

Artículo de investigación

CREACIÓN DE MODELOS DIGITALES COMO PRESERVACIÓN DE VESTIGIOS ARQUEOLÓGICOS DE ARTEFACTOS A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ESCANEADO 3D

Creation of Digital Models as Preservation of Archaeological Remains of Artifacts through the Application of 3D Scanning Technologies

Douglas Ottoniel Díaz Carpio

Escuela Superior Franciscana ESFE/AGAPE

Sonsonate, El Salvador C.A.

douglas.diaz@esfe.agape.edu.sv

 <https://orcid.org/0009-0009-2067-150X>

José Antonio Ramos

Escuela Superior Franciscana ESFE/AGAPE

Sonsonate, El Salvador C.A.

jose.ramos@esfe.agape.edu.sv

 <https://orcid.org/0000-0002-4969-5259>

Recibido: 22/10/2024

Aceptado: 18/03/2025

RESUMEN:

La investigación tecnológica con diseño experimental se enfocó en generar modelos digitales multiformato de vestigios arqueológicos, específicamente esculturas zoomorfas de tamaño medio mediante tecnologías de escaneo 3D. Se planteó como objetivo registrar visualmente estos artefactos para su conservación digital. Se seleccionó como muestra para el estudio la Cabeza de Jaguar M26, un vestigio del periodo preclásico tardío Maya. Se recopiló información relevante sobre volumen, color y textura a través de escaneos preliminares y finales utilizando una resolución baja con textura. Se creó un registro visual 3D multiformato aceptable en términos de precisión volumétrica y nivel de detalles. Se realizaron configuraciones de post-procesado para optimizar el modelo 3D obtenido. Se concluye que el registro visual 3D posee una precisión aceptable y representa con suficiente detalle el vestigio escaneado. Se recomienda a las instituciones responsables de este vestigio arqueológico continuar con los registros visuales 3D para evaluar su integridad en forma periódica.

Palabras clave: modelos digitales, cabeza de jaguar, preservación digital, vestigios arqueológicos, tecnologías de escaneo 3D.

ABSTRACT:

The technological research with experimental design focused on generating multi-format digital models of archaeological remains, specifically medium-sized zoomorphic sculptures, using 3D scanning technologies.

The objective was to visually record these artifacts for digital preservation. The Jaguar Head M26, a relic from the late Preclassic Maya period, was selected as the study sample. Relevant information on volume, color, and texture was gathered through preliminary and final scans using low-resolution texture scanning. An acceptable multi-format 3D visual registry was created in terms of volumetric precision and level of detail. Post-processing configurations were conducted to optimize the obtained 3D model. It is concluded that the 3D visual registry exhibits acceptable precision and adequately represents the scanned relic. Responsible institutions are recommended to continue periodic 3D visual registries to assess its integrity.

Keywords: Digital models, jaguar head, digital preservation, archaeological vestiges, 3D scanning technologies.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se desarrolla dentro del contexto de la preservación y conservación digital de vestigios arqueológicos en Izalco, Sonsonate, particularmente la denominada Cabeza de jaguar M26 o Monumento #26 ubicada en el parque Roberto Zaldaña. Tal conservación digital de este patrimonio cultural es posible a través de la aplicación de las Nuevas Tecnologías (NN. TT.) específicamente el registro visual 3D mediante el uso de un escáner de luz led estructurada.

Uno de los aspectos a destacar en la misma es el apoyo proporcionado por el responsable de la Unidad de Turismo y Cultura de la municipalidad al trabajar en forma conjunta en esta investigación gestionando acuerdos para el acceso al vestigio, proporcionando un acercamiento al contexto de la preservación del patrimonio cultural local de Izalco y brindando información del panorama actual sobre los esfuerzos de preservación y conservación en lo que al vestigio respecta.

La Dirección Nacional de Patrimonio Cultural de El Salvador, mediante sus cinco Direcciones de área protege, rescata, investiga, conserva y difunde el patrimonio cultural. Busca asegurar

la herencia cultural del país mediante diversos mecanismos para favorecer su goce y valorización (Dirección Nacional de Patrimonio Cultural - Ministerio de Cultura, 2022).

Por lo tanto, busca sumarse a los esfuerzos de conservación del patrimonio cultural que se llevan a cabo a través de distintas iniciativas, siendo el registro visual 3D mediante escaneo el caso de interés particular del equipo que dirige el estudio.

El objetivo de esta investigación es generar modelos digitales multiformato de vestigios arqueológicos de artefactos (como esculturas zoomorfas) aplicando tecnologías de escaneo 3D, considerando las limitaciones y alcances de esta técnica, como una medida de registro visual cautelar en pro de la conservación de los mismos.

En forma específica se pretende establecer vínculos y/o acuerdos con instituciones en donde la preservación de vestigios arqueológicos de artefactos a través del registro visual sea prioritaria.

Resulta de interés determinar los vestigios arqueológicos de artefactos a digitalizar

considerando el acceso a los mismos, materiales, y dimensiones y generar modelos digitales por medio de la aplicación del escáner 3D y software especializado con niveles de precisión aceptables.

Para Tello et al. (2019) las tecnologías actuales son un valioso recurso para la arqueología, ya que permiten profundizar en el conocimiento del pasado y proteger el patrimonio cultural colaborando en la conservación y en la mejora de la restauración de los vestigios.

Se considera que esta investigación es trascendente porque el registro visual 3D desempeña un papel crucial en vías de la preservación, documentación y comprensión del patrimonio cultural, proporcionando insumos valiosos para los arqueólogos, conservadores y el público a quienes puedan estar dirigidas las acciones de divulgación.

Cabe destacar además que esta investigación proyecta proporcionar beneficios como la generación de un registro visual 3D, permitiendo en primer lugar que este sea más completo y con mayor detalle de las características propias del vestigio, capturando con calidad y precisión detalles finos que podrían perderse con otros métodos de registro tradicionales.

Según Kivolya (2019) la recopilación de información con un escáner 3D láser estacionario puede alcanzar hasta dos millones de puntos por segundo por citar un número de referencia pudiendo variar según el escáner, el objeto y la distancia de escaneo.

En segundo lugar, contribuirá a la preservación virtual, a través de la creación del modelo 3D

de la Cabeza de Jaguar M26 proporcionando una forma de preservar virtualmente dicho objeto. Esto es especialmente valioso ya que factores como la degradación natural, el vandalismo o el cambio climático pueden afectar la integridad física del patrimonio.

Un tercer beneficio facilitará la investigación y el análisis del vestigio arqueológico en cuestión permitiendo que otros investigadores los examinen desde diferentes ángulos y escalas. También puede a futuro ayudar en la reconstrucción virtual del objeto en caso de daño.

En cuarto lugar, el monitoreo del estado de conservación del vestigio arqueológico, puede posibilitar su seguimiento a lo largo del tiempo. Las comparaciones entre modelos 3D capturados en momentos diferentes pueden revelar cambios significativos y ayudar a definir estrategias de conservación a largo plazo.

Un quinto beneficio pretende ser relevante en lo relativo a la restauración y reconstrucción, esto permitirá en caso de daño o destrucción parcial, que el modelo 3D resultante pueda ser útil en el proceso de restauración y reconstrucción, proporcionando referencias con un buen grado de precisión para arquitectos y/o conservadores.

La investigación se justifica además porque aspira a proporcionar una mayor accesibilidad e interactividad del objeto escaneado con encargados de programas de conservación, investigadores y/o público que pueda examinar la pieza.

Por otra parte, se espera dar lugar a un mayor intercambio de información, pues el formato final en que se presente el registro 3D del vestigio estará en condiciones de poder subirse a la red (y/o espacio dedicado en la nube) y facilitará su consulta simultánea desde diversos lugares según se considere necesario.

Según Kantaros et al. (2023) utilizar estas tecnologías presenta ventajas, incluida la capacidad de documentar, preservar sitios, artefactos y monumentos del patrimonio cultural de una manera no invasiva, así como la capacidad de crear réplicas digitales y físicas con uso en educación y exhibición.

Finalmente, se potencia la difusión y la educación, ya que el modelo 3D puede utilizarse para crear visualizaciones interactivas o recreaciones virtuales que pueden ser accesibles al público presentando nuevas formas de exploración lo cual contribuye a la difusión del conocimiento arqueológico y la educación sobre el patrimonio cultural local.

Planteamiento del problema

Según Tejado, el patrimonio arqueológico puede verse expuesto a deterioros y daños irreversibles. Al respecto manifiesta que:

Es frecuente verificar cómo una parte del Patrimonio Arqueológico que es depositado en museos, almacenes y otros como laboratorios arqueológicos y depósitos, están en una pérdida pausada pero progresiva de parte de sus propiedades físicas y químicas, siendo inherente a esto la pérdida de gran cantidad de información que puede ser en ocasiones irremediable debido al

deterioro irreversible al que se somete la pieza. (2005)

Cabe resaltar en palabras del autor que lo anterior se debe a la falta de presupuesto, control y organización de los fondos y del colapso generalizado por la falta de espacio que en tales sitios pueden presentarse.

Se plantea por tanto que la pérdida y/o alteración de propiedades físicas y/o químicas en vestigios arqueológicos de artefactos y pequeñas piezas, así como la carencia de un registro visual cautelar fiable debido a condiciones de almacenamiento no conformes, el efecto de la vejez y otros factores como la falta de cuidado, ausencia de interés cultural o políticas de conservación deficientes, ponen en riesgo la integridad de los mismos, pudiendo ocasionarse gran pérdida de información valiosa de forma irreparable o irreversible afectando a las instituciones y al patrimonio arqueológico local en general.

Las cuestionantes que han permitido orientar el presente estudio plantean aspectos de interés para el equipo de investigación dentro de los cuales destacamos por ejemplo si es relevante para las instituciones culturales locales y/o terceros el registro visual de los vestigios arqueológicos de artefactos y piezas (pequeñas o medianas) como una medida cautelar en pro de la conservación y difusión de los mismos.

Asimismo, ha sido necesario cuestionarse si pueden digitalizarse los vestigios arqueológicos de artefactos y piezas (pequeñas o medianas) aplicando tecnologías de escaneo 3D considerando las limitaciones o restricciones de la técnica y objetos in situ u otras condiciones y si es posible generar

modelos 3D multiformato con facilidad de difusión, niveles de precisión métricas y representación de texturas y colores aceptables.

Se definió para este estudio la siguiente hipótesis general *ha*:

Es posible generar modelos 3D multiformato, con alta potencialidad de difusión y niveles de precisión aceptable a partir de la aplicación de escaneo 3D en vestigios arqueológicos de artefactos o pequeñas piezas provenientes de instituciones locales de interés o terceros como una medida cautelar de registro visual.

Revisión del estado del arte

El escaneo 3D es utilizado actualmente en conjunto con la impresión tridimensional en el campo de la herencia cultural. Al respecto Kantaros et al. (2023) sostienen que el escaneo tridimensional y la impresión 3D se establecen como herramientas valiosas para la preservación del patrimonio cultural, esperándose avances continuos de cara al futuro.

Cabe mencionar, además, en palabras de los autores que la utilización del escaneo 3D para el modelado digital detallado de sitios y artefactos del patrimonio cultural presenta una contribución activa a la investigación, restauración y la exhibición virtual de los mismos.

Sostienen además que el escaneo tridimensional y la impresión 3D son tecnologías en evolución con amplias aplicaciones en la conservación e investigación del patrimonio cultural con un futuro prometedor ofreciendo oportunidades interesantes en la mejora de las interacciones con el mundo físico.

Felicísimo et al. (2020) abordan en su trabajo el uso del modelado 3D en arqueología a través de la aplicación de la técnica de escaneo 3D y la fotogrametría.

Tales autores consideran que integrar las mejores características de ambos métodos, escaneo y fotogrametría, puede presentar una solución para obtener modelos 3D de alta calidad en el campo de la arqueología.

No obstante, sostienen, aún se abordan desafíos como los aspectos en la calibración del color, la resolución de las texturas, los reflejos en superficies brillantes y el modelado de objetos pequeños.

Esta segunda técnica, si bien no es abordada en el presente estudio, vale la pena mencionar que es actualmente una alternativa cada vez más accesible y aplicable en el registro visual 3D de bienes culturales que según los autores del trabajo en mención, abarcan aplicaciones del arte contemporáneo, como las que se exponen en los museos.

En Argentina, por ejemplo, Morita et al. (2018) manifiestan que existen sistemas de documentación que en forma mayoritaria son utilizadas por las instituciones cuya base son fichas técnicas en la cual se registra la información observada a través de texto.

Los autores sostienen que muchas veces las formas complejas en los objetos impiden a una simple fotografía registrar sus dimensiones o su estado de conservación por lo que consideran que técnicas como las imágenes 3D

pueden colaborar para superar tales carencias en el registro.

Por otra parte, la utilización de los datos provenientes de un escáner 3D en el contexto de la investigación del patrimonio arquitectónico va en aumento, especialmente en la elaboración de informes de investigación (Lee y An, 2023).

En su estudio, los investigadores hacen hincapié en la necesidad de comprender las ventajas y desventajas de los datos escaneados en 3D en comparación con los métodos de representación tradicionales, como el texto, los dibujos, los planos y las fotografías.

Enfatizan además que es de importancia una documentación precisa y de levantamientos digitales utilizando para ello los datos escaneados en 3D en la creación de informes de investigación que representen el patrimonio arquitectónico.

Investigaciones recientes como la de Milosz y Kęsik (2023) sostienen que los avances actuales en el área de las tecnologías digitales 3D se están centrando en proteger, pero también en preservar los objetos del patrimonio cultural a través del uso del escaneo, el modelado y las presentaciones de realidad virtual.

Tales autores son de la opinión que gracias a la tecnología de la información (TI) las técnicas para documentar la apariencia de objetos del patrimonio cultural se encuentran en un rápido desarrollo.

Manifiestan además que las técnicas como el dibujo/fotografiado, la medición realizada a

mano, o la fotografía en color están siendo sustituidas por tecnologías modernas de las TI, que están posibilitando la construcción y uso de modelos 3D.

Trabajos como el de Oh y Bae (2023) exponen que la fabricación de activos 3D de baja capacidad y alta calidad con la incorporación de metadatos con fines de restauración virtual, marcan una tendencia actual en la preservación del patrimonio cultural.

Dichos autores enfatizan además que la producción de activos 3D con metadatos que contengan información sobre el patrimonio cultural es de crucial importancia ya que permite minimizar los errores propios de la investigación histórica durante el proceso de restauración virtual.

Otros estudios como el de Lipowiecki et al. (2023) describen soluciones que requieren utilizar escáneres 3D láser de largo alcance y portátiles con luz estructurada estudiando problemas emergentes del proceso de digitalización de objetos detallados de gran tamaño, presentando una comparación de los resultados obtenidos con ambos equipos.

El análisis realizado por los autores colocó en evidencia importantes discrepancias en aspectos como la resolución, precisión y procedimientos de medición, lo que permitió desarrollar un método para combinar los resultados de ambos dispositivos.

Investigaciones recientes como las de Moyano et al. (2023) presentan una evaluación del registro de datos vinculados con la geometría de objetos pequeños mediante técnicas no

invasivas utilizando escáneres de luz estructurada y de técnicas basadas en fotogrametría enfatizando en la precisión y calidad del registro.

El uso del escaneo 3D con luz estructurada se extiende además a otras áreas como la patología anatómica en medicina. El estudio realizado por Perez et al. (2023) se vale del uso de escaneo 3D en la patología quirúrgica incluyendo la creación de informes patológicos de técnica mixta con técnicas virtuales de entintado y marcado para demarcar las secciones de tejido y los detalles en tumores.

En el mismo estudio se plantea que el modelado de muestras en 3D tiene un uso potencial en la enseñanza de los procedimientos de laboratorio de patología macroscópica mediante métodos didácticos y experimentales incluyendo la inspección de objetos y el control de calidad.

Otros estudios como el de Kurniawan et al. (2019) enfatizan sobre la importancia del desarrollo de un método sencillo y optimización de parámetros de escaneo 3D que permita la medición del índice de desgaste de componentes de una manera precisa y con menos inversión de tiempo.

En el estudio se evaluaron los efectos de los parámetros de escaneo, método de mallado y distancia en las diferencias de volúmenes determinando los ajustes óptimos para capturar imágenes e identificando los parámetros de escaneo óptimos para su captura.

En el campo de la visualización y elaboración de datos en realidades mixtas Zia (2022) menciona que la unión entre tecnologías

digitales como el escaneo 3D, la impresión 3D y la producción virtual está ofreciendo nuevas oportunidades en la visualización y creación de materiales a partir de mundos físicos y digitales.

En su estudio, el autor expone que el escaneo de vidrios pintados, la proyección de luz y color en escenas 3D, así como la creación de versiones tridimensionales de habitaciones permiten experimentar con el arte expresionista abstracto y otras técnicas.

Un estudio reciente como el de Oruç (2022) analiza las implicaciones de utilizar tecnología de escaneo e impresión 3D para la preservación y el acceso al patrimonio cultural explorando cómo lo afecta en cuestiones relacionadas a la repatriación, derechos de autor y propiedad de los escaneos.

A criterio del autor, la tecnología 3D cumple un papel clave en la preservación del patrimonio en riesgo ya que permite crear varias copias simultáneamente. No obstante, los escaneos 3D plantean nuevas cuestiones relacionadas con los derechos de autor y la propiedad.

Marco Conceptual

Se presentan a continuación definiciones de interés relacionadas con el estudio, a fin de colocar en perspectiva aquellos aspectos teóricos esenciales que faciliten al lector la comprensión del mismo.

Modelos Digitales 3D

Los modelos digitales 3D son representaciones tridimensionales de objetos físicos o virtuales

creadas mediante software de modelado. Estos modelos se construyen mediante la combinación de vértices, aristas y caras, y se utilizan en diversas aplicaciones como diseño industrial, animación, videojuegos y más (Vázquez y Feixas, s.f.).

Registro Visual 3D

El registro visual 3D consiste en capturar la forma y apariencia de objetos y escenas en tres dimensiones, utilizando tecnologías como fotogrametría y escaneo láser. El objetivo es crear modelos digitales precisos que se pueden utilizar en estudios científicos, conservación del patrimonio, y aplicaciones industriales (Remondino y El-Hakim, 2006).

Escáner de Luz Led Estructurada

Un escáner de luz LED estructurada proyecta un patrón de luz sobre un objeto para capturar su geometría. Las deformaciones en el patrón de luz, observadas por cámaras, permiten calcular la forma tridimensional del objeto con alta precisión (Sansoni et al., 2009).

Proceso de Escaneo 3D

El proceso de escaneo 3D implica la captura de la geometría de un objeto usando escáneres como los de luz estructurada o láser. Estos dispositivos recogen datos sobre la superficie del objeto, creando una representación digital detallada (Geng, 2011).

Nube de Puntos

Es una colección de puntos multidimensionales representada por una estructura de datos llamada nube de puntos, que se utiliza con frecuencia para describir datos tridimensionales. Técnicamente, es una base de

datos de puntos en un sistema de coordenadas tridimensional (S, et al., 2023).

Post Procesado

El post procesado en escaneo 3D incluye tareas como la limpieza de datos, alineación, y edición de la nube de puntos o el modelo 3D. Este proceso es esencial para eliminar ruido, rellenar huecos y preparar el modelo para su uso final (Curless y Levoy, 1996).

Vestigios Arqueológicos

Los vestigios arqueológicos son restos materiales de culturas y sociedades pasadas, incluyendo artefactos, estructuras y restos humanos. Estos vestigios proporcionan información sobre la historia, cultura y vida cotidiana de antiguas civilizaciones (Renfrew y Bahn, 2011b).

Clasificación de los Vestigios Arqueológicos

La clasificación de vestigios arqueológicos se basa en criterios como tipología, cronología y función. Esta sistematización facilita el análisis y comprensión de los contextos históricos y culturales de los hallazgos (Binford, 1988c).

Los materiales arqueológicos por otra parte, pueden ser principalmente de cuatro tipos: (1) artefactos, (2) ecofactos, y (3) estructuras arquitectónicas, y (4) rasgos asociados con actividad humana (Proyecto Complejo Plaza de las Columnas, 2017).

Cabezas de Jaguar

Son piezas talladas en piedra basáltica que representan imágenes de felinos y otros animales, mezcladas con rostros humanos, y forman parte de un misterioso conjunto de

esculturas precolombinas de hasta más de 2.300 años de antigüedad (Museo de la palabra y la Imagen MUPI, 2023).

Preservación Del Patrimonio Cultural

La preservación del patrimonio cultural implica proteger y mantener bienes culturales y monumentos históricos para futuras generaciones. Esto incluye estrategias de conservación, restauración y gestión sostenible (Viñas, 2018b).

Formatos OBJ, PLY, STL y 3MF

Los modelos 3D generados pueden ser presentados bajo los siguientes formatos y particularidades:

OBJ: *Object File Format*, es un formato de archivo abierto para guardar formas geométricas tridimensionales. Desarrollado por *Wavefront Technologies*, es compatible con muchos programas gráficos 3D y, por tanto, está indicado para la transferencia de modelos 3D entre distintos programas y plataformas (jung-group.com, s. f.)

PLY: *Polygon File Format*, representa un formato de archivo 3D que almacena objetos gráficos descritos como una colección de polígonos (Openize Pty Ltd, 2024)

Según dicho autor, los objetos en formato PLY pueden describirse mediante una colección de vértices, caras y otros elementos, junto con propiedades como el color y la dirección normal que se pueden adjuntar a estos elementos.

STL: Originado en el campo de la estereolitografía, el término STL proviene de las siglas en inglés *Stereolithography* o *Standard Tessellation Language*. Un archivo STL representa la geometría de un objeto tridimensional mediante una malla de triángulos interconectados (Creafab3D, 2024).

3MF: *3D Manufacturing Format*, es un conjunto de convenciones para usar XML para describir la apariencia y la estructura de los modelos 3D para la fabricación. Define un conjunto de piezas y sus relaciones, en un dispositivo de fabricación 3D (Karl-Bridge-Microsoft, 2023).

Antecedentes

A nivel nacional, las esculturas Cabezas de Jaguar del occidente del país han sido estudiadas con un enfoque centrado en su interpretación iconográfica destacando la importancia de comprender la cosmogonía mesoamericana y la relación simbólica de animales como el jaguar en dichas esculturas (Portillo, 2020).

En el mismo estudio el autor aborda el concepto de iconografía, símbolo, escultura e inframundo en el contexto mesoamericano, y se establecen antecedentes históricos del área de estudio.

Otros estudios como el de Delgado et al. (2014) analizan los atributos visuales de los monumentos Cabezas de Jaguar de la zona occidental del país como una referencia gráfica para el diseño salvadoreño y destacan su importancia cultural e histórica.

En el estudio los autores buscaron la identificación y descomposición de los atributos visuales de estos monumentos para su aplicación en proyectos de diseño gráfico planteando una metodología de análisis morfológico explorando la importancia de la investigación en el diseño gráfico contemporáneo.

En relación al registro visual tridimensional, investigaciones como la de Alvarenga et al. (2022) destacaron la importancia del registro visual para preservar y difundir el parque arqueológico de Cihuatlán, en El Salvador. A través de un modelo tridimensional, se buscó su promoción y conservación, realizando un recorrido virtual y analizando las estructuras principales.

Este estudio estuvo enfocado en la investigación previa, la metodología aplicada, el análisis de software de diseño tridimensional y la aplicación práctica de la creación de modelos digitales.

En lo que respecta a la conservación del Patrimonio Cultural en general, instituciones de educación superior como el ITCA-FEPADE a través de la carrera de Técnico en Gestión Tecnológica del Patrimonio Cultural, fomentan el desarrollo de investigaciones explorando las posibilidades de aplicación de las TIC como la Realidad Virtual y Aumentada al campo del Patrimonio Cultural (Velásquez, 2021).

Dentro de los trabajos realizados por esta institución pueden mencionarse modelos 3D de sitios y edificios emblemáticos del Centro Histórico de Santa Ana, como resultado de los proyectos 2018 de Patrimonio Cultural:

Catedral de Santa Ana, Teatro de Santa Ana entre otros como recorridos 360° del proyecto en asocio con la Universidad Tecnológica de El Salvador, UTEC: Sitio arqueológico Joya de Cerén y escaneo 3D de piezas cerámicas para su restauración.

En otros trabajos como el realizado por Aguilar (2022) se desarrolló un protocolo para la digitalización de objetos de patrimonio cultural, utilizando técnicas de realidad aumentada, fotogrametría e impresión 3D.

Uno de los trabajos de digitalización 3D realizados por el autor para el resguardo y visualización de las piezas arqueológicas que puede mencionarse es el Disco de Jaguar de Cara Sucia, con un diámetro de 85 cm. y con ubicación actual en el Museo Nacional de Antropología - MUNA.

La Cabeza de Jaguar M26 cuenta actualmente con registros consistentes en imágenes 2D y medidas generales de altura y ancho de la misma, documentada en un muestrario impreso en propiedad de la Unidad de Turismo de Izalco.

Se pudo verificar que no se tienen registros visuales previos en formato digital del vestigio a través de la aplicación de tecnologías de escaneo 3D o fotogrametría, como información relacionada con mediciones de superficie y volumen del mismo.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Procedimiento y diseño de la investigación

La investigación y el desarrollo del escaneo del vestigio en campo se desarrolló a partir de la ejecución de las siguientes fases:

La primera fase consistió en la revisión del estado del arte referente al escaneo 3D actualmente utilizado en la arqueología como una forma de preservación de vestigios y otros bienes de interés del Patrimonio Cultural.

Se determinó además el diseño de la investigación y se revisaron los aspectos técnicos del escáner a nivel de características operativas del equipo. Fue necesaria la actualización del firmware del mismo y del software asociado que permite el escaneo y posibilita visualizar y generar los resultados deseados a nivel de modelos 3D y su respectivo procesado.

Como parte fundamental de esta primera fase se realizaron pruebas de escaneo preliminares en réplicas de vestigios como estatuillas zoomorfas de barro cocido pequeñas y pilares de concreto de tamaño medio.

El escaneo en pieza pequeña (<200 mm.) se desarrolló utilizando el modo fijo y base giratoria controlada a través del software del equipo y en condiciones internas de laboratorio de fabricación institucional FABLAB, se utilizó además el escaneo manual como complemento a las pruebas.

El escaneo manual rápido se aplicó en objeto de tamaño medio de concreto (>200 mm) con

textura y relieve con similitudes en relación a la unidad de estudio y en exposición a condiciones ambientales como nivel de iluminación, temperatura y humedad relativa no controladas, verificando la operación del equipo de escaneo 3D al aire libre.

Las pruebas preliminares de escaneo permitieron llevar a cabo acciones como calibración del equipo con y sin cámara de textura, realizar escaneos con distintos niveles de resolución del equipo y modos de alineación, generar mallas de punto y verificar las opciones de configuración para el post procesado de las mismas entre otras como la medición final de las dimensiones de los modelos 3D generados, verificables desde el software.

La segunda fase consistió en la determinación de las necesidades de escaneo de los vestigios arqueológicos de artefactos de interés. Para esto se acordaron visitas y se desarrollaron conversatorios con responsable de la Unidad de Turismo de Izalco quien manifestó al respecto el interés y la necesidad del registro visual de la cabeza de Jaguar M26 mediante escáner 3D.

Se acordaron fechas de escaneo del vestigio para la gestión de los permisos respectivos ante encargados de la Alcaldía municipal de Izalco y los entregables finales a presentar a responsable de la Unidad de Turismo del mismo municipio para su posterior visualización y divulgación.

La tercera fase consistió en el escaneo del vestigio arqueológico in situ. Para esto fue necesario determinar el modo de escaneo (para el caso, escaneo rápido manual) y aplicar otras

configuraciones requeridas como la alineación, uso de textura o no, modo de operación, resolución y brillo.

Con instrumentación especializada se procedió al registro de temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación ambiental, así como la temperatura propia del objeto.

Se desarrolló el escaneo del vestigio utilizando un escaneo manual rápido con alineación por características, uso de cámara de textura y color, modo de operación clásico, baja resolución (1.5 mm.) y brillo en un rango de ajuste entre el 0 y 10% según condiciones de luz ambiente. La desviación de la calibración del escáner fue de 0.047520 píxeles, valor satisfactorio, según cálculo y referencia del software.

Para el escaneo preciso del vestigio en ciertas zonas del mismo, como la zona posterior baja, fue necesario atenuar la luz ambiente a través del uso de carpas plásticas negras. De igual manera se cubrieron con papel bond blanco aquellas áreas de la base de concreto que soporta la cabeza, que no se consideraron como prioritarias para el escaneo y respectivo registro visual.

La cuarta fase consistió en la generación de la malla de punto, salvado del proyecto y la aplicación posterior de post procesamiento para la obtención de los modelos 3D del vestigio arqueológico. Haciendo uso del software EinScan se aplicó para la generación de la nube de puntos la opción de modelo cerrado o *Unwatertight* asignando alta calidad a la misma.

Se aplicaron además configuraciones de optimización de la malla prescindiendo de la utilización de filtro, aplicando un suavizado bajo, remoción de puntos flotantes pequeños con valor ajustado en 1, triángulos máximos con valor fijado en 45000000 (valor según software) y remoción de picos.

Tras la generación de la nube de puntos se aplicó un nivel de brillo de 30 y un nivel de contraste de 20 para obtener los archivos 3D finales. Los archivos de interés guardados aplicando las configuraciones anteriores fueron del tipo ASC, STL, OBJ, PLY y 3MF respectivamente.

Como quinta y última fase, se realizó la presentación de los resultados obtenidos. Se procedió a entregar a responsable de la Unidad de turismo de Izalco el modelo 3D de la cabeza de cabeza de Jaguar en los distintos formatos acordados para su integración a sitios WEB y/o plataformas de interés especializadas para su divulgación y usos correspondientes.

El tipo de investigación se establece como tecnológica. Al respecto Arias (2017) sostiene que:

La investigación tecnológica es la búsqueda y obtención de nuevos conocimientos prácticos y aplicables a corto plazo en la creación, producción o desarrollo de bienes y servicios innovadores, artefactos, nuevos materiales, prototipos, maquinarias o procedimientos que contribuyan a resolver problemas, satisfacer necesidades y mejorar la calidad de vida de la sociedad. (pp.72)

En relación a lo anterior es importante hacer mención que se busca generar un modelo 3D como una forma de prototipo virtual del vestigio escaneado. Se considera además que su obtención está directamente relacionado a un proceso de aplicación de tecnología avanzada como el escáner 3D de luz estructurada, el uso de herramientas de modelado para un post procesamiento del mismo y la aplicación de conocimientos en el manejo de equipos y software especializado.

El modelo 3D que se obtenga será tanto un resultado tangible y utilizable con aplicaciones diversas y de valor comercial dependiente del contexto para el cual se defina su uso en el ámbito de la conservación y la divulgación cultural del patrimonio.

El enfoque de esta investigación se determinó como cuantitativo. Dentro de sus fases como por ejemplo la de escaneo, es posible utilizar distintas métricas como de longitud, superficie y volumen para medir la precisión del o los prototipos digitales generadas en el proceso de escaneo 3D.

Unidad de Análisis y Muestra

La unidad de análisis consistió en un vestigio arqueológico de dimensiones medias y características zoomorfas. La muestra, no probabilística por conveniencia fue la Cabeza de Jaguar M26 de roca tallada, ubicada en parque Rafael Zaldaña, Izalco, Sonsonate y perteneciente al periodo preclásico tardío Maya con dimensiones de 69 X 60 cm. (Ver figura 1).

Instrumentos Utilizados

A efectos prácticos, el registro de la información ha sido clasificada en dos grupos de interés.

El primero, se relaciona con la determinación de la necesidad del registro visual 3D del vestigio y con la observación de las características visibles como dimensiones, forma, color, material y textura, así como también del entorno actual y las condiciones en que se exhibe.

El registro de la información y datos según el orden descrito anteriormente se realizó a través de una matriz de registro de datos denominada MRD-01 y una lista de cotejo definida como LCVAE-01.

Para los datos e información pertenecientes al segundo grupo se utilizó una matriz de registro de datos de escaneo definida como MDE-01. En este instrumento se presentan los resultados del escaneo 3D realizado in situ reflejando aspectos como desviación de la calibración del equipo, fecha y hora del escaneo, promedios de temperatura, humedad relativa e iluminación en el lugar y duración del proceso de escaneo entre otros de interés como los modos y las configuraciones aplicadas al escáner 3D.

Figura 1

Vestigio arqueológico Cabeza de jaguar M26



Nota. La figura representa el vestigio arqueológico de estudio en su sitio y condiciones actuales de emplazamiento y exhibición.

Finalmente hacemos mención de la utilización equipo tecnológico especializado para la obtención de la información propia del vestigio, temperatura, humedad relativa y nivel de iluminación, siendo estas, variables propias del trabajo en campo.

Los equipos utilizados han sido el escáner 3D SHINNING - EinScan Pro 2X y su cámara de textura y color (*color pack*), el medidor de temperatura y humedad relativa FLUKE 971, la cámara termográfica FLUKE VT04 y el medidor de nivel de iluminación Amprobe LM-120, además de un ordenador personal tipo laptop modelo HP Zbook 15V G5.

Procesamiento y Análisis de la Información.

Principalmente se recurrió a la utilización de software especializado para el procesamiento de la información obtenida directamente del

proceso de escaneo 3D del vestigio arqueológico. Para el registro de los datos de escaneo, limpieza básica, generación de nube de puntos y configuraciones de post-procesado se utilizó el software con licencia de pago Einscan en su versión 3.74.

De suma importancia resultaron las herramientas del software relacionadas con la medición de longitudes entre puntos de interés, cálculos de área y de volumen de los modelos 3D generados ya que han permitido un análisis completo en estos aspectos.

Otros análisis de visualización para la revisión de mallas y puntos en los modelos 3D generados en sus distintos formatos se realizaron utilizando el software gratuito de código abierto MeshLab en su versión 2023.12 y MeshInspector 2.4.0.208 en su versión de evaluación.

El análisis de termografía realizada a la cabeza de jaguar como registro auxiliar de temperatura necesitó el uso del software gratuito SmartView en su versión 4.3.300.0.

Otros datos e información general del proceso de escaneo que se registró, no necesitaron ningún otro software o aplicación particular a excepción de procesadores de texto y hojas de cálculo para la estimación de sus promedios.

RESULTADOS

El resultado obtenido ha sido la creación de un registro visual 3D multiformato, conteniendo los modelos generados y datos digitales relevantes como por ejemplo vértices y número de caras de la malla respectivamente. En la

figura 2 puede apreciarse el modelo 3D final resultante.

Una primera sesión de registro 3D se realizó con la cámara de color y textura del equipo, escaneo rápido manual, alineación por características, modo clásico y alta calidad de escaneo resultando en la pérdida de información de los datos digitales. El archivo de escaneo no pudo ser guardado y la nube de puntos (malla) no pudo generarse debido a problemas de procesamiento gráficos surgidos. En una segunda sesión, se utilizaron configuraciones similares, pero seleccionando una baja calidad de escaneo lo que permitió en forma efectiva el registro deseado. La obtención del modelo 3D requirió además de la aplicación de un post-procesado haciendo uso de las herramientas del software EinsCan como la opción *Watertight* y sus configuraciones de optimización de malla.

Las zonas que presentaron una mayor dificultad durante el proceso de escaneo evidenciaron una malla abierta en algunas secciones o muy baja densidad de puntos en otras, para el modelo 3D obtenido. Las figuras 3 y 4 muestran zonas de difícil escaneo como por ejemplo las ubicadas en dientes y mentón, entre otras como la zona superior.

Las mediciones de los modelos 3D multiformato generados se aprecian en la Tabla 1. A través de la utilización de las herramientas de medición de longitudes por punto de cada software se determinaron sus dimensiones. La figura 5 muestra las dimensiones medidas para un modelo 3D obtenido como parte del registro visual.

Figura 2

Modelo 3D de Cabeza de jaguar obtenido



Nota. La figura representa el modelo 3D de la Cabeza de Jaguar M26 en formato OBJ vista desde el software del escáner EinsCan.

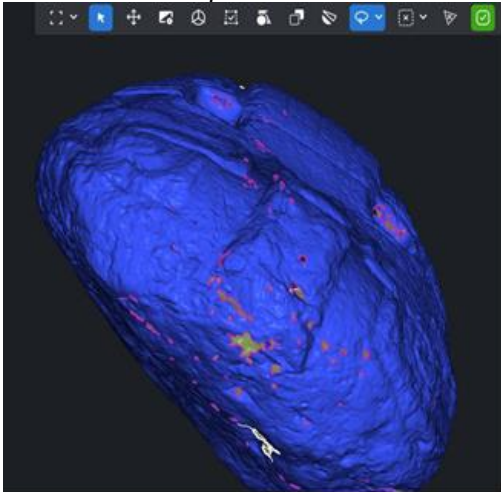
Figura 3

Zona de difícil escaneo del vestigio



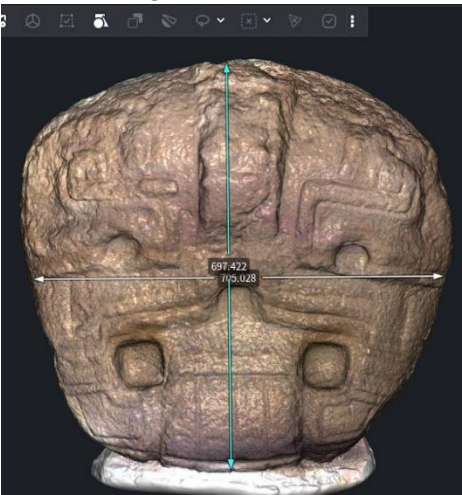
Nota. La figura de arriba representa la zona de dientes y parte del mentón del vestigio. Abajo, el resultado de escaneo para esa misma zona.

Figura 4
Otras zonas de difícil escaneo



Nota. La figura representa el modelo 3D de la Cabeza de Jaguar M26 en formato OBJ vista desde el software EinScan.

Figura 5
Medición de las dimensiones de uno de los modelos 3D generados



Nota. La figura representa las dimensiones de alto y ancho (H x A) de uno de los modelos 3D generados en formato OBJ analizados desde el software MeshInspector en su versión de evaluación profesional.

Tabla 1
Dimensiones de los modelos 3D generados por software y tipo de formatos

Software	Formato STL		Formato PLY		Formato OBJ	
	Dimensiones en mm.		Dimensiones en mm.		Dimensiones en mm.	
	H	A	H	A	H	A
MeshLab	677.362	683.430	677.743	689.082	672.188	695.022
Mesh Inspector	701.382	707.071	698.677	707.687	697.422	705.028
EinsCan	699.441	699.323	696.890	698.838	692.421	697.054
Promedio	692.728	696.608	691.103	698.536	687.344	699.035

Nota. Esta tabla permite apreciar las dimensiones H (alto) y A (ancho) en mm. del modelo 3D generado tras el escaneo en tres de sus formatos según mediciones realizadas con el software detallado. Se muestra en la última fila el promedio calculado para cada dimensión y formato.

Cabe destacar que las dimensiones promedio de alto y ancho del modelo 3D son aproximadas a las revisadas en muestrario de Cabezas de Jaguar propiedad de la Unidad de Turismo de Izalco, determinando para este modelo 3D con formato OBJ dimensiones de 687.344 x 699.035 mm (68.7344 x 69.9035 cm.) respecto a los 69.00 x 60.00 cm. según la información de referencia. Ver figura 6

Otro de los hallazgos significativos lo constituye la estimación de la superficie y volumen del vestigio arqueológico calculado por software para los modelos 3D obtenidos. Se calculó la superficie utilizando el software EinsCan resultando un valor de 1,446,282.25 mm.² (1.44628225 m.²). Ver figura 7.

Figura 6

Registro de Cabeza de Jaguar M6

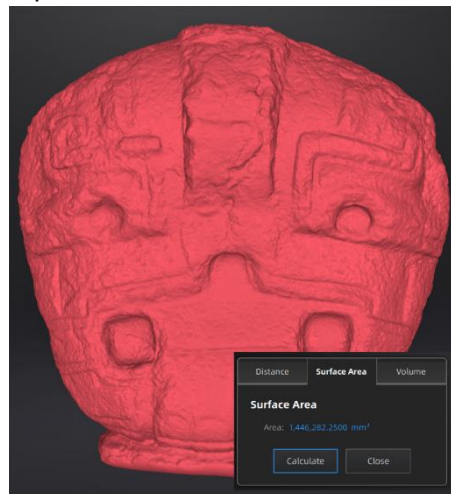


Nota. Del sitio arqueológico Cuyancúa, Sonsonate, El Salvador. La figura representa un registro del vestigio

arqueológico de la Cabeza de Jaguar. Fuente: Muestrario de Cabezas de Jaguar, fotografía con permiso de Unidad de Turismo de Izalco. Medidas 69x60cm

Figura 7

Cálculo de la superficie del modelo 3D de la Cabeza de Jaguar en formato OBJ desde software EinsCan



En la tabla 2 se presentan los resultados del cálculo de superficie por tipo de software y formato de archivo. Respecto al cálculo del volumen, este representa un hallazgo significativo debido a que no se conocen datos de volumen del vestigio determinados con anterioridad. En la tabla 3 se pueden apreciar los resultados obtenidos del volumen de los modelos 3D.

Tabla 2*Resultados de cálculos de superficies por software y tipo de archivos*

Software	Formato STL	Formato PLY	Formato OBJ
	Superficie en mm ² .	Superficie en mm ² .	Superficie en mm ² .
MeshLab	1446282.27	1446283.50	1446282.27
Mesh Inspector	1446280.00	1446280.00	1446280.00
EinsCan	1446282.25	1446283.50	1446282.25
Promedio	1446281.50	1446282.33	1446281.50

Nota. La tabla presenta los cálculos de superficie realizados por software y sus promedios para al menos tres de los formatos que conforman el registro visual 3D.

Tabla 3*Resultados de cálculo de volumen por software y tipo de archivo*

Software	Formato STL	Formato PLY	Formato OBJ
	Volumen en mm ³ .	Volumen en mm ³ .	Volumen en mm ³ .
MeshLab	111963320.00	111963344.00	111963320.00
Mesh Inspector	111963320.00	111963320.00	111960392.00
EinsCan	111963320.00	111963320.00	111963320.00
Promedio	111963320.00	111963328.00	111962344.00

Nota. La tabla presenta los cálculos de volumen obtenidos mediante software para al menos tres de los formatos que conforman el registro visual 3D. Los promedios se presentan en la última fila.

Los resultados obtenidos en relación a las características de color, forma y textura del registro visual 3D pueden considerarse aceptables dentro de los modos y configuraciones con que se desarrolló el escaneo del vestigio arqueológico. En la figura 8 puede apreciarse una comparativa entre uno de los modelos 3D obtenidos y el objeto real.

Figura 8.

Comparativa entre modelo 3D generado y objeto escaneado



Nota. La figura expone detalles de color, forma y textura entre uno de los modelos 3D generados (izquierda) y el objeto escaneado (derecha). El modelo 3D se presenta visualizado desde software MeshInspector.

Se entregó a responsable de la Unidad de Turismo de Izalco una carpeta con nombre “Registro visual 3D_Cabeza de Jaguar M26” conteniendo 7 archivos. Se asignó el siguiente nombre para los todos los archivos: HSFpostprocesing. Sus formatos fueron del tipo:3mf, ply, obj, stl, asc, mtl, y jpg.

Se recomendó la visualización de los mismos utilizando el software de licencia gratuita MeshLab a fin de apreciar con una buena calidad los detalles del registro según cada formato de archivo que soporta. Si bien otro software puede ser utilizado, este último permite una manipulación fácil e intuitiva de los modelos 3D.

Adicionalmente se recomendó a responsable de la Unidad de Turismo la creación de una cuenta personal en sitio en línea Sketchfab para la exposición del modelo 3D del vestigio arqueológico, datos e información relevantes

del mismo acordando el acceso en línea para una visualización pública del modelo y una configuración con restricción de descarga del archivo 3D respectivo. Ver figura 9.

Figura 9.

Modelo 3D publicado en sitio en línea Sketchfab



Nota. La figura representa la publicación del modelo 3D de la cabeza de Jaguar M26 en formato PLY con una densidad de malla de 1.5M de triángulos y 749.2K vértices, visible desde sitio en línea Sketchfab en forma pública desde el siguiente enlace: <https://sketchfab.com/3d-models/cabeza-de-jaguar-izalco-e58a9b625120433995eeaca35a8d3ae5>

DISCUSIÓN

Uno de los aspectos importantes que puede mencionarse en relación los resultados obtenidos sobre las dimensiones del modelo 3D están estrechamente relacionados con la precisión y la precisión volumétrica del escáner utilizado para el escaneo del vestigio.

El resultado de los promedios de altura medida en los modelos 3D generados presentan una

gran similitud con los registros disponibles de esta medida, esto es 69.00 cm. en relación a los 69.27 cm. promedio tomando como referencia un modelo 3D en formato STL.

En relación al ancho del vestigio se encontraron discrepancias entre el registro oficial de esta dimensión y el valor promedio calculado en los diferentes modelos 3D generados, esto es 60.00 cm. en relación a los 69.66 cm. tomando como referencia un formato STL.

El registro actual no define en forma específica los puntos tomados como referencia para la medición de las dimensiones de altura y ancho de la Cabeza de Jaguar M26. En la figura 5 se presentaron los puntos de referencia considerados por el presente equipo de investigación para determinar las medidas de alto y ancho del vestigio.

El resultado de estimación de superficie y volumen de los modelos 3D generados, se realizó a través de las herramientas de cálculo que presenta cada software. Las mediciones no pueden ser consideradas como finales o exactas, pero sí una aproximación significativa.

Esto se debe a que en el escaneo se ha incluido volumen de material que no pertenece a la Cabeza de Jaguar propiamente dicho, pero que permiten su emplazamiento en el sitio actual.

Una estimación más exacta puede obtenerse eliminando dicha área en la fase previa al post-procesamiento de los modelos. No obstante, consideramos que se afectaría la integridad de la nube de puntos obtenido por medio del

escaneo, al retirar en este proceso información digital perteneciente a la Cabeza de Jaguar.

Un procesamiento posterior por software permitiría generar un modelo 3D con una malla cerrada y la estimación aproximada de la superficie del modelo 3D desde las herramientas de cálculo y medición con que cuenta cada programa.

El promedio de superficie para un modelo 3D con formato STL ha sido de 1,446,281.50 mm² y de para el mismo formato es de 111,963,320.00 mm³ según se aprecia en la tabla 2 y tabla 3 respectivamente.

No ha sido posible verificar para este Monumento registros de superficie y de volumen previos con el cual establecer una comparación, por lo que tales mediciones podrían tratarse de nueva información.

A efectos prácticos establecemos una superficie del Monumento Cabeza de Jaguar M26 $< 1.4462815 \text{ m}^2$ y un volumen $< 0.11196332 \text{ m}^3$ pudiendo existir leves discrepancias según el formato de archivo que se tome como referencia para su estimación.

La información técnica del equipo proporciona una precisión de escaneo de hasta 0.1 mm. en el modo de escaneo manual rápido, escaneo con textura y alineación por características. La precisión volumétrica por otra parte, presenta un valor de 0.3 mm/m para el modo de escaneo manual rápido, escaneo con textura y alineación por características y marcadores.

Según el fabricante Einscan.com (2021) la precisión volumétrica se refiere a la relación entre la precisión de los datos 3D y el tamaño del objeto, lo que significa la precisión de los escaneos alineados y fusionados en un conjunto de datos completo.

Dicho de otra forma, esto se refiere a la exactitud con la que el dispositivo puede medir y reconstruir las dimensiones de un objeto tridimensional en comparación con sus medidas reales.

A partir de los resultados obtenidos el equipo de investigación se acepta la hipótesis general del estudio ya que fue posible la generación de modelos 3D multiformato, con alta potencialidad de difusión y niveles de precisión aceptable a partir de la aplicación de escaneo 3D en vestigios arqueológicos de artefactos o pequeñas piezas provenientes de instituciones locales de interés o terceros como una medida cautelar de registro visual.

Estudios como el de Felicísimo et al. (2020) sostienen que la geometría resultante del escaneo es de muy alta exactitud métrica y que las nuevas tecnologías en modelado 3D mediante escáner y foto-grafía digital permiten crear modelos cercanos a la realidad desde el punto de vista métrico y perceptivo. Investigaciones similares como la de Karasik y Smilansky (2008) abordan el estudio de la tecnología de escaneo 3D como herramienta arqueológica estándar para el análisis de cerámica desde un aspecto práctico y teórico.

Los mismos autores consideran que la tecnología de escaneo 3D se establece como

una herramienta práctica y confiable para el análisis de cerámica en la investigación arqueológica, pues permite proporcionar perfiles precisos e incluso, con calidad de impresión para una diversidad de cerámica.

A partir de trabajos como el de Papas et al. (2021) cuando comparan tecnologías de escaneo láser y luz estructurada para aplicaciones arqueológicas encuentran que al aplicar una tecnología de escáner 3D de luz estructurada se logra la combinación óptima de calidad y precisión del escaneo, junto con un tiempo reducido de adquisición de los datos escaneados.

Según exponen los autores, el punto de referencia para esta comparación es un antiguo jarrón romano de la ciudad de Tesalónica, Grecia. A criterio de los mismos, al aplicar tecnología láser se obtiene una mayor precisión, pero con costos significativos cuanto a tiempo de escaneo y tamaño de los datos del modelo.

Lo anterior expuesto resulta de interés particular para el presente equipo de investigación, pues es la tecnología utilizada para el registro visual del vestigio arqueológico lo cual permite valorar los resultados obtenidos en términos de precisión de los modelos 3D que se generaron.

Otros estudios como el de Counts et al. (2016) encuentran que el modelado 3D y el escaneo con luz estructurada posibilitan reconstruir con precisión grandes conjuntos arqueológicos, lo cual permite el acceso remoto y manipular los registros sin un acceso prolongado a los materiales originales.

Es necesario, no obstante, hacer énfasis en los factores que pueden influir en la calidad de los resultados del escaneo 3D. El estudio de Gerbino et al. (2016) sostiene que algunos de estos factores se relacionan con elementos internos del dispositivo de adquisición, como la resolución y precisión del escáner, y externos al mismo, como la selección adecuada de los parámetros de escaneo.

Según lo exponen dichos autores, existen otros factores externos que inciden en la calidad de los escaneos como la iluminación ambiental y las características de la superficie del objeto que se escanea, por ejemplo, el color de la superficie, brillo, rugosidad, y forma, así como la posición relativa del sensor del escáner 3D a la superficie.

En el estudio los autores utilizaron el escáner de luz led estructurada para producir un corpus de modelos 3D con base en una muestra de un gran conjunto de fragmentos escultóricos de terracota y piedra caliza del período cipro-arcaico (c. 750-475 a. C.) en Athienou-Malloura, Chipre.

Los resultados de la aplicación del escáner 3D con luz estructurada proporcionan a criterio de los autores del estudio citado, un registro preciso de los artefactos individuales y puede facilitar la identificación de uniones a través de detalles de las superficies de rotura y aspectos relacionados con la morfología general.

Es posible entonces a la luz de los estudios citados y de los propios resultados obtenidos en

esta investigación, considerar que existen similitudes respecto al nivel de precisión obtenida en los modelos 3D que conformaron el registro visual del vestigio arqueológico.

Una de las limitaciones en el estudio fue el rendimiento reducido en la capacidad para un óptimo procesamiento gráfico de la computadora utilizada durante el salvado de los trabajos de escaneo del vestigio arqueológico realizados en campo, ya que la tarjeta gráfica dedicada con que cuenta el equipo informático es ligeramente inferior a la requerida¹.

En relación a lo antes mencionado no fue posible, por ejemplo, salvar una sesión de escaneo configurado en alta calidad y adición de cámara de captura de color y textura. Al capturar la información digital representada por una nube de puntos de alta densidad, no fue posible un procesamiento gráfico eficiente, impidiendo en términos generales obtener una mayor precisión en el registro y perdiéndose además la información obtenida en la primera sesión de escaneo.

Esta investigación puede aportar implicaciones teóricas como la estimación de las mediciones de alto-ancho, superficie y volumen aproximadas del vestigio arqueológico Cabeza de Jaguar M26 lo que podría dar lugar a otras iniciativas de estudio respecto a esta información en particular.

A nivel práctico, la investigación implica facilitar el acceso, la divulgación y la reproducción desde impresión aditiva del

¹ La tarjeta gráfica del equipo utilizado es Nvidia Quadro P600. La mínima requerida es Nvidia GTX660, Nvidia Quadro P1000 o superior.

registro visual 3D del vestigio arqueológico Cabeza de Jaguar M26, al disponer de modelos digitales multiformato para su estudio y análisis desde software dedicado y su integración a sitios web especializados en el área de modelos tridimensionales como el utilizado en el presente estudio.

CONCLUSIONES

Esta investigación ha permitido crear un registro visual a partir de la generación de modelos 3D digitales y multiformato que contienen información digital de las características de color, forma y texturas representativas del objeto escaneado, lo anterior, como una forma cautelar de registro en pro de la conservación y divulgación del vestigio arqueológico y patrimonio cultural Monumento Cabeza de Jaguar M26 con amplia relevancia local según se ha mostrado anteriormente.

Tal experiencia práctica permitió la aplicación de tecnologías de escaneo 3D particularmente de luz led estructurada, así como también de software especializado para el análisis y post-procesado de los escaneos.

A través de su entrega a responsables de la administración y cuidado del vestigio, se posibilitó poder contar con un registro visual 3D que trasciende a los actuales y que están conformados en su mayoría por imágenes 2D e información complementaria.

La culminación de este estudio ha contribuido en generar modelos 3D del vestigio arqueológico Monumento Cabeza de Jaguar M26 con un amplio potencial de divulgación y por qué, no decirlo, de reproducción a través de manufactura aditiva, si bien esto último se

escapa del objetivo y alcance principal de la presente investigación. Se considera que estos insumos son relevantes y únicos a la fecha y permiten desde ya salvaguardar este patrimonio cultural en caso de daño o pérdidas irreparables.

Se recomienda a las instituciones responsables del cuidado del vestigio, la continuidad de los registros visuales 3D con escáner, realizando análisis preventivos para valorar la integridad del mismo.

Se recomienda a las autoridades académicas de la Escuela Superior Franciscana Especializada ÁGAPE, contemplar la adquisición de un escáner 3D de luz LED estructurada actual y con características superiores al utilizado en este trabajo.

Se recomienda además adquirir ordenadores personales dedicados en hardware y software que permitan entre otros, el análisis y procesado 3D además de un rendimiento óptimo del procesamiento gráfico en futuros trabajos en el campo del registro visual 3D de vestigios arqueológicos y patrimonios culturales similares.

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este estudio no hubiera sido posible sin la colaboración activa de María Lisseth Ramos Méndez, Técnico en Gestión de Desarrollo Turístico facilitando el contacto de responsables de la administración y cuidado del vestigio arqueológico y patrimonio cultural Monumento Cabeza de Jaguar M26 en Izalco. Colaboró además poniendo a disposición del equipo de investigación, la réplica de una estatuilla de dimensiones pequeñas y

características zoomorfas que fue de gran ayuda y utilidad para el desarrollo de pruebas preliminares de configuración de software y uso del escáner 3D.

Se agradece la colaboración de responsable de la Unidad de Turismo de Izalco, el señor Néstor Guillén, por facilitar información relevante sobre la situación actual del Monumento Cabeza de Jaguar M26 en lo que respecta a su administración y preservación, acceso al vestigio para las sesiones de escaneo y la utilización de las instalaciones eléctricas y áreas circundantes al vestigio en el parque Rafael Zaldaña durante el trabajo en campo.

REFERENCIAS

- Aguilar, Y. (2023). Diseño de protocolo para digitalización de patrimonio cultural salvadoreño, implementando realidad virtual, fotogrametría y procesos de manufactura aditiva. *Cultura y Sociedad*, 8(1), 11-24. <https://doi.org/10.5377/ccs.v8i1.15594>
- Arias, F. (septiembre, 2017). *Efectividad y eficiencia de la investigación tecnológica en la universidad*. RECITIUTM. Revista Electrónica de Ciencia y Tecnología Del Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo, 3(1), 72-72. <http://recitiutm.iutm.edu.ve/index.php/recitiutm/article/view/92/pdf>
- Alvarenga, V., Mulato, A., y Palacios, P. (2022c, julio 1). *Importancia del registro visual para la conservación y difusión del parque arqueológico de Cihuatán, municipio de Aguilares, departamento de San Salvador*, 2018. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/12421>
- Binford, L. R. (1988c). Reading the Past: Current Approaches to Interpretation in Archaeology. Ian Hodder. Cambridge University Press, Cambridge, *American Antiquity*, 53(4), 875-876. <https://doi.org/10.2307/281130>
- Counts, D., Averett, E. y Garstki, K. (2016). A fragmented past: (re)constructing antiquity through 3D artefact modelling and customised structured light scanning at Athienou-Malloura, Cyprus. *Antiquity*, 90(349), 206-218. <https://doi.org/10.15184/aqy.2015.181>
- CreaFab3D. (2024, 5 marzo). *Archivo STL, ¿Qué es y para qué sirve?* CreaFab3D. <https://creafab3d.com/archivo-stl-que-es/>
- Curless, B. & Levoy, M. (1996). "A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images". *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 303-312. <https://doi.org/0.1145/237170.237269>
- Dirección Nacional de Patrimonio Cultural - Ministerio de Cultura. (2022, 3 febrero). Ministerio de Cultura. <https://www.cultura.gob.sv/marco-institucional/direccion-nacional-de-patrimonio-cultural/>
- Openize Pty Ltd (2024). *PLY - Formato de archivo 3D de polígono*. <https://docs.fileformat.com/es/3d/ply/>
- Einscan (2022, 7 diciembre). *Precisión del escáner 3D portátil EinScan HX* - EinScan. <https://acortar.link/vRus9D>
- Felícísimo, Á.M. et al. (2020) 'Representación tridimensional de objetos arqueológicos: una propuesta de arqueología virtual', *Her&Mus. Heritage & Museography*, 21 (2020): Historia pública, patrimonio del conflicto y museos, pp. 185-205. <https://doi.org/10.34810/hermusn21id378134>
- Geng, J. (2011). "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial". *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), pp. 128-160. DOI: <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>

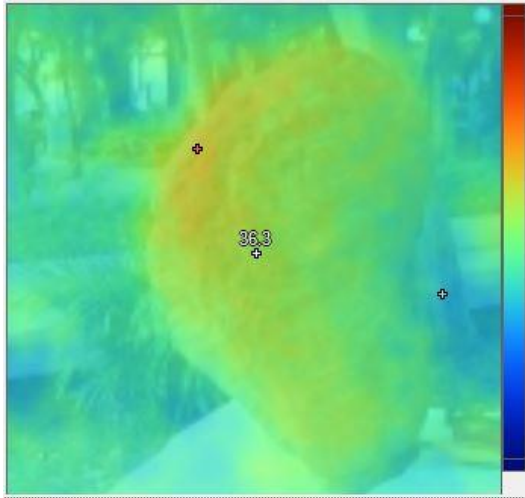
- Gerbino, S., Del Giudice, D., Staiano, G., Lanzotti, A. y Martorelli, M. (2016). On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology/International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, 84(9-12), 1787-1799. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7830-7>
- Jung Group (s. f.). *Productos en formato OBJ*. Albrecht JUNG GmbH & Co. KG. <https://www.jung-group.com/es-ES/Servicio/Descargas/OBJ/>
- Kantaros, A., Ganetsos, T., & Petrescu, F. I. T. (2023). Three-Dimensional Printing and 3D Scanning: Emerging Technologies Exhibiting High Potential in the Field of Cultural Heritage. *Applied Sciences*, 13(8), 4777. <https://doi.org/10.3390/app13084777>
- Karasik, A., & Smilansky, U. (2008). 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. *Journal Of Archaeological Science*, 35(5), 1148-1168. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.08.008>
- Karl-Bridge-Microsoft. (2023, 2 junio). *Generación de un paquete de formato de fabricación 3D - UWP applications*. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/es-es/windows/uwp/devices-sensors/3d-generate-3mf>
- Kivolya, N. (2019). *Cómo elegir un escáner 3D*. Soluciones Profesionales de Escaneo 3D | Artec3D. <https://www.artec3d.com/es/learning-center/how-choose-3d-scanner#:~:text=Un%20esc%C3%A1ner%20l%C3%A1ser%20estacionario%20de,y%20la%20distancia%20de%20escaneo>
- Kurniawan, K., Suratman, R., Budiwantoro, B., Brodjonegoro, S. S., & Media, R. I. (2019). Feasibility study Wear rate measurement using 3D scan imaging. *Aptech Proceeding International Seminar On Applied Technology, Science & Arts: Development Of Green Agro-Industry To Support Human Life Sustainability*, 0(3), 109. <https://doi.org/10.12962/j23546026.y2019i3.5852>
- Lee, J., & An, D. W. (2023). Utilization of 3D Scan Data: “Representation” of Korean Wooden Architectural Heritage. *Sustainability*, 15(8), 6932. <https://doi.org/10.3390/su15086932>
- Lipowiecki, I. K., Rządowski, W., Zapał, W., & Kowalik, M. P. (2023). Combining the Technology of Long-Range Laser 3D Scanners and Structured Light Handheld 3D Scanners to Digitize Large-sized Objects. *Advances In Sciences And Technology/Postępy Nauki I Techniki*, 17(3), 196-205. <https://doi.org/10.12913/22998624/166186>
- Milosz, M. and Kęsik, J. (2023). 3D Information Technologies in Cultural Heritage Preservation and Popularisation. En *MDPI eBooks*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6282-7>
- Morita, M., Andruchow, M., y Bilmes, G. (2018). Registro 3D de bienes culturales y sus aplicaciones en arte contemporáneo. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/344311887>
- Moyano, J., Cabrera-Revuelta, E., Nieto-Julián, J. E., Fernández-Alconchel, M., & Fernández-Valderrama, P. (2023). Evaluation of Geometric Data Registration of Small Objects from Non-Invasive Techniques: Applicability to the HBIM Field. *Sensors*, 23(3), 1730. <https://doi.org/10.3390/s23031730>
- Museo de la Palabra y la Imagen MUPI. (2023, 4 septiembre). *Pieza del Mes de agosto de 2023: Cabeza de Jaguar*. MUPI. <https://museo.com.sv/2023/08/cabeza-de-jaguar/#:~:text=Estas%20piezas%2C%20de%20las%20cuales,de%202.300%20a%C3%B1os%20de%20antig%C3%BCedad>
- Oh, J., & Bae, M. J. (2023). PRODUCTION OF DIGITAL CONTENT (3D ASSET) SOURCE RESOURCES FOR CULTURAL HERITAGE. *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences/International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, 1141-1147. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlviim-2-2023-1141-2023>

- Oruç, P. (2022). Rethinking Who 'Keeps' Heritage: 3D Technology, Repatriation and Copyright. *GRUR International*, 71(12), 1138-1146. <https://doi.org/10.1093/grurint/ikac096>
- Papas, N., Tsongas, K., Karolidis, D., & Tzetzis, D. (2021). A COMPARISON OF LASER AND STRUCTURED LIGHT SCANNING TECHNOLOGIES FOR ARCHAEOLOGICAL APPLICATIONS. *International Journal Of Modern Manufacturing Technologies*, 13(3), 111-116. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2021.13.3.111>
- Perez, A., Sharif, K., Guelfi, E., Li, S., Miller, A., Prasad, K., Sinard, R., Lewis, J., & Topf, M. (2023). Ex vivo 3D scanning and specimen mapping in anatomic pathology. *Journal Of Pathology Informatics*, 14, 100186. <https://doi.org/10.1016/j.jpi.2022.100186>
- Portillo, H. (2020). Interpretación iconográfica de las "cabezas de jaguar" procedentes del occidente de El Salvador, Centroamérica. <https://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/https://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/tesis/941001347.pdf>
- Proyecto Complejo Plaza de las Columnas. (2017, 29 mayo). *Materiales arqueológicos - Complejo Plaza de las Columnas*. Complejo Plaza de las Columnas. <http://ppcteotihuacan.org/es/trabajo-de-campo/materiales-arqueologicos/#:~:text=Los%20materiales%20arqueol%C3%B3gicos%20pueden%20ser,ser%20analizados%20por%20los%20especialistas>
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record/Photogrammetric Record*, 21(115), 269-291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Renfrew, C., y Bahn, P. (2011b). *Arqueología: Teorías, métodos y prácticas*. Ediciones Akal, S.A.
- S, N., S, N., N, N., & M, N. (2023b). Review on 3D Point Cloud. *Global Journal Of Engineering And Technology Advances*, 16(3), 219-223. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2023.16.3.0192>
- Sansoni, G., Trebeschi, M., & Docchio, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors*, 9(1), 568-601. <https://doi.org/10.3390/s90100568>
- Tejado, J. (2005). *Escaneo en 3D y prototipado de piezas arqueológicas: las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del Patrimonio Arqueológico*. <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/iberia/article/view/303>
- Tello, M. C., Rodríguez, C. M., Doering, T., García, J. G., & Collins, L. (2019). *El Registro 3D y Sus Aportes a la Conservación en Chalcatzingo*. Digital Commons @ University Of South Florida. https://digitalcommons.usf.edu/dhhc_facpub/23/?utm_source=digitalcommons.usf.edu%2Fdhhc_facpub%2F23&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Vázquez, Pere Pau, & Feixas, Miquel. (s.f.) *Introducción a la Computación Gráfica y Modelado 3D*. Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España. ISBN: 978-84-9788-944-5
- Velásquez, M., y Vanegas, H. (2021). *Desarrollo del turismo cultural a través de la aplicación de realidad aumentada sobre estructuras arquitectónicas del municipio de Santa Ana*. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE. <https://www.itca.edu.sv/wp-content/uploads/2021/11/09.pdf>
- Viñas, S. (2018b). *Teoría Contemporánea de la Restauración*. https://www.academia.edu/36293739/VINAS_Salvador_Munoz_Teoria_Contemporanea_de_la_Restauracion_pdf
- Zia, R. (2022). Seen Description: Visualising and crafting data in mixed realities. *Electronic Workshops In Computing*. <https://doi.org/10.14236/ewic/eva2022.5>

APÉNDICE

Figura 10.

Termografía monumento Cabeza de Jaguar M26



Nota. La figura representa una termografía del vestigio arqueológico escaneado con una temperatura del objeto de 36°C a una emisividad general de 0.95 y temperatura de fondo de 32.0°C. El color azul oscuro representa la temperatura más baja, mientras que el color rojo oscuro, la temperatura más alta según la escala de colores a la izquierda.

Tabla 4.

Resumen de promedio de variables ambientales y de proceso de escaneo 3D de vestigio arqueológico Cabeza de Jaguar M26 in situ.

Temperatura ambiente °C	Humedad relativa (%HHRR)	Nivel de iluminación (lx)	Duración del escaneo (hr.)
32.5	56.0	543.75	2.5

Nota. La tabla presenta los valores promedios de mediciones de las variables de campo registrados durante el proceso de escaneo. <https://doi.org/10.35383/ius-usat.v1i1.422>