

Recorrido inmersivo de la zona arqueológica de Yucuita Immersive tour of the Yucuita archaeological zone

E. G. Ramos-Pérez ^{a,*}, J. C. Rosales-Galindo ^b, E. Villa-Calvo ^b, C. E. Millán-Hernández ^a,
O. M. Hernández-López ^a, E. Posselt-Santoyo ^c

^a Instituto de Computación, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 69008, Huajuapán, Oaxaca, México.

^b Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero, 51760, Estado de México, México.

^c Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

Resumen

Durante décadas, la zona arqueológica de Yucuita, traducido como “Cerro de las Flores” en mixteco (yucu-cerro; ita-flor), ha sido estudiada por su valor representativo de la cultura mixteca. La zona está situada en el municipio de San Juan Yucuita, al poniente de la capital del estado de Oaxaca, México. Las visitas turísticas o exploratorias no son factibles debido al difícil acceso de la zona geográfica, ya que implica altos costos tanto en tiempo como en dinero. Este trabajo de investigación se aborda la problemática de la representación y preservación de zonas arqueológicas, particularmente de la zona arqueológica de Yucuita en el estado de Oaxaca, mediante el desarrollo de un recorrido inmersivo en tres dimensiones, utilizando técnicas y herramientas especializadas como Agisoft Metashape, para la generación de modelos tridimensionales a partir de las imágenes; y de la técnica de fotogrametría a partir de fotografía aérea realiza por un dron. El objetivo es proporcionar una herramienta interactiva que permita a los investigadores, estudiantes y público en general explorar la zona arqueológica de Yucuita de manera virtual, facilitando la comprensión de su estructura y contexto histórico. Este proyecto representa una contribución importante tanto para la preservación del patrimonio arqueológico como para la difusión del conocimiento histórico y cultural de Oaxaca.

Palabras Clave: Zona Arqueológica, Realidad Virtual, Modelado 3D, Gafas Inmersivas.

Abstract

For decades, the archaeological zone of Yucuita, translated as “Hill of Flowers” in Mixtec (yucu-hill; ita-flower), has been studied for its representative value of the Mixtec culture. The area is located in the municipality of San Juan Yucuita, west of the capital of the state of Oaxaca, Mexico; however, the difficult access to this area implies high costs both in time and money. Therefore, tourist or exploratory visits are not feasible. This research work addresses the problem of the representation and preservation of archaeological sites, particularly the archaeological zone of Yucuita in the state of Oaxaca, through the development of an immersive three-dimensional tour, using specialized techniques and tools such as Agisoft Metashape, for the generation of three-dimensional models from images; and the photogrammetry technique from aerial photography carried out by a drone. The objective is to provide an interactive tool that allows researchers, students and the general public to explore the archaeological zone of Yucuita virtually, facilitating the understanding of its structure and historical context. This project represents an important contribution to both the preservation of archaeological heritage and the dissemination of historical and cultural knowledge about Oaxaca.

Keywords: Archaeological Zone, Virtual Reality, 3D Modeling, Immersive Headset.

1. Introducción

Durante décadas, la zona arqueológica de Yucuita, cuyo nombre en mixteco significa “Cerro de las Flores”, ha sido objeto de estudio por su valor representativo dentro de la

cultura mixteca. Ubicada en un cerro, a 86 kilómetros al noroeste de la capital de Oaxaca, su preservación es crucial para mantener el patrimonio cultural de esta región. Sin embargo, las dificultades en las vías de comunicación del estado incrementan los costos y tiempos de traslado, lo que

*Autor para la correspondencia: erik@mixteco.utm.mx

Correo electrónico: erik@mixteco.utm.mx (Erik Germán Ramos-Pérez), juanrosales010801@gmail.com (Juan Carlos Rosales-Galindo), villae155@gmail.com (Erick Villa-Calvo), cmillanh@gs.utm.mx (Christian Eduardo Millán-Hernández), IngOscarMHdezL@gmail.com (Oscar Manuel Hernández-López), posaem@gmail.com (Emmanuel Posselt-Santoyo).

convierte a las tecnologías emergentes en una alternativa viable para su difusión y conservación. Las experiencias virtuales permiten establecer una conexión intangible entre el visitante y el patrimonio cultural, integrando al usuario como parte activa del proceso de exploración. Un recorrido virtual recrea un entorno completamente interactivo, que permite conocer distintos espacios mediante imágenes, videos y sonidos explicativos. Estas visitas ofrecen la ilusión de presencia en un sitio, facilitando la exploración de lugares remotos o inaccesibles por limitaciones geográficas, temporales o económicas. No obstante, los costos de implementación y los requisitos tecnológicos pueden ser significativos. A pesar de ello, la creciente accesibilidad derivada de la reducción de costos en los últimos años ha hecho que las ventajas superen las desventajas.

Este trabajo aborda la problemática de la representación y preservación de la zona arqueológica de Yucuita, mediante el desarrollo de un recorrido inmersivo en tres dimensiones (3D). Para ello, se emplearon técnicas y herramientas especializadas para la generación de modelos tridimensionales, así como fotogrametría a partir de fotografía aérea capturada por un dron. El objetivo principal es proporcionar una herramienta interactiva que permita a investigadores, estudiantes y público en general explorar virtualmente la zona arqueológica, facilitando la comprensión de su estructura y contexto histórico.

1.1. Antecedentes

En una revisión de trabajos previos sobre el uso de la Realidad Virtual (RV), se destacan sus ventajas para recrear experiencias inmersivas aplicadas a contextos culturales y zonas arqueológicas.

En: Experiencias inmersivas. Realidad virtual y realidad aumentada en periodismo, publicidad y artes (Grijalba, 2025), se expone la relevancia de la RV y la Realidad Aumentada (RA) en campos como el periodismo, la publicidad y las artes en países como España, Portugal y Brasil. Se aborda el desarrollo del metaverso en combinación con estas tecnologías y las gafas de realidad virtual, que permiten representar tanto mundos reales como imaginarios. El autor reflexiona sobre las implicaciones económicas y éticas de estas experiencias inmersivas, especialmente el riesgo de confundir lo real con lo virtual. Asimismo, destaca el impacto de la RV en la representación de narrativas, la reconstrucción del patrimonio histórico y su aplicación en la educación a distancia.

En: Uso de la tecnología de Unreal Engine® para contribuir a salvaguardar la cocina tradicional del estado de Guerrero: una revisión de la literatura (Cervantes *et al.*, 2025), se presenta un proyecto enfocado en la preservación de la cocina tradicional del estado de Guerrero mediante el uso de Unreal Engine® (UE) y RV. El objetivo es que las generaciones presentes y futuras accedan a esta información de forma atractiva. Tras una revisión de literatura, se concluye que la RV y UE son herramientas ampliamente utilizadas en áreas como salud, turismo, arquitectura, paleontología y cultura, al permitir la reconstrucción de espacios históricos. Los resultados revelan que estas tecnologías siguen siendo exploradas como medios efectivos y entretenidos para divulgar el patrimonio cultural.

En: Developing an educational cultural heritage 3d puzzle in a virtual reality environment (Roumana *et al.*, 2022), se menciona la preservación y difusión del patrimonio cultural ha sido transformada gracias a las tecnologías inmersivas. En su estudio se desarrolló un juego serio tridimensional tipo rompecabezas en un entorno de RV, diseñado para motivar el aprendizaje cultural entre niños y estudiantes. Se concluye que este tipo de aproximaciones favorece una conexión más directa y realista con los bienes culturales, superando los métodos tradicionales de enseñanza.

En: VR Games in Cultural Heritage: A Systematic Review of the Emerging Fields of Virtual Reality and Culture Games (Theodoropoulos y Antoniou, 2022), se destaca el crecimiento del uso de juegos de RV en contextos de patrimonio cultural, especialmente en museos y exposiciones. Aunque aún existen pocas investigaciones que analicen sus beneficios y limitaciones, se identifican oportunidades para mejorar la experiencia del visitante, así como desafíos relacionados con el desarrollo y la integración efectiva de estas tecnologías.

En: Arica y Parinacota: Una experiencia virtual de la cultura Chinchorro, Patrimonio Mundial (Cousins, 2023), se propone el uso de una experiencia inmersiva que permite a los usuarios recorrer virtualmente el museo en 360° desde diversos dispositivos. Esta iniciativa rompe con la pasividad del público, permitiéndoles no solo consumir, sino también compartir el contenido cultural.

El Museo Nacional de Antropología ubicado en la sala Teotihuacana, ofrece también recorridos virtuales que abarcan diversas culturas indígenas de México, así como una introducción a la antropología, las culturas de Oaxaca, las culturas de la costa del golfo, y la cultura maya, entre otras. El conocimiento de la cultura maya se vuelve parte crucial para que los niños se familiaricen con las múltiples creencias, costumbres, artefactos y aspectos distintivos de dicha cultura. Además, la RA, un campo que posibilita la superposición de información en imágenes realistas capturadas por una cámara, está siendo recientemente implementada en diversas áreas como educación, comercio y cultura (Bustamante *et al.*, 2023).

En: La Aplicación de Medios Interactivos para el Fortalecimiento de un Santuario de Origen Precolonial en la Mixteca Alta de Oaxaca (Jiménez *et al.*, 2021), se presenta un estudio sobre la aplicación de medios interactivos para fortalecer un santuario precolonial en la Mixteca Alta, Oaxaca. En este trabajo se analizan dos enfoques de representación tridimensional: uno centrado en reconstruir lo observable actualmente, y otro en recrear elementos perdidos por el paso del tiempo. La digitalización ha sido clave para preservar y reinterpretar el patrimonio arqueológico.

En: Enseñanza-aprendizaje del arte a través de recorridos virtuales 3D en el contexto de la ciudad de Quito en el año 2021 (Ávila *et al.*, 2022), se plantea el análisis comparativo de recorridos virtuales en museos, mostrando cómo estas herramientas pueden enriquecer la experiencia del visitante y el aprendizaje del arte. A pesar de algunas dificultades técnicas, la creación de modelos 3D mediante imágenes fotogramétricas ha permitido lograr reconstrucciones precisas de objetos y espacios culturales.

Otros trabajos previos han demostrado el potencial de los recorridos virtuales para el acceso a la cultura. Por ejemplo, la visita virtual de Teotihuacán ha incrementado la interactividad y conocimiento del sitio arqueológico (Amador *et al.*, 2014).

Otro proyecto en la zona arqueológica de Puruchuco-Huaquerones empleó técnicas avanzadas de fotogrametría y modelado 3D para crear modelos interactivos y accesibles al público (Valladolid *et al.*, 2022).

2. Introducción

A continuación, se desarrolla la metodología utilizada en este trabajo, considerando la naturaleza del proyecto y una planificación previamente especificada, en la cual los requisitos han sido establecidos completamente desde el inicio y no se esperaban cambios durante su desarrollo, se consideró adecuado implementar la metodología en cascada. La metodología aplicada en el proyecto se ilustra en la Figura 1.

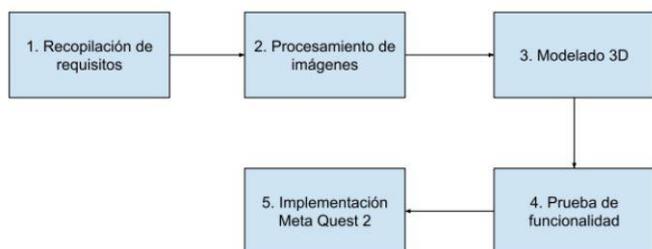


Figura 1: Metodología.

2.1. Recopilación de requisitos

En la primera etapa, se recopiló la información de la zona arqueológica de Yucuita, en el Estado de Oaxaca: así como los requisitos específicos del recorrido 3D. En la Tabla 1 se muestran de manera concreta.

Tabla 1: Recopilación de requisitos

Requisito	Descripción
Teletransportación	Ayuda a posicionar al usuario de un punto de origen a un punto destino, reduciendo significativamente el recorrido.
Delimitación de las zonas	Ayuda a mejorar el rendimiento computacional del recorrido virtual, al ignorar gran parte del recorrido y la carga del modelo tridimensional.
Recreación de las pirámides	Ayuda al usuario a conocer las pirámides que actualmente ya no existen.
La colocación de multimedia	Permite a los usuarios ampliar información importante de la zona arqueológica, a través de videos, imágenes, textos y audios.
Ambientación inmersiva	Ayuda a tener una experiencia de usuario más realista, por lo tanto, el usuario se vuelve parte del recorrido.

Durante esta etapa de recopilación de datos, participó un grupo de arqueólogos especializados en el estudio del sitio. Con base en sus indicaciones, se definió una ruta de vuelo para la adquisición de imágenes mediante un dron DJI, el cual sobrevoló el área arqueológica y capturó una serie de fotografías aéreas. Estas imágenes fueron posteriormente utilizadas para la generación de objetos tridimensionales. El proceso de adquisición, orientado a la creación del recorrido

en 3D, permitió obtener un modelo detallado que combina tecnología de drones con conocimiento arqueológico especializado. La Figura 2 presenta una previsualización de las imágenes obtenidas durante el vuelo.



Figura 2: Previsualización de las fotografías tomadas con el dron DJI.

Durante la definición de las características del recorrido virtual, se seleccionaron tres sitios clave dentro de la zona arqueológica de Yucuita, identificados como sitio uno, sitio dos y sitio tres. Estos puntos de interés, representados en la Figura 3, fueron elegidos con el objetivo de ofrecer una experiencia inmersiva centrada en la riqueza histórica del lugar. La selección permitió delimitar las áreas específicas del modelo donde el usuario podría interactuar, optimizando así el rendimiento computacional de la aplicación. Esta estrategia redujo el consumo de recursos al evitar habilitar el recorrido completo en toda la zona arqueológica modelada.

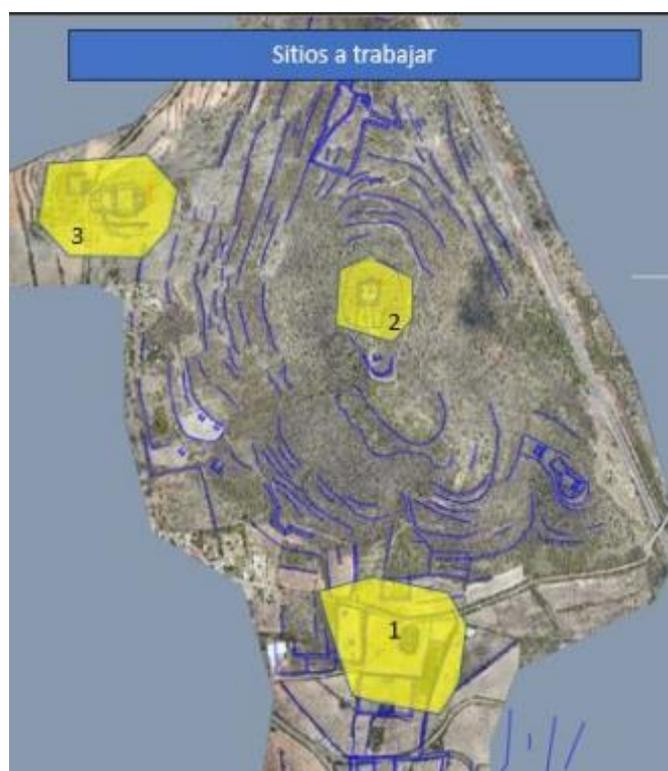


Figura 3: Sitios particulares a modelar de la zona arqueológica.

2.2. Recopilación de requisitos

En la primera etapa, se recopiló la información de la zona arqueológica de Yucuita, en el Estado de Oaxaca: así como los requisitos específicos del recorrido 3D. En la Tabla 1 se muestran de manera concreta.

La Figura 4 muestra la nube de puntos dispersos obtenida tras el procesamiento fotogramétrico. En esta fase, las fotografías fueron orientadas espacialmente para determinar con precisión su posición y ángulo en un entorno tridimensional. Como resultado, se generó una nube de puntos que representa de manera precisa y detallada la superficie del objeto o terreno modelado.

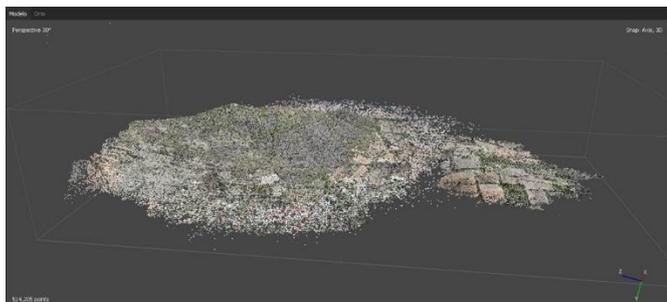


Figura 4: Modelo de puntos dispersos de la superficie de Yucuita.

Una vez generado el modelo inicial, se procedió a construir una nube densa de puntos (gran cantidad de puntos individuales en el espacio), la cual representa con mayor precisión la geometría del objeto o terreno. Esta nube contiene una alta densidad de puntos distribuidos en el espacio tridimensional, capturando detalles complejos de forma, textura y escala.

La Figura 5 muestra el nivel de detalle alcanzado en este modelo denso. Cada punto fue calculado con base en la correspondencia entre múltiples imágenes, permitiendo una reconstrucción precisa de las superficies representadas.

Este proceso genera una visualización altamente detallada, con un error absoluto estimado entre 5 y 7.5 cm, de acuerdo con los parámetros técnicos del software utilizado*.

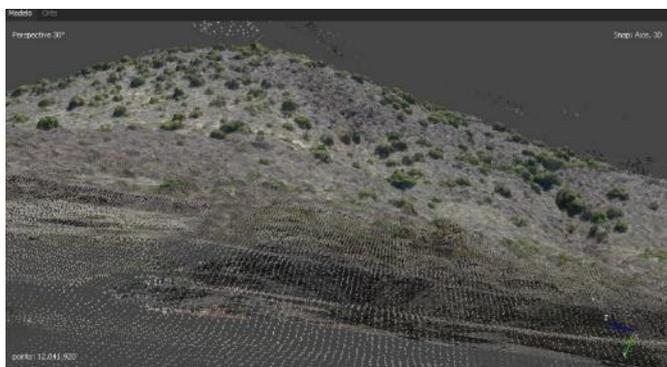


Figura 5: Barrido general de puntos dispersos.

A partir del procesamiento de la nube de puntos, se genera una malla tridimensional que representa con mayor precisión la geometría del objeto. Esta malla no solo define la forma general, sino que también incorpora detalles finos del modelo, lo que contribuye a una alta fidelidad visual.

La transformación de la nube de puntos en una malla permite una representación más coherente y continua de la superficie del terreno u objeto estudiado. La Figura 6 muestra el resultado de esta etapa del proceso.

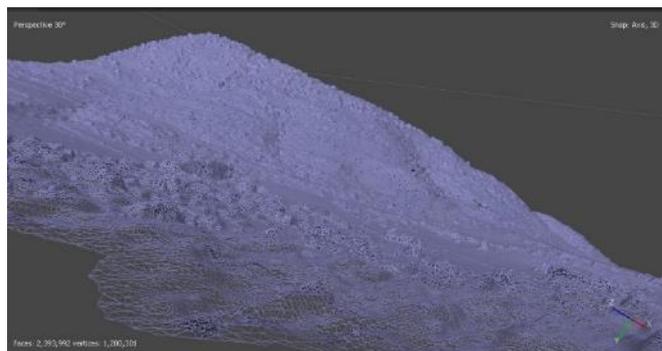


Figura 6: Malla de modelo 3D.

A continuación, se aplican texturas a la malla tridimensional utilizando las fotografías originales, con el objetivo de lograr una representación visual más precisa y realista. Este procedimiento, ilustrado en la Figura 7, permite transferir detalles visuales auténticos al modelo, mejorando significativamente su calidad estética.

Las texturas se seleccionan cuidadosamente para conservar la fidelidad con las características originales del entorno, y así reforzar el valor visual y documental del modelo tridimensional.



Figura 7: Modelo texturizado.

2.3. Desarrollo 3D

En la tercera etapa del desarrollo del modelo 3D, se llevaron a cabo actividades enfocadas en la creación y perfeccionamiento del entorno tridimensional. Esta fase se centró en los siguientes aspectos:

Añadir detalles y optimizar la geometría: el modelo 3D previamente generado fue importado desde Agisoft Metashape® versión 2.2.1 a Blender® versión 4.1 en formato OBJ. La Figura 8 muestra el modelo 3D importado en Blender para su ajuste y edición. Posteriormente, se realizó una revisión manual para eliminar elementos no deseados, como árboles sin información del terreno que parecían estar flotando. Finalmente, el modelo fue exportado en formato FBX (FilmBox), compatible con Unity® versión 2023.2.20f1. Esta conversión, además de reducir el tamaño del archivo en

* <https://www.agisoft.com/>

aproximadamente un 60%, facilita su integración a la plataforma de desarrollo sin problemas de compatibilidad.

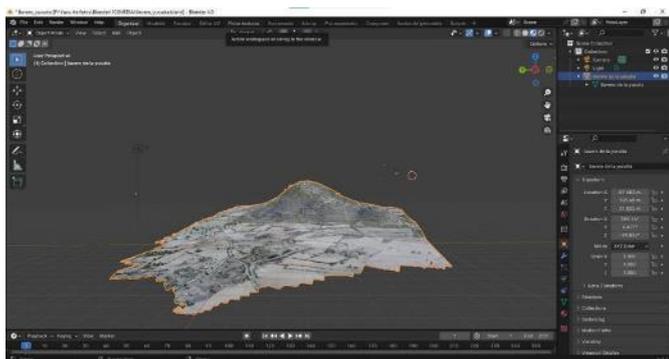


Figura 8: Modelo en Blender.

La apariencia del entorno 3D fue mejorada mediante la incorporación de detalles específicos que enriquecen su aspecto visual, como la texturización y la asignación de materiales (pasto, rocas, árboles, entre otros). Además, se optimizó la geometría existente, lo que permitió mejorar el rendimiento y la fluidez durante la navegación dentro del entorno virtual. Esta optimización se logró sin sacrificar la calidad visual. El entorno tridimensional tras la incorporación de texturas y materiales se visualiza en la Figura 9.

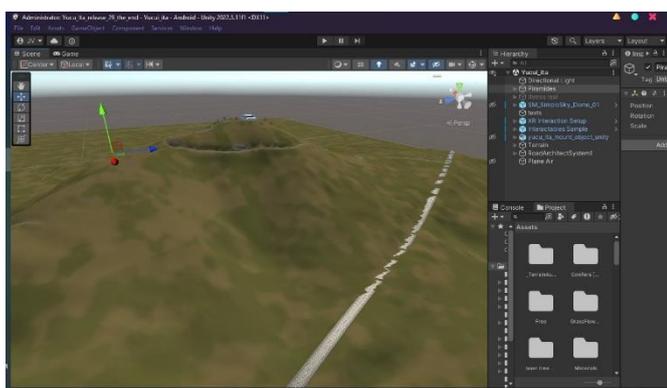


Figura 9: Entorno 3D después de la texturización.

La configuración de la iluminación y las cámaras permite resaltar detalles y construir atmósferas específicas. Para lograrlo, se ajustaron distintos niveles de intensidad lumínica con el fin de simular un efecto de mediodía, es decir, un momento del día en el que todos los objetos están uniformemente iluminados. La configuración lumínica simulando un efecto de mediodía se muestra en la Figura 10. Asimismo, se configuraron diversas cámaras con coordenadas específicas (posición en los ejes X, Y y Z), según los distintos sitios de la zona arqueológica, lo que permitió generar vistas aéreas y en primera persona. Esto garantiza una experiencia inmersiva más completa para el usuario. Las posiciones de cámara utilizadas en el recorrido se ilustran en la Figura 11.

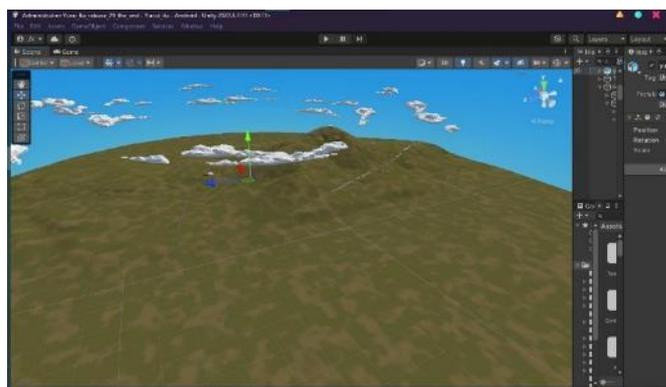


Figura 10: Configuración de iluminación.



Figura 11: configuración de cámaras.

Implementación de la interactividad y navegación: En esta fase se incorporaron y configuraron los controles de navegación, así como elementos que permiten a los usuarios interactuar con el modelo 3D de la zona arqueológica. Estas funciones incluyen la posibilidad de caminar, teletransportarse y cambiar de vista. La implementación de controles interactivos en el recorrido se representa en la Figura 12, estas características mejoran la experiencia inmersiva y fluida durante la exploración del entorno.

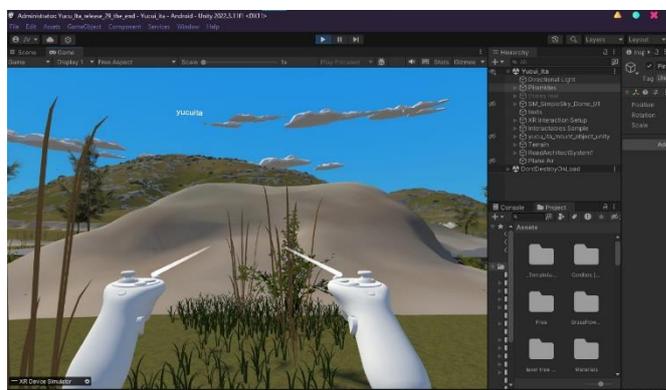


Figura 12: Interactividad con los controles.

2.4. Pruebas de funcionalidad

En esta cuarta etapa, se realizaron pruebas de funcionalidad orientadas a evaluar y validar el rendimiento de la aplicación final desarrollada en Unity. Entre estas pruebas, se destacó la verificación de la visualización correcta del modelo 3D, así como la interactividad y navegación del usuario mediante los controles.

Para validar estos elementos, se llevaron a cabo evaluaciones tanto visuales como funcionales, con el objetivo de garantizar una experiencia de usuario consistente y satisfactoria. La Figura 13 muestra el entorno virtual dentro de Unity tras las pruebas de validación.

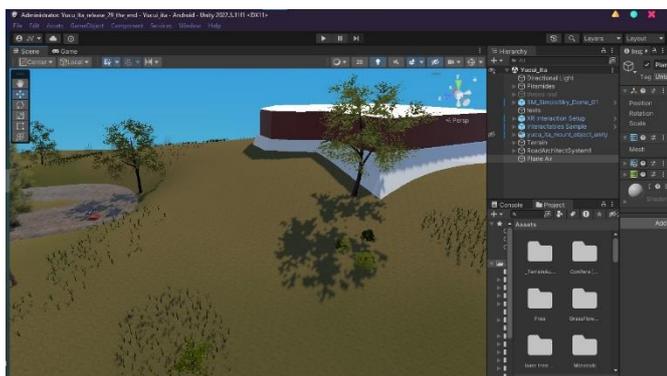


Figura 13: Visualización del entorno 3D en Unity.

En cuanto al recorrido 3D en Unity, las pruebas se centraron en validar la navegación, la interacción con objetos y la respuesta en entornos tridimensionales. Estos ensayos permitieron identificar posibles inconvenientes en la experiencia del usuario, además de optimizar la eficiencia y precisión de la representación tridimensional en la plataforma. La prueba del recorrido completo por los sitios de interés se aprecia en la Figura 14.

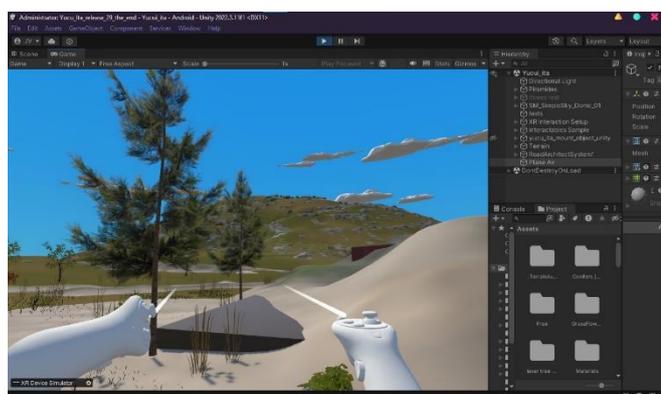


Figura 14: Prueba del recorrido.

Para verificar la correcta visualización del modelo, se realizó un recorrido completo por los tres sitios de interés dentro de la zona arqueológica. A través de una evaluación cualitativa, los desarrolladores inspeccionaron visualmente que elementos como árboles, rocas, caminos, pirámides y ventanas emergentes de teletransportación estuvieran correctamente integrados al terreno, sin presentar elevaciones indebidas, asegurando así la uniformidad con el entorno.

Respecto a la interactividad y navegación, se ejecutaron pruebas funcionales para validar las ventanas emergentes de teletransportación, los controles de desplazamiento y el cambio entre la cámara en primera persona y la vista flotante.

Esta etapa de verificación permitió probar exhaustivamente la interfaz de usuario y todas las funcionalidades, evaluando su desempeño y fluidez durante la interacción en la versión final del recorrido 3D de la zona arqueológica en Unity.

2.5. Implementación en Meta Quest 2

En la última etapa, se llevó a cabo la implementación del modelo 3D en las gafas Meta Quest 2. Esta fase se dividió en tres actividades principales:

1. Adaptación del recorrido 3D para su integración en el dispositivo, asegurando su compatibilidad con la RV.
2. Pruebas de aseguramiento de calidad, enfocadas en verificar la fluidez de la experiencia y la optimización de los objetos obtenidos en fases anteriores.
3. Ejecución completa del recorrido dentro de la zona arqueológica, con el fin de evaluar la experiencia inmersiva proporcionada por el dispositivo.

Durante este proceso, se implementaron medidas para garantizar que la experiencia resultante fuera fluida y plenamente optimizada para las capacidades de Oculus Quest 2.

Para adaptar el recorrido 3D a Oculus Quest 2, fue necesario aplicar configuraciones específicas, como la compresión de texturas compatibles con la arquitectura ARM x64, así como la compilación de scripts en C++. Estas acciones no solo evitaban errores de ejecución en el dispositivo, sino que también mejoraron significativamente la fluidez de la aplicación.

Finalmente, se compiló la aplicación para su ejecución nativa en las gafas Meta Quest 2. Para completar este paso, fue necesario habilitar el modo desarrollador desde la configuración del dispositivo.

2.6. Pruebas finales

Pruebas del recorrido 3D en las gafas Oculus Quest 2. Se realizaron pruebas del recorrido 3D en las gafas Oculus Quest 2 con el objetivo principal de verificar que la aplicación respondiera de manera fluida y natural, garantizando una experiencia inmersiva para los usuarios.

Pruebas de funcionalidad. En esta etapa, se llevaron a cabo pruebas de funcionalidad para evaluar y validar el rendimiento de la aplicación en las gafas. Entre estas pruebas, se destacó la verificación de la visualización correcta del modelo 3D, así como de la interactividad y la navegación mediante los controles del dispositivo. La experiencia visual dentro de las gafas Oculus Quest 2 se muestra en la Figura 15.



Figura 15: Visualización del entorno desde las gafas.

Pruebas de recorrido 3D en las gafas. Durante estas pruebas, se evaluó la navegación, la interacción con objetos y la respuesta de la aplicación en entornos tridimensionales. Esto permitió identificar posibles inconvenientes en la experiencia del usuario, así como validar la eficiencia de la aplicación ejecutada de forma nativa en el dispositivo. Los parámetros del procesamiento del recorrido 3D en el dispositivo se ilustran en la Figura 16.

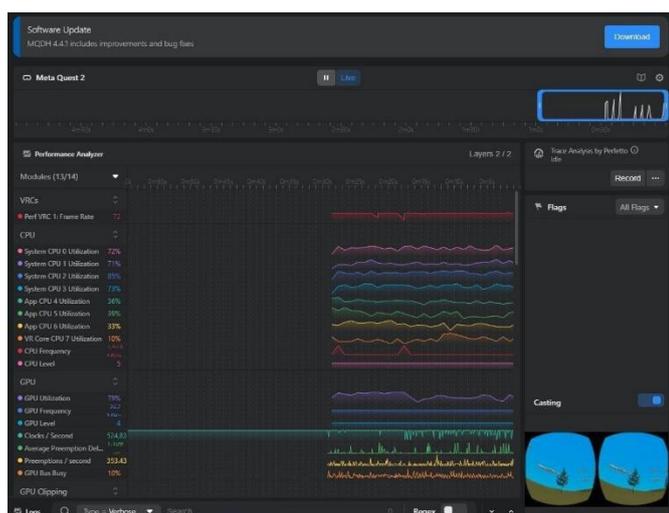


Figura 16: Parámetros de procesamiento.

Validación visual del modelo en la zona arqueológica. Al igual que en las pruebas realizadas en Unity, se efectuó un recorrido completo por los tres sitios de interés dentro de la zona arqueológica. Esta evaluación cualitativa fue realizada por arqueólogos expertos en la región Mixteca, quienes llevaron a cabo una inspección visual utilizando las gafas Oculus. Durante el recorrido, se verificó que elementos como árboles, rocas, caminos, pirámides y ventanas emergentes de teletransportación mantuvieran la uniformidad con el terreno lograda en el modelo desarrollado previamente en Unity.

Interactividad y navegación en Oculus Quest 2. Al igual que en el modelo anterior, se repitieron pruebas específicas para validar el funcionamiento de las ventanas emergentes de teletransportación, los controles de desplazamiento y el cambio entre las cámaras en primera persona y en vista flotante, ahora dentro del entorno de las gafas Oculus.

Pruebas generales con usuarios. Para evaluar el sistema en un contexto más amplio, se aprovechó la exhibición de la aplicación final durante diversas actividades académicas y de divulgación, tales como ferias de oferta educativa, eventos de ciencia para el público general y actividades educativas (véase Tabla 2), realizadas entre los meses de febrero y mayo.

Tabla 2: Oferta educativa

Evento	Fecha	Hombres	Mujeres
Día preuniversitario	15/02/24	275	225
2a Feria educativa de las ciencias	22/02/24	377	273
Expo orienta educativa	26/02/24	825	675
Expo orienta oferta educativa	14/03/24	336	364
Feria educativa de Ciencias	19/03/24	243	207
Expo orienta SUNEO	17/04/24	680	1020
Kon-Ciencia	23/04/24	700	500

La estrategia consistió en invitar aleatoriamente a los asistentes a probar el recorrido virtual de Yucuita, con el fin de observar sus reacciones y obtener retroalimentación sobre la experiencia inmersiva. Estas pruebas resultaron fundamentales por dos razones principales. En primer lugar, permitieron evaluar la aplicación con una amplia variedad de personas de diferentes edades y niveles de familiaridad con la tecnología. En segundo lugar, posibilitaron mejoras significativas en la interfaz del recorrido.

Uno de los hallazgos más relevantes de esta etapa fue el impacto de la edad de los participantes en la forma de interactuar con la aplicación. Se observó que los usuarios más jóvenes se adaptaban más fácilmente al uso de las gafas y la interfaz de RV, requiriendo poca o ninguna explicación sobre el funcionamiento de los controles.

3. Resultados

El resultado final del proyecto es una aplicación empaquetada en formato APK, compatible con las gafas de RV. Para generar este archivo, se compiló el proyecto utilizando las configuraciones previamente descritas. Una vez obtenida la aplicación, fue posible instalarla en el dispositivo. El proceso de instalación de la aplicación en las gafas se documenta en la Figura 17 y, posteriormente, ejecutarla correctamente. La ejecución nativa de la aplicación se muestra en la Figura 18.

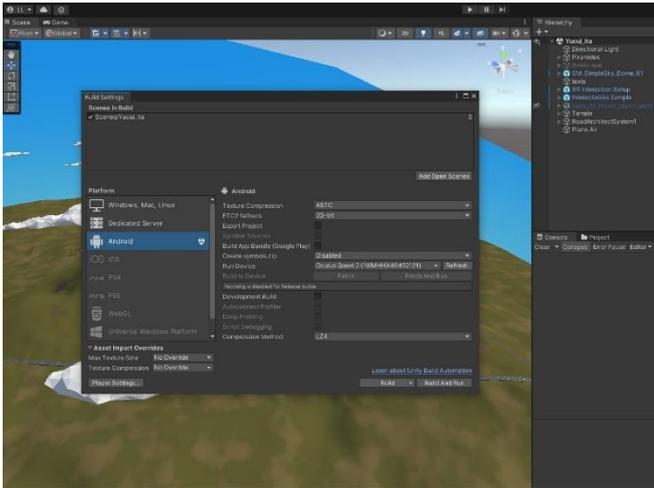


Figura 17: Instalación de la aplicación.

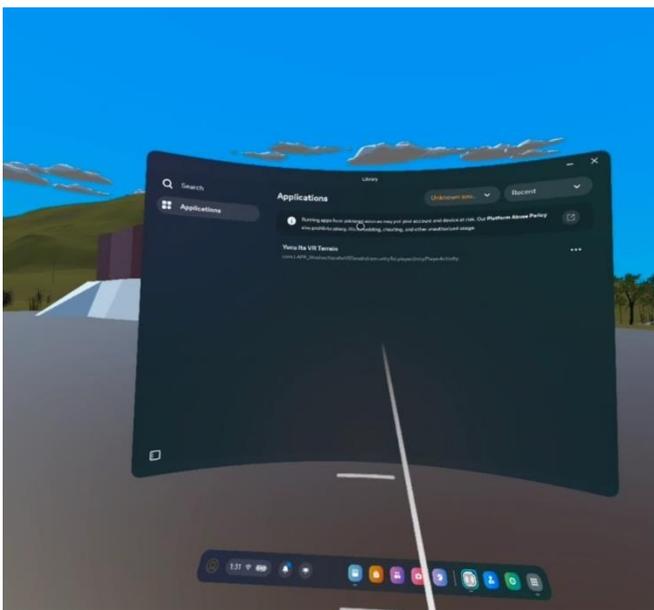


Figura 18: Ejecución de la aplicación.

El usuario puede desplazarse utilizando los controles de las gafas. Los controles de navegación asignados a los joysticks se detallan en la Figura 19. El movimiento fue asignado al joystick izquierdo, mientras que la teletransportación y el control de la cámara se configuraron en el joystick derecho. La configuración detallada se presenta en la Tabla 3.



Figura 19: Joysticks.

Tabla 3: Configuración de controles

Control	Botón	Tarea
Joystick izquierdo	Arriba	Movimiento de avance del jugador
	Abajo	Movimiento de retroceso del jugador
	Izquierda	Movimiento del jugador a la izquierda
	Derecha	Movimiento del jugador a la derecha
	Velocidad	5
	Acción	N/A
Joystick derecho	Arriba	Teletransportación manual del jugador
	Abajo	N/A
	Izquierda	Movimiento de cámara a la izquierda
	Derecha	Movimiento de cámara a la derecha
	Velocidad	60
	Acción	N/A
Gafas	Arriba	Movimiento de cámara arriba
	Abajo	Movimiento de cámara abajo
	Izquierda	Movimiento de cámara a la izquierda
	Derecha	Movimiento de cámara a la derecha
	Velocidad	Manual
	Acción	N/A
Objeto de cambio cámara (elevada)	Arriba	Movimiento de cámara arriba
	Abajo	Movimiento de cámara abajo
	Izquierda	Movimiento de cámara a la izquierda
	Derecha	Movimiento de cámara a la derecha
	Velocidad	Manual
	Acción	Deshabilita control derecho

De acuerdo con los movimientos descritos en la Tabla 3, la rotación manual de la cámara se realiza mediante el joystick del control derecho. En el eje X, el movimiento no está limitado, permitiendo una rotación de 360° en la visión. En cambio, en el eje Y, la rotación es restringida, permitiendo únicamente ciertos desplazamientos verticales mediante el movimiento del joystick.

La cámara principal está vinculada tanto al movimiento de la cabeza del usuario como al joystick derecho. Por otro lado, las cámaras aéreas, ubicadas en puntos específicos de interés, sólo se activan al interactuar con los objetos de cambio de vista. Al hacerlo, se desactiva la cámara principal, se reposiciona la vista del jugador y se inhabilita el control horizontal de cámara mediante el joystick derecho.

La interacción manual (joystick derecho, véase Tabla 3) también permite al usuario utilizar la función de teletransportación, limitada exclusivamente a áreas habilitadas para la interacción. La función de teletransportación manual implementada en el recorrido se representa en la Figura 20.

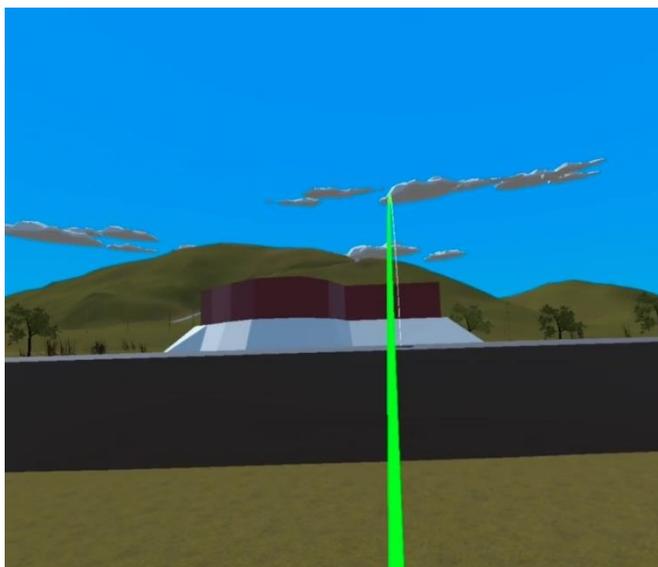


Figura 20: Teletransportación manual.

4. Conclusiones

El uso de la RV para la creación de recorridos inmersivos, como el presentado en este trabajo sobre la zona arqueológica de Yucuita, Oaxaca, demuestra las ventajas de permitir la exploración de sitios remotos o de difícil acceso debido a factores como la distancia, los costos o las limitaciones de tiempo.

Sin embargo, la experiencia del usuario puede verse afectada por la calidad del modelo 3D y la precisión de la representación visual. Una representación atractiva y detallada requiere un alto consumo de recursos computacionales, lo que puede impactar negativamente el rendimiento en entornos de RV, especialmente en dispositivos con capacidades de hardware limitadas. Por ello, la optimización de estos recursos se vuelve un aspecto fundamental en el desarrollo de aplicaciones de este tipo. El objetivo de dicha optimización fue lograr un recorrido fluido sin sacrificar la calidad visual, mejorando así la experiencia del usuario al evitar inconvenientes como tiempos de carga prolongados, baja resolución o interrupciones en la inmersión.

En este trabajo se presenta la implementación final del recorrido virtual de la zona arqueológica de Yucuita, en el cual el usuario se sumerge en un entorno tridimensional enriquecido con información histórica y cultural detallada. Esta solución ofrece una representación visual precisa y atractiva, al mismo tiempo que facilita la interacción con el entorno. Además, se logró optimizar el uso de los recursos computacionales de las gafas Oculus Quest 2, manteniendo la calidad del contenido sin comprometer el rendimiento. Gracias a esta gestión eficiente, se evitaron problemas comunes como retardos, baja resolución o fallas en la continuidad de la experiencia inmersiva.

La implementación exitosa de la aplicación confirma el cumplimiento de los objetivos planteados, permitiendo a los usuarios explorar y experimentar de forma virtual la zona arqueológica.

Durante el proceso de desarrollo se aplicaron diversas estrategias técnicas, como la reducción de polígonos, la

incorporación de una capa de terreno virtual y la representación precisa de relieves y texturas. Todo esto permitió integrar de forma coherente los datos históricos y arqueológicos, asegurando una navegación fluida y una experiencia inmersiva satisfactoria.

Tal como se evidencia en los resultados, la generación detallada de modelos 3D mediante fotogrametría, junto con la adaptación específica a la RV en Oculus Quest 2 mediante el ajuste de texturas, resolución, iluminación y cámaras refleja un compromiso con la calidad visual y la optimización del rendimiento.

La principal aportación de este trabajo consiste en la obtención de un modelo tridimensional optimizado de la zona arqueológica de Yucuita, generado a partir de imágenes captadas por dron mediante técnicas de fotogrametría.

El modelo fue adaptado para su implementación en Unity, donde se programaron tanto los movimientos como las interacciones del usuario. Finalmente, el impacto del modelo optimizado se materializó en la creación de un prototipo funcional en las gafas Oculus Quest 2, integrando sus capacidades para mejorar significativamente la experiencia de usuario y proporcionando altos niveles de inmersión y realismo.

Referencias

- Amador, J., Zúñiga, J., Mejía, C., Morales, A., y Mota, C. (2014). Desarrollo de un entorno virtual tridimensional como herramienta de apoyo a la difusión turística de la zona arqueológica de Teotihuacán. *Acta Universitaria*, 24(4):34–42.
- Bustamante, A., Sedano, L., Díaz, E., Moreno, A., y Gutiérrez, P. (2023). Estudio de factibilidad para el desarrollo de paseos virtuales. caso de aplicación: Valle de Teotihuacán. *Pistas Educativas*, 44(144).
- Cervantes, B., Laureana, S., Hernández, J., Salazar, R., Astudillo, Y., Jiménez, J., y Hernández, M. (2025). Uso de la tecnología de unreal engine para contribuir a salvaguardar la cocina tradicional del estado de Guerrero: una revisión de la literatura: Leveraging unreal engine technology to safeguard the traditional cuisine of Guerrero, México: A literature review. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(2):2348–2367.
- Cousins, P. (2023). Arica y Parinacota: Una experiencia virtual de la cultura chinchorro, patrimonio mundial. Master's thesis, Universidad Viña del Mar, Arica, Chile. Available at <https://hdl.handle.net/20.500.12536/1910>.
- Grijalba, N. (2025). Reseña: Experiencias inmersivas. realidad virtual y realidad aumentada en periodismo, publicidad y artes. *Revista de la Asociación Española de Investigación de la Comunicación*, 12(23): raeic122321.
- Jiménez, L., Posselt, E., y Cortés, E. (2021). La Aplicación de Medios Interactivos para el Fortalecimiento de un Santuario de Origen Precolonial en la Mixteca Alta de Oaxaca, pp. 115–127. Instituto Nacional de Antropología e Historia, 1a. edición.
- Roumana, A., Georgopoulos, A., y Koutsoudis, A. (2022). Developing an educational cultural heritage 3d puzzle in a virtual reality environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2022:885–891.
- Theodoropoulos, A. y Antoniou, A. (2022). Vr games in cultural heritage: A systematic review of the emerging fields of virtual reality and culture games. *Applied Sciences*, 12(17).
- Valladolid, C., Barnet, Y., y Cancho, C. (2022). Registro y reconstrucción virtual, propuesta de un método aplicado al patrimonio arquitectónico de la zona arqueológica monumental puruchuco-huaquerones. *Arqueológicas*, 31(1):323–347.
- Ávila, S., Morales, A., Vergelin, J., y Sánchez, R. (2022). Enseñanza-aprendizaje del arte a través de recorridos virtuales 3d en el contexto de la ciudad de Quito en el año 2021. *RHS-Revista Humanismo y Sociedad*, 10:1–16