaneo total del túnel y algunos elementos (ofrendas) descubiertos bajo la estructura arqueológica.



Figura 11. Vista en nube de puntos del patio principal del Palacio Nacional, Centro Histórico de la Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2015.



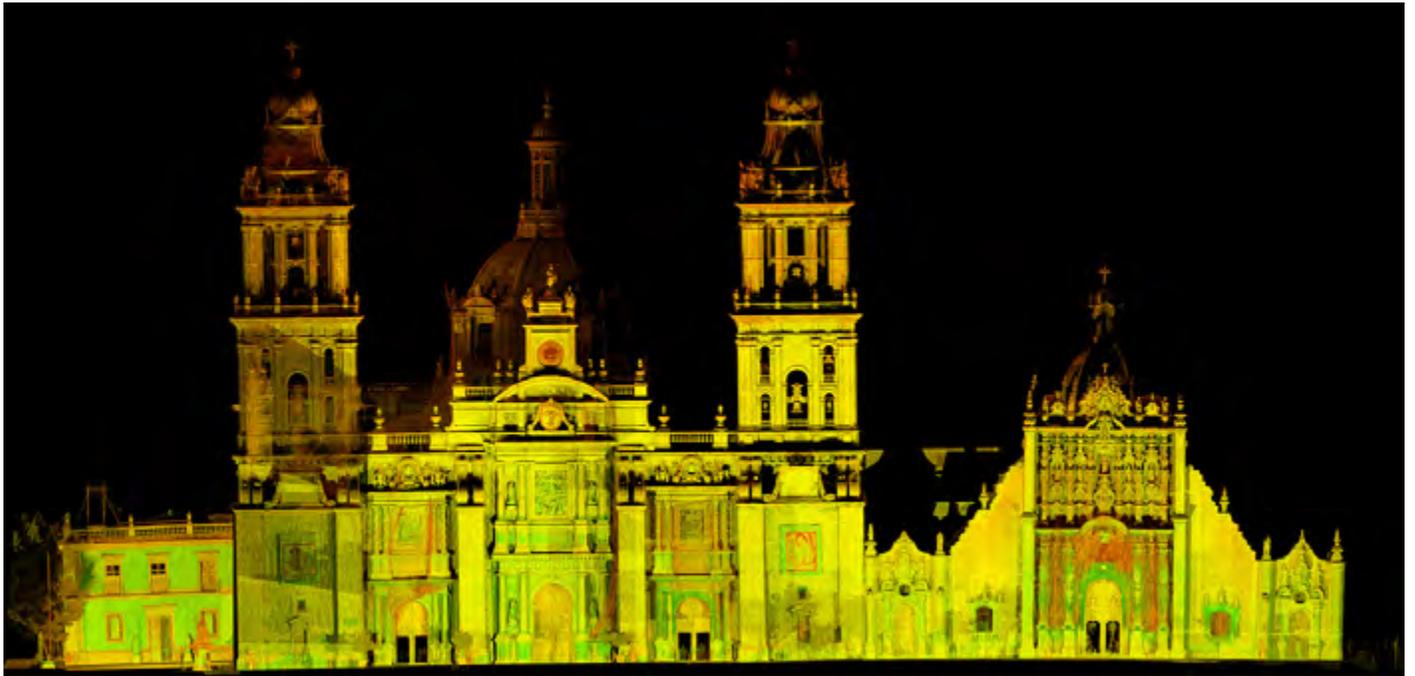


Figura 12. Fachada en nube de puntos de la Catedral Metropolitana, Centro Histórico de la Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2009.



Figura 13. Perspectiva en nube de puntos, zona arqueológica Templo Mayor, Centro Histórico de la Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2014.





Figura 14. Perspectiva en nube de puntos del fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz.
Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.



Figura 15. Perspectiva en nube de puntos del baluarte de Santiago, Veracruz.
Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2014.



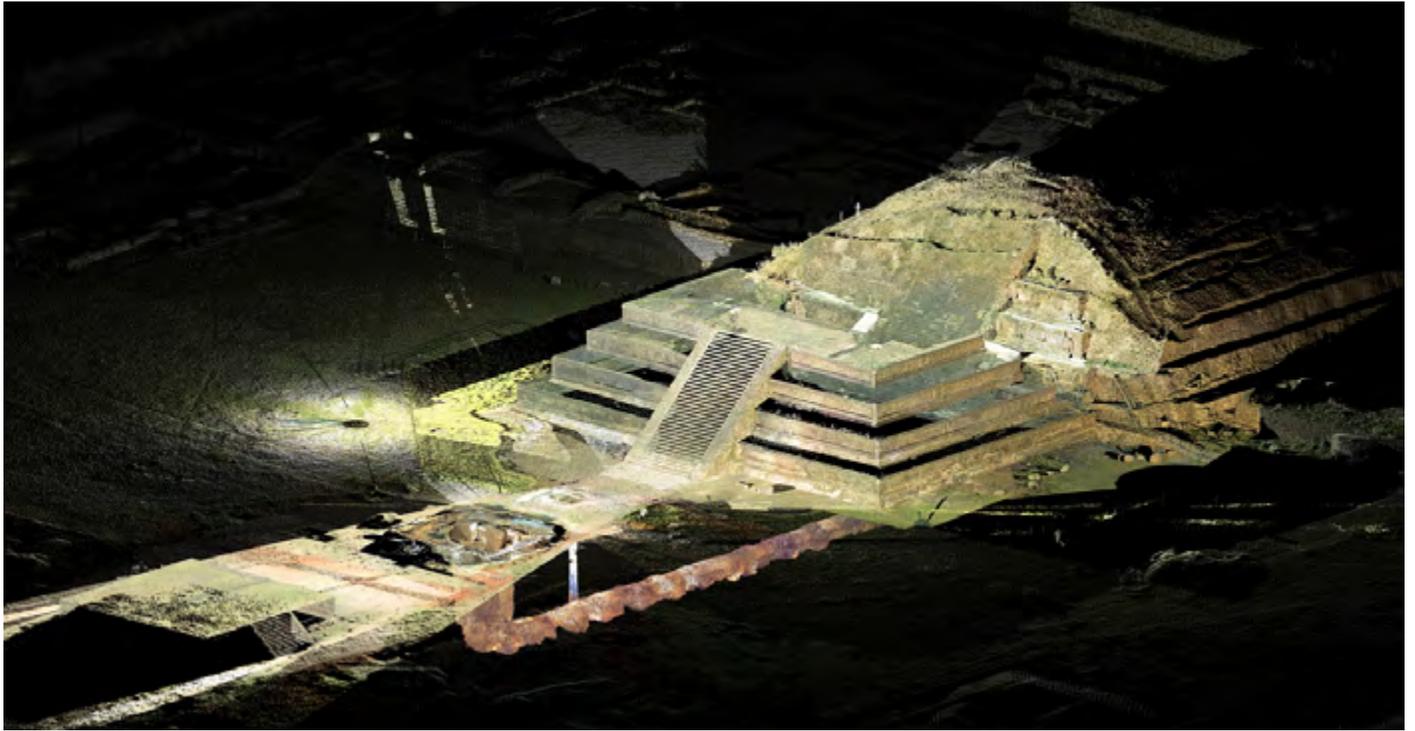


Figura 16. Perspectiva en nube de puntos del túnel localizado bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, zona arqueológica de Teotihuacan, México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2009.



En el 2014, gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), a través de la CNMH, recibió un importante financiamiento para la adquisición de equipo especializado de laboratorio de medición de alta precisión. Así, se incorporaron al proyecto un escáner de barrido láser de última generación HDS ScanStation P20 (figura 17), un dispositivo para dar un geoposicionamiento satelital a cada uno de los levantamientos arquitectónicos (figura 18) y un escáner de barrido de luz blanca Go!SCAN20 (figura 19).



Figura 17. Escáner láser, modelo HDS ScanStation P20.



Figura 18. Receptor GPS , modelo GNSS 14.



Figura 19. Escáner de luz blanca, modelo Go!SCAN20.



A diferencia de los escáneres de barrido láser, los de luz blanca son soluciones integrales de medición óptica tridimensional con un campo de visión en forma de cono. Trabajan mediante la medición de un patrón codificado de luz *light-emitting diode* (LED), es decir, diodo emisor de luz por el que se obtiene la geometría exacta de un objeto; su lectura superficial da un mayor detalle, a diferencia de los escáneres de barrido de láser de largo alcance, llegando a una precisión de 1 000 μm o su equivalente de 0.1 mm con una profundidad de campo aproximada de 40 a 50 cm y tomas fotográficas de alta definición (figura 20).



Figura 20. Escaneo por luz blanca con Go!SCAN20 del remate zoomorfo de sahumador localizado en el Nevado de Toluca, México, en resguardo de la Subdirección de Arqueología Subacuática de la CNA-INAH. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2015.





Como resultado del escaneo se obtiene una malla triangulada de gran detalle (figura 21), así como una fotografía rectificada que complementa la geometría digital de los objetos.

Su aplicación debe realizarse en piezas de dimensiones no mayores a 60 cm. Las de superficies de mayores dimensiones deberán ser procesadas en algún *software* que pueda interpretar los múltiples formatos de salida de la plataforma *VXElements* del escáner Go!SCAN20 para integrar un solo modelo tridimensional de mayores dimensiones conservando el grado de detalle.

Aunque su adquisición es reciente, ya se comenzó a experimentar su aplicación en bienes muebles obtenidos de naufragios en aguas nacionales y aguas abiertas en resguardo de la Subdirección de Arqueología Subacuática de la Coordinación Nacional de Antropología del INAH. Igualmente se ha registrado un petrograbado en apoyo al proyecto de investigación arqueológica Uacúsecha, en Zacapu, Michoacán.¹⁴

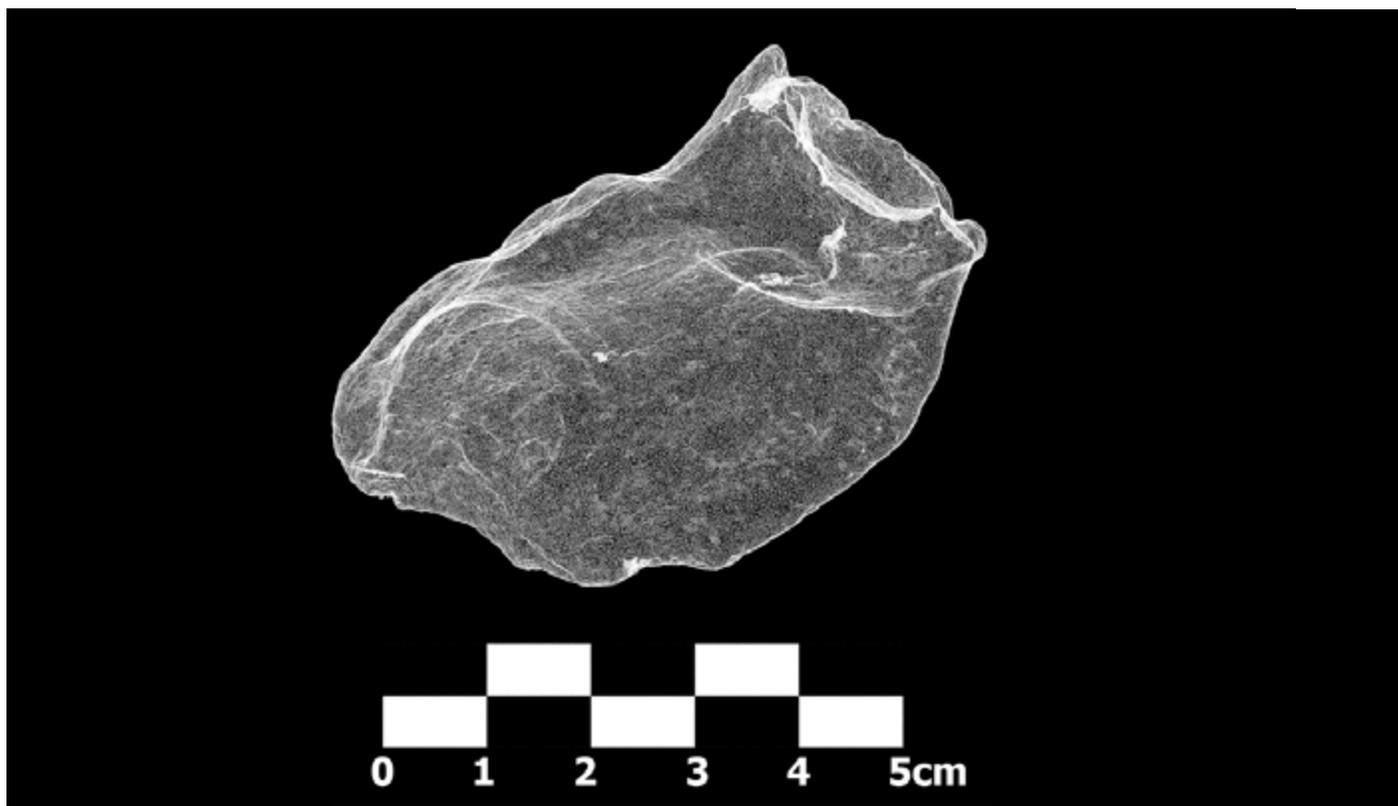


Figura 21. Malla triangulada de remate zoomorfo de sahumador. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2015.



14 Proyecto coordinado por el doctor Grégory Pereira.

Así, a lo largo de ocho años ininterrumpidos de trabajo de campo y de gabinete, y gracias a los resultados obtenidos, ha sido posible posicionar al INAH a escala mundial como uno de los principales productores de información tridimensional obtenida por el procedimiento de barrido láser aplicada al patrimonio material.

Pero, como ya se mencionó, la conservación del patrimonio no se reduce a su identificación y representación, sino que implica también su estudio, restauración, difusión y divulgación. Precisamente, como veremos a continuación, es el levantamiento tridimensional el que puede auxiliar en la realización de esas tareas (figuras 22 a 26).



Figura 22. Perspectiva en nube de puntos de la plaza de Santo Domingo de Guzmán, Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2013.





Figura 23. Reconstrucción tridimensional en nube de puntos del Monolito de Tláloc de Cuatlinchán, Museo Nacional de Antropología, Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2014.



Figura 24. Perspectiva en nube de puntos con fotografía de la capilla de la Inmaculada Concepción, conocida como "La Conchita", Delegación Coyoacán, Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2011.





Figura 25. Perspectiva en nube de puntos del templo y antiguo convento de San Mateo Apóstol, Atlatlahucan, Morelos. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2012.



Figura 26. Perspectiva en nube de puntos del templo y antiguo convento de Santo Domingo de Guzmán, Hueyapan, Morelos. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2012.



LOS USOS DE LAS RECONSTRUCCIONES DIGITALES TRIDIMENSIONALES

El patrimonio material se ha definido como la transmisión de mensajes culturales vía objetos. Es decir, que los bienes muebles e inmuebles que lo conforman nos permiten conocer una sociedad y la forma en que ha cambiado. Si bien es cierto que dichos objetos son significados desde nuestro presente, no por ello dejan de ser una manera para aproximarnos al pasado.

En ese sentido, las reconstrucciones digitales tridimensionales obtenidas nos dan la posibilidad de “jugar” con ellas desde la pantalla para generar y comprobar hipótesis. Solo por mencionar un par de ejemplos: en el caso de los bienes inmuebles, nos permiten analizar las fases constructivas de una edificación o la distribución de los espacios y, con ello, entender la forma en la que el hombre ha organizado el lugar que habita y vertido en él su manera de pensar el mundo (figura 27); en cuanto a los bienes muebles, las reconstrucciones digitales nos aproximan a los detalles, su manufactura, su firma, sus materiales e incluso nos facilitan verificar su autenticidad. De esta manera, podemos acercarnos a las características y formas de vida de las sociedades que nos han antecedido.

Asimismo, con el detalle que nos proporciona el trabajo de los escáneres detectamos las transformaciones que ha sufrido el objeto, mueble o inmueble, a lo largo del tiempo; esto nos da cuenta, por ejemplo, de las distintas formas de apropiación en su devenir. Con base en tales resultados tenemos mayores elementos para tomar decisiones de la preservación o no de ciertas estructuras o elementos, dependiendo tanto de su valor estético y arquitectónico como del significado que han tenido y tienen.

En conjunto, la investigación histórica que realicemos con base en las posibilidades que nos brindan las reconstrucciones tridimensionales nos permitirá reconocer las transformaciones de los objetos que resguardamos y conservamos, pero, más importante aún, nos dará cuenta de las que hemos experimentado como sociedad. Es por ello que el patrimonio tangible se constituye como la memoria edificada de una sociedad.

Por otra parte, un campo en el que el levantamiento arquitectónico es imprescindible es en la restauración de bienes culturales inmuebles: es la base de cualquier metodología correcta de intervención conservativa, por lo que ningún trabajo de restauración debiera iniciarse sin haber antes haber registrado de manera meticulosa el bien por intervenir, considerando precisamente que al conocimiento profundo de la obra se llega mediante dicho levantamiento (figura 28).

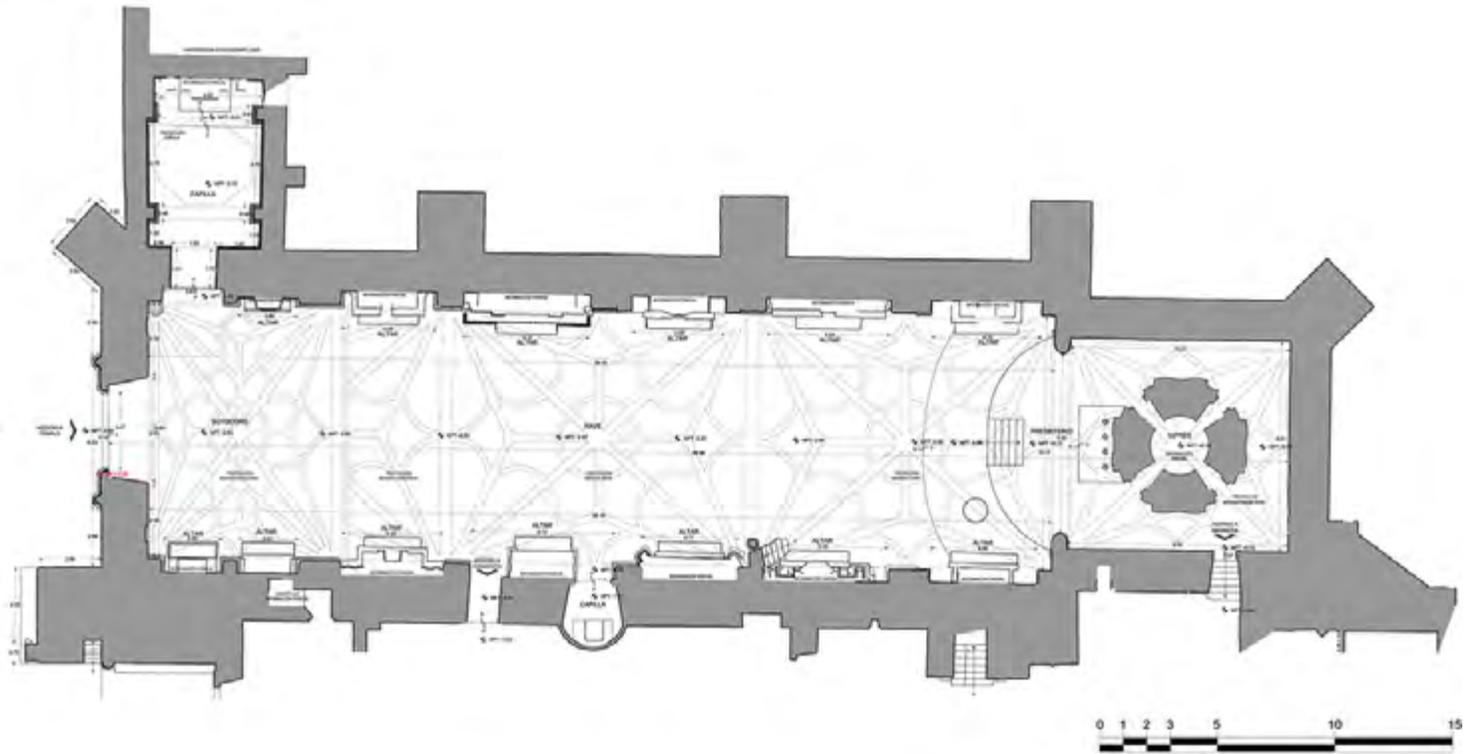


Figura 27. Dibujo de planta arquitectónica a partir del registro tridimensional del templo y antiguo convento de Nuestra Señora de la Asunción, Tochimilco, Puebla. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2014.

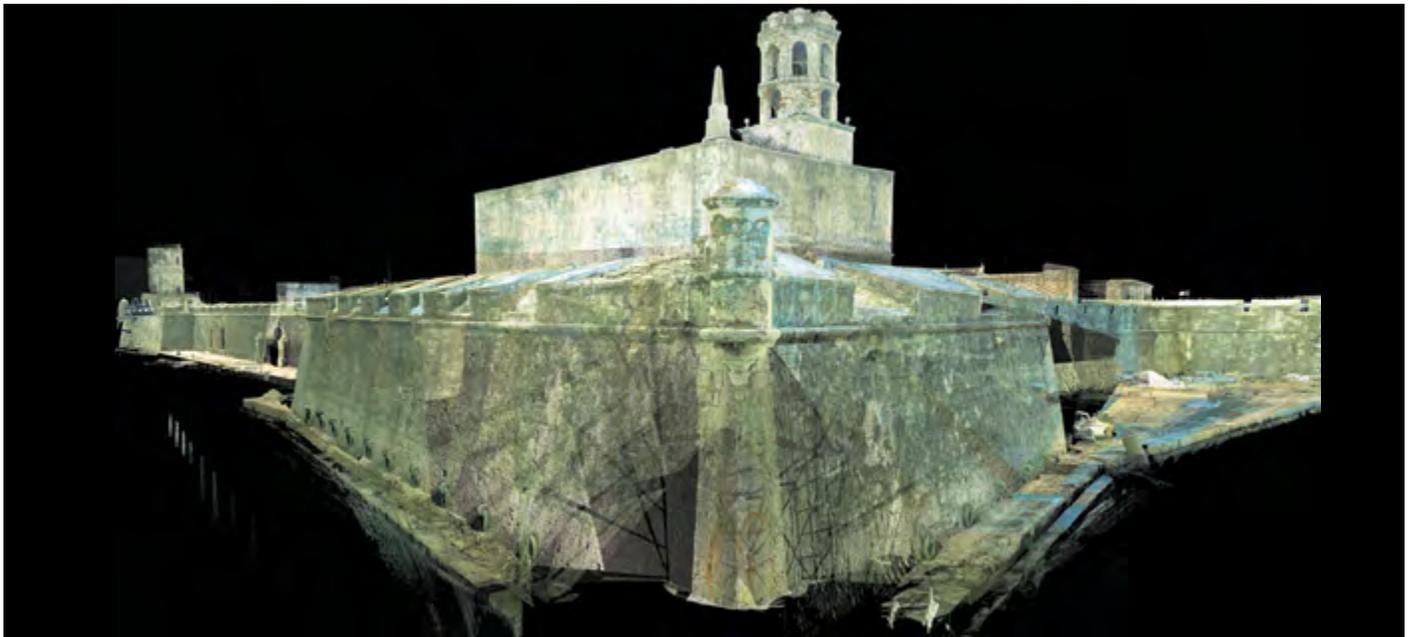


Figura 28. Perspectiva en nube de puntos del baluarte y garitón de San Crispín, fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.



Para el arquitecto-restaurador el análisis e interpretación de la geometría y del espacio de una obra arquitectónica, a la par de cualquier tipo de investigación documental para la elaboración del proyecto de restauración, se considera requisito ineludible. Se debe tender al máximo rigor científico en cada fase del estudio y de la realización del levantamiento, así como de la elaboración de los gráficos correspondientes (figura 29), con la finalidad de obtener una comprensión integral del organismo arquitectónico que, a la vez, permitirá una fundamentada toma de decisiones en el desarrollo de proyectos y obras de intervención (figura 30).

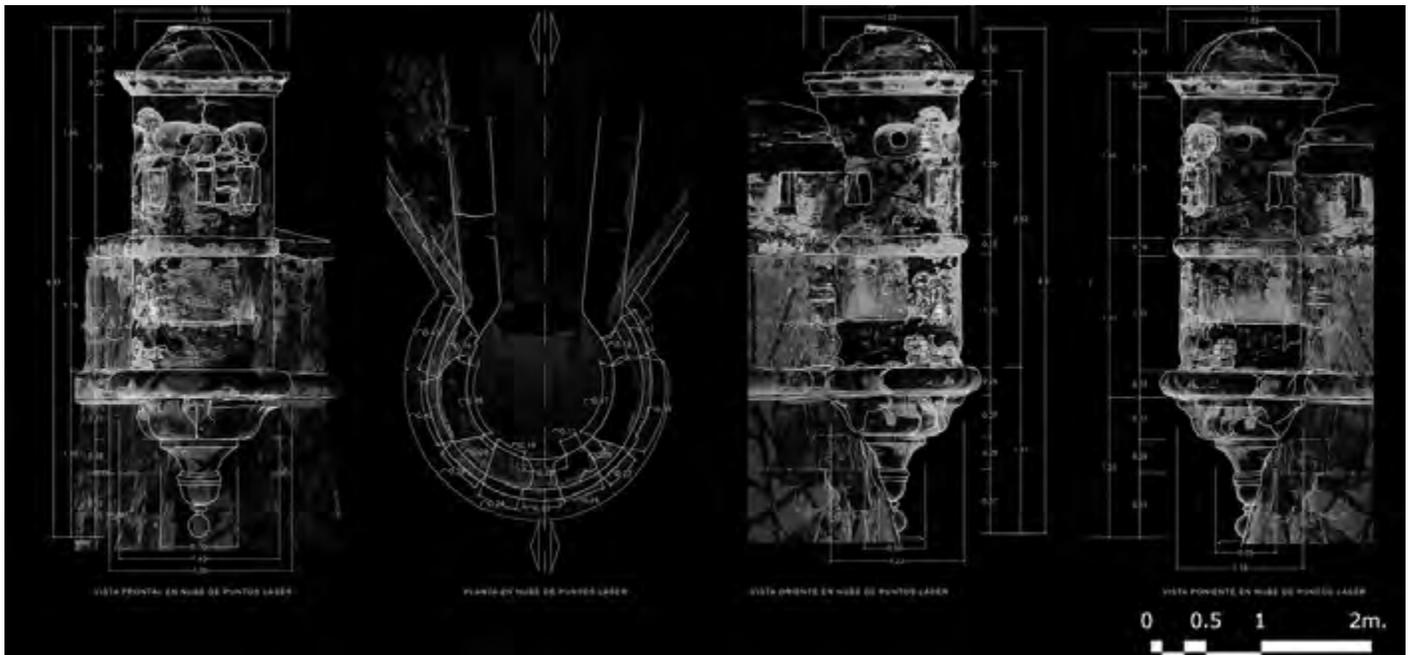


Figura 29. Análisis dimensional del garitón de San Crispín, fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.





Figura 30. Proceso de restauración del garitón de San Crispín, fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz.
Fuente: Valeria Valero, 2010.



Como se ha mencionado, los levantamientos arquitectónicos realizados con escáneres láser y de luz blanca dan como resultado reconstrucciones digitales tridimensionales de alta precisión, de los que es posible extraer un conjunto complejo de datos acerca de las características morfológicas de los monumentos y de los daños que presenta, desde pequeñas fisuras, hasta grandes desplomes, desde abufamientos en el terreno, hasta delicadas decoraciones y bajorrelieves. En otras palabras, con escáneres es posible tener a disposición, en poco tiempo, un gran y detallado conjunto de datos cualitativos y cuantitativos que, a través de un correcto análisis, pueden mostrarnos las condiciones estructurales y de deterioro del inmueble (figuras 31 a 34).

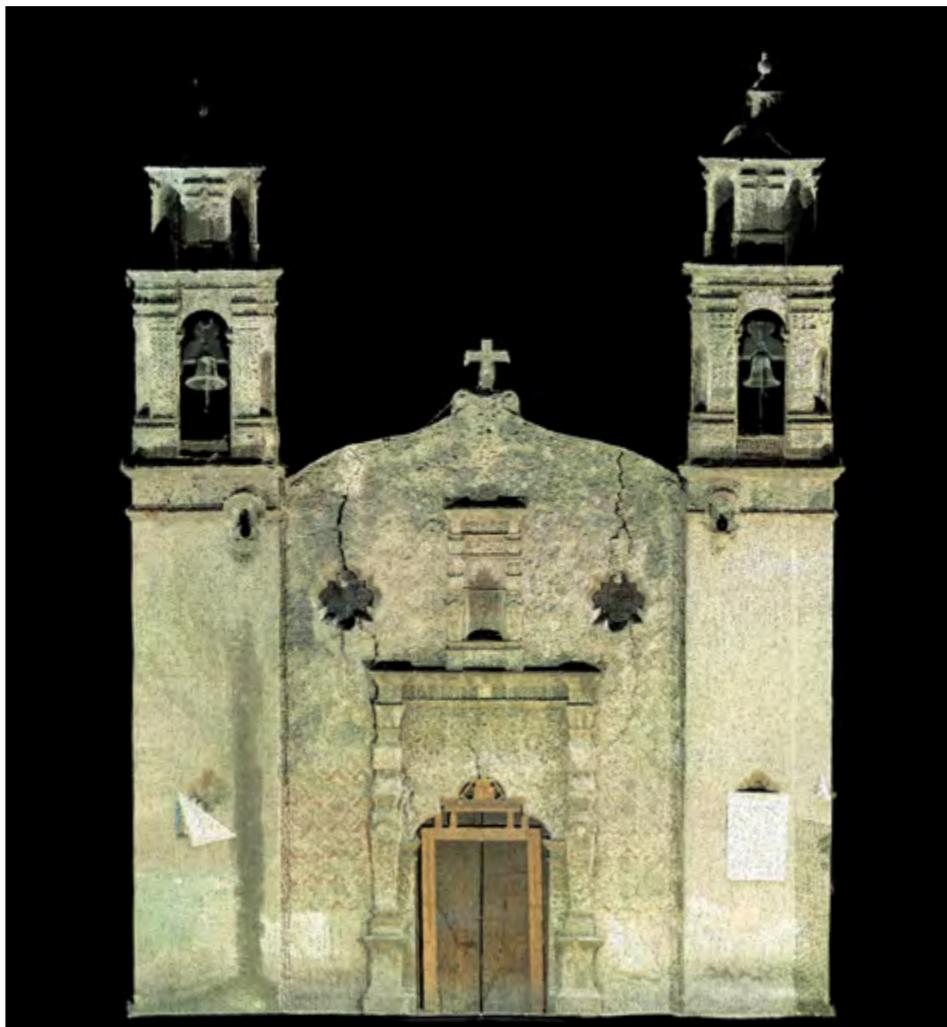


Figura 31. Fachada principal en nube de puntos con fotografía de la capilla de la Inmaculada Concepción, conocida como "La Conchita", Delegación Coyoacán, Ciudad de México.
Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2011.



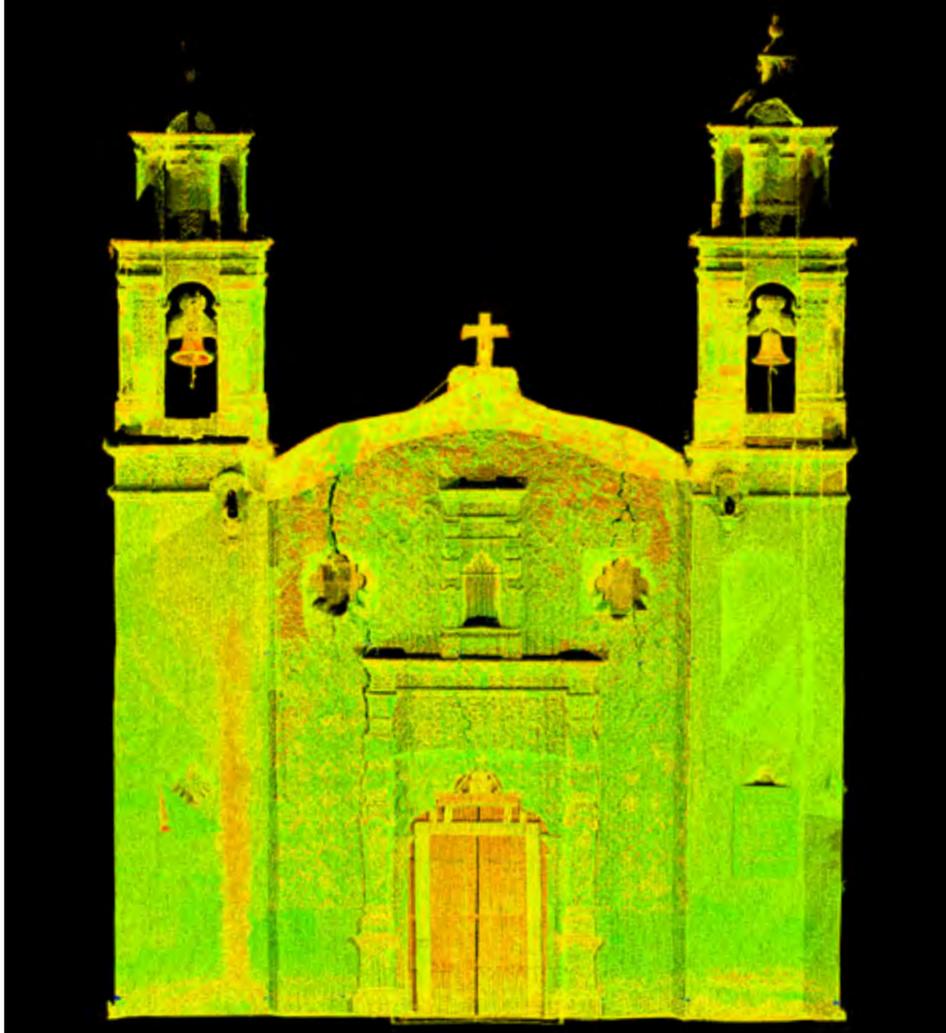


Figura 32. Fachada principal en nube de puntos de la capilla de la Inmaculada Concepción, conocida como "La Conchita", Delegación Coyoacán, Ciudad de México.
Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2011.





Figura 33. Sección longitudinal en nube de puntos de la capilla de la Inmaculada Concepción, conocida como "La Conchita", Delegación Coyoacán, Ciudad de México.
Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2013.



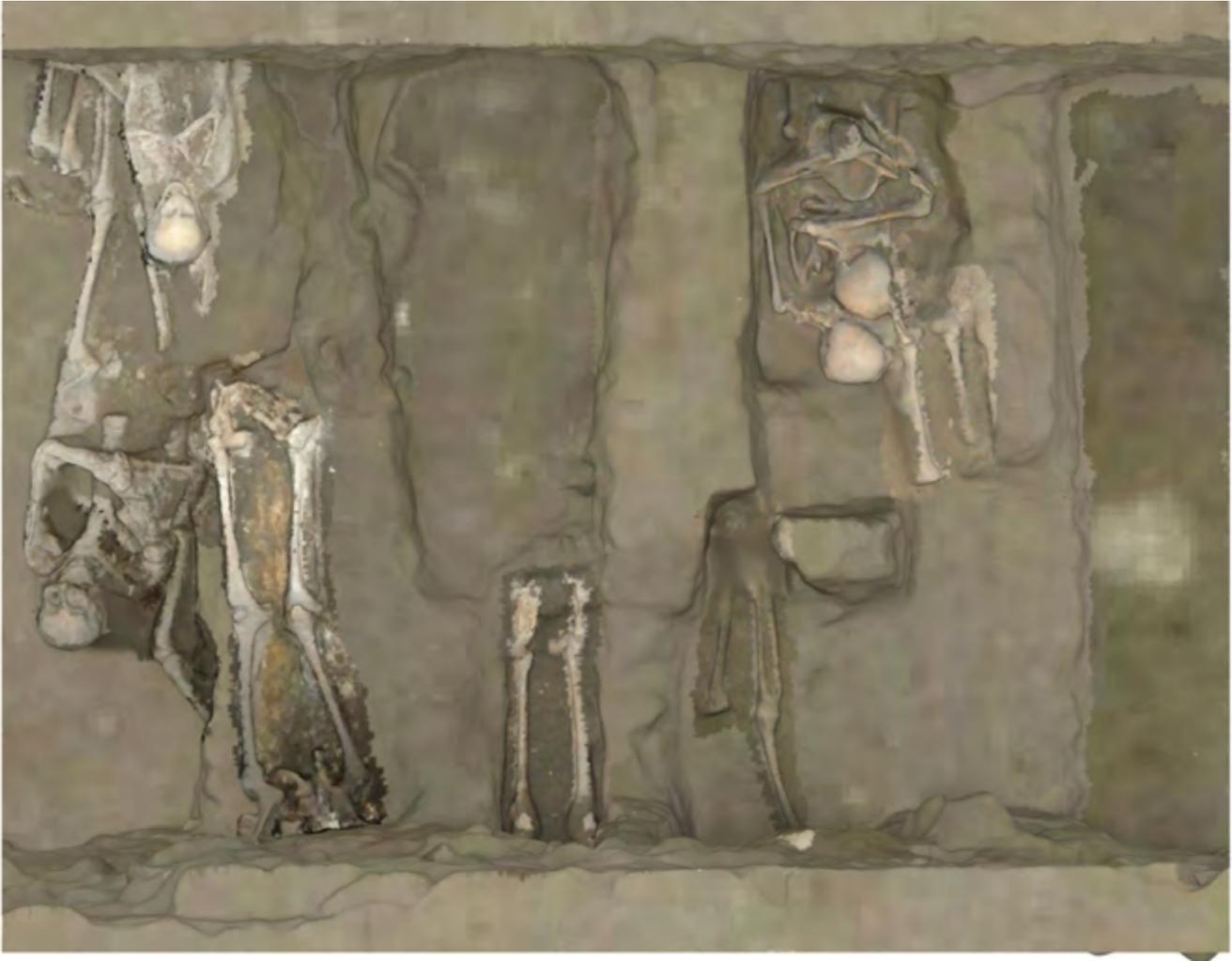
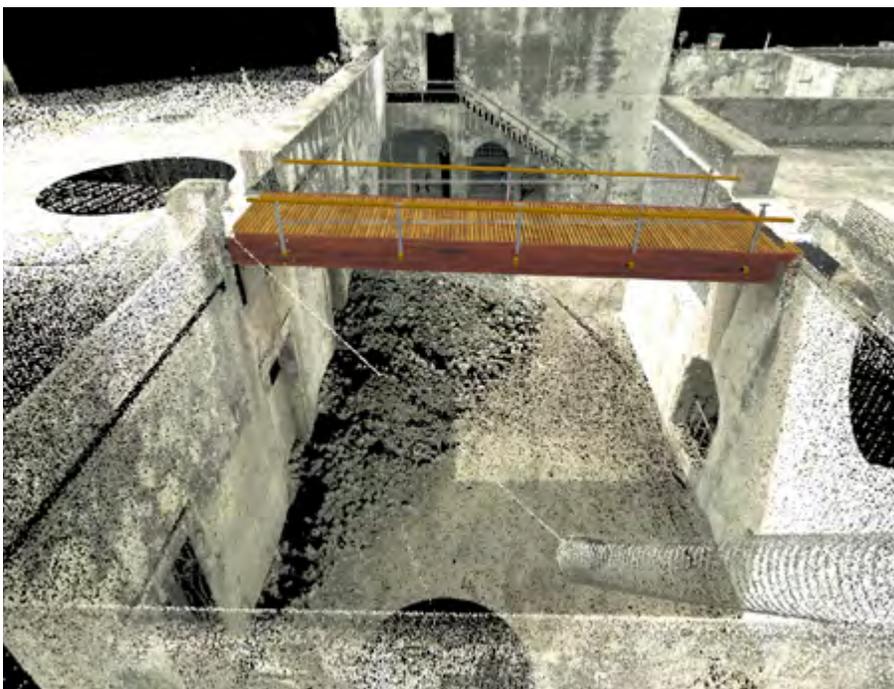


Figura 34. Modelo sólido a partir de una nube de puntos de la excavación arqueológica realizada en la capilla de la Inmaculada Concepción, conocida como "La Conchita", Delegación Coyoacán, Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2013.



Una vez obtenido el conocimiento integral del inmueble por medio de los levantamientos de alta precisión, de la investigación documental y de la observación directa, las nubes de puntos vuelven a tener una gran utilidad, como ya se mencionó, en las decisiones proyectuales. Operaciones como la anastilosis¹⁵ o las reintegraciones¹⁶ se pueden hacer de manera virtual, es decir, sin necesidad de intervenir el bien físicamente, para conocer el resultado previsto. Asimismo, la integración de elementos nuevos, ya sea para fines de reestructuración, de funcionalidad o cualquier otro, se pueden reproducir virtualmente para conocer *a priori* el impacto, visual o estético, que estos tendrán dentro del monumento antiguo (figura 35).

Figura 35. Reintegración virtual del puente Carranza realizado en 3D Max y sobrepuesto en la nube de puntos del fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz.
Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.



15 En el campo de la restauración del patrimonio material inmueble se conoce como “anastilosis” a la técnica de reconstrucción de aquellos bienes arqueológicos o históricos en ruinas por medio de la utilización de los materiales propios del monumento que se hallan derribados, generalmente, próximos al sitio. A modo de rompecabezas, los especialistas estudian cómo debió ser el bien y comienzan la reconstrucción reutilizando sus propios materiales y procurando que estos ocupen el mismo lugar que tenían y desempeñen la misma función para la que fueron creados. *La Carta de Atenas* hace mención que “cuando se trata de ruinas, se impone una escrupulosa labor de conservación y, cuando las condiciones lo permitan, es recomendable volver a su puesto aquellos elementos originales encontrados (anastilosis)”. UNESCO, *Carta de Atenas*, Primera Conferencia Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Atenas, 1931.

16 Se entiende por “reintegración” la reconstrucción de una laguna o faltante con el objeto de recrear la unidad de imagen alterada o perdida para recuperar la legibilidad y comprensión de la obra. Cristina Giannini y Roberta Roani, *Diccionario de restauración y diagnóstico*, Donostia-San Sebastián, Nerea, 2008, p. 174.

Ahora bien, en cuanto a la difusión y divulgación del patrimonio material, los modelos tridimensionales triangulados ofrecen la posibilidad de generar contenidos atractivos para interesar a públicos diversos y, de esta manera, conocer el patrimonio, ya sea al visualizarlos o, incluso, tocarlos mediante su impresión en 3D (figuras 36 y 37).



Figura 36. Impresión tridimensional por estereolitografía en escala 1:15 del garitón de San Crispín, fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.



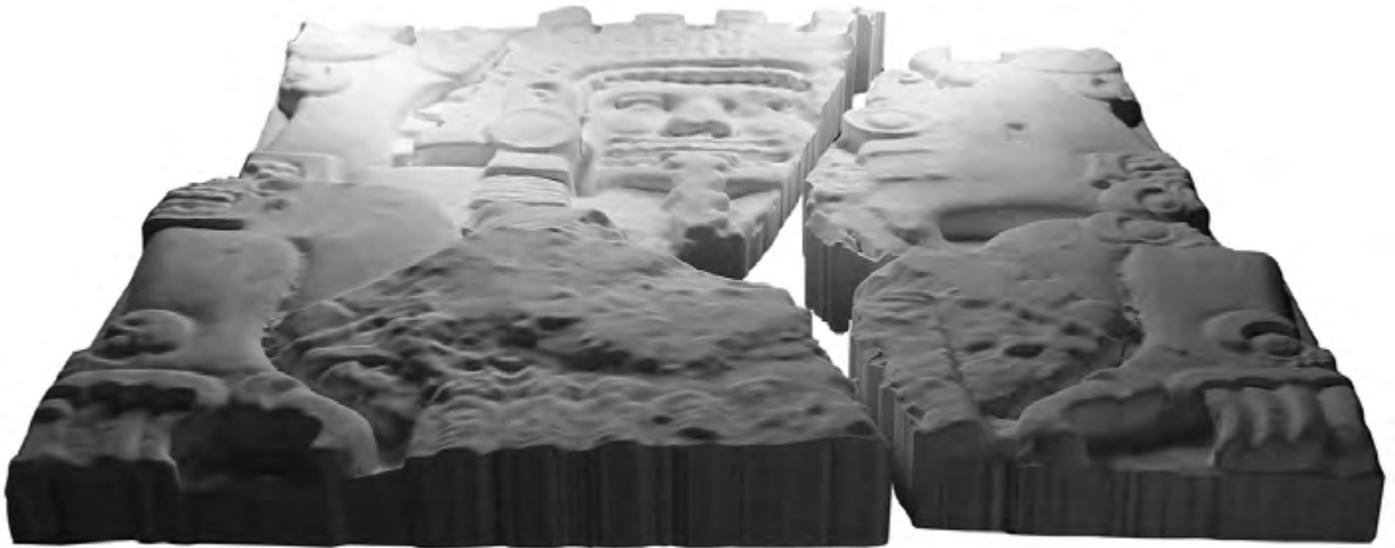


Figura 37. Impresión tridimensional del monolito de la diosa Tlaltecuhltli, Centro DIAPREM, Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara, Salone dell'Arte del Restauro e della Conservazione dei Beni Culturali, Ferrara, Italia, 2008.



Así, las posibilidades de difusión, pero, principalmente, de divulgación que nos dan los levantamientos son innumerables y van desde hacer recorridos virtuales y proyecciones explicativas, hasta museos interactivos, entre muchas otras.

A partir de ese atractivo visual como herramienta, lo fundamental es ubicar la pieza en su entorno sociocultural, es decir, generar, con un lenguaje accesible, un discurso que nos permita el reconocimiento de ese patrimonio, pues mientras mayor pluralismo integre, tendrá mayores posibilidades de conservarse.

En conjunto, el uso de los escáneres láser, ya sea como una alternativa o como complemento de las técnicas tradicionales empleadas, tiene grandes ventajas en su aplicación para proyectos de conservación llevados a cabo por diversas disciplinas. Las recurrentes formas irregulares de las construcciones antiguas y la necesidad de reconstruir (física o virtualmente) su exacta geometría hacen que la tecnología que nos ocupa sea particularmente útil en la conservación (figuras 38 a 41).

Las nubes de puntos o mallas poligonales producidas por estos instrumentos son una herramienta flexible capaz de atender múltiples necesidades, ya que a partir de estas se pueden extraer distintos tipos de información, en varios momentos, para cumplir diversos objetivos. Cabe hacer mención de que la nube de puntos

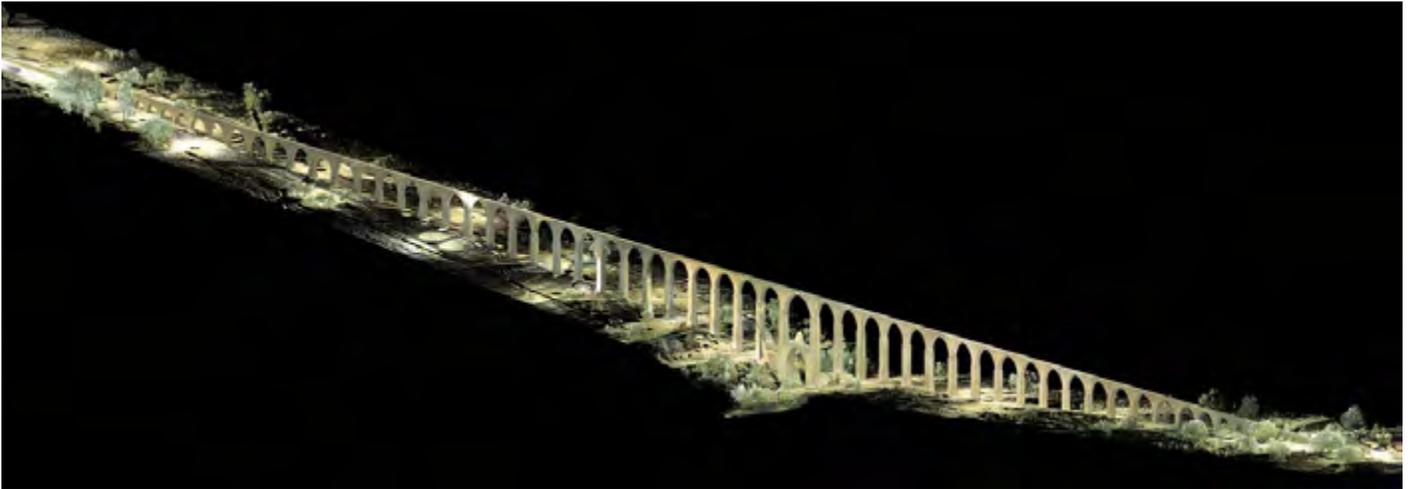


Figura 38. Arcada monumental del acueducto del padre Tembleque en los municipios de Tepeyahualco, Hidalgo, y Nopaltepec, México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.



Figura 39. Arqueología virreinal del antiguo convento de Santa Isabel, ubicado al costado oriente del Palacio de Bellas Artes, Ciudad de México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2010.





Figura 40. Nube de puntos de la fachada principal del templo y antiguo convento franciscano de Santa Ana, Tzintzuntzan, Michoacán. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2009.



Figura 41. Fachada principal en nube de puntos con fotografía de la Casa del gobernador en el fuerte de San Juan de Ulúa, Veracruz. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2011.



no es un producto terminado, sino se trata de una base de datos que requiere ser procesada e interpretada por operadores capacitados (figura 42).

La gran cantidad de posibilidades que ofrecen los posprocesos realizados en gabinete hacen obligatoria la definición de propósitos claros desde la etapa inicial de escaneo, así como la selección de los productos o insumos que se quieren obtener para su posterior análisis: planos arquitectónicos generales o a detalle, modelos sólidos, maquetas tridimensionales, recorridos virtuales, entre otros.

Por lo antes descrito, la interpretación de los datos es la fase más compleja, en la que se requiere la experiencia y la meticulosidad del especialista. Si bien los modelos tridimensionales son un importante apoyo para el estudioso, en modo alguno sustituyen el reconocimiento y el análisis que este debe hacer *in situ* ni la adecuada interpretación de los datos recolectados (figura 43). A pesar de los grandes avances tecnológicos, la observación y el conocimiento humanos aún no han sido sustituidos.

En síntesis, los modelos tridimensionales posibilitan preservar la memoria colectiva mediante referentes materiales, "compartir" el patrimonio, estudiarlo desde diferentes disciplinas, así como analizar y promover distintas formas de su apropiación; es decir, facilitan que introduzcamos más libertad y creatividad en las conexiones con el patrimonio. Después de todo, el fin último de su conservación es generar relaciones y significados entre quienes lo hemos heredado a partir de identificarnos con él para reforzar nuestro sentido de pertenencia.



Figura 42. Interpretación de las nubes de puntos en el software Cyclone, Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2013.





Figura 43. Fachada principal en nube de puntos con fotografía del templo de San Agustín, Acolman, México. Fuente: LIAD-CNMH-INAH, 2014.



BIBLIOGRAFÍA

Cervero, Ander, *Extracción y clasificación de objetos a partir de una nube de puntos registrada con un escáner láser móvil*, Oviedo, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, 2016 (versión digital).

Cignola, Michela, "Il rilevamento per la conoscenza del costruito", en *Metodi e tecniche della rappresentazione*, Cassino, Università degli Studi di Cassino, 2001 (versión digital).

Docci, Mario y Diego Maestri, *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*, Bari, Editori Laterza, 1984.

Docci, Mario y Diego Maestri, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Roma-Bari, Editori Laterza, 2006.

Florescano, Enrique, "La creación del Museo Nacional de Antropología", en *El patrimonio nacional de México II*, México, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Fondo de Cultura Económica, 2013.

Giannini, Cristina y Roberta Roani, *Diccionario de restauración y diagnóstico*, Donostia-San Sebastián, Nerea, 2008.

Monge, Gaspard, *Geometría descriptiva. Lecciones dadas en las escuelas normales en el tercero año de la República*, Madrid, Imprenta Real, 1803 (versión digital).

Prado, Antonio, "De herramientas a instrumentos", en *XIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, editado por J. P. Laporte, H. Escobedo, B. Arroyo y A. C. de Suasnávar, Guatemala, Museo Nacional de Arqueología y Etnología, 1999 (versión digital).

UNESCO, *Carta de Atenas*, Primera Conferencia Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Atenas, 1931.