
Diseñar e implementar una experiencia y una interfaz de usuario intuitiva y funcional para una aplicación de recorrido con realidad aumentada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú, con la finalidad de fomentar la interacción, el interés histórico y cultural así como la accesibilidad del patrimonio arqueológico

Josué Isaac Morales González



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseñar e implementar una experiencia y una interfaz de usuario intuitiva y funcional para una aplicación de recorrido con realidad aumentada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú, con la finalidad de fomentar la interacción, el interés histórico y cultural así como la accesibilidad del patrimonio arqueológico

Trabajo de graduación presentado por Josué Isaac Morales González
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencias
de la Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseñar e implementar una experiencia y una interfaz de usuario intuitiva y funcional para una aplicación de recorrido con realidad aumentada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú, con la finalidad de fomentar la interacción, el interés histórico y cultural así como la accesibilidad del patrimonio arqueológico

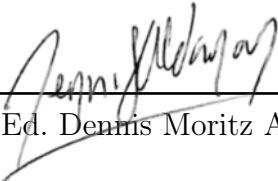
Trabajo de graduación presentado por Josué Isaac Morales González
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencias
de la Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Dulce María Chacón Muñoz

(f) 
M. Ed. Dennis Moritz Aldana Moscoso

Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de noviembre de 2025.

Este trabajo representa la culminación de un esfuerzo colectivo e individual que no habría sido posible sin el apoyo y la dedicación de personas excepcionales que me acompañaron en este camino.

Agradezco profundamente a mis compañeros de equipo, quienes con su compromiso y talento hicieron posible que este proyecto cobrara vida. A Carlos López, por su trabajo en la integración de modelos en la aplicación, esencial para dar vida a las reconstrucciones digitales. A Brian Carrillo, cuyo trabajo en la implementación del sistema de geolocalización fue fundamental para anclar la experiencia digital al espacio físico del parque. A Marco Ramírez, quien dedicó incontables horas al modelado tridimensional de las estructuras arqueológicas, logrando reconstrucciones que honran el patrimonio cultural guatemalteco. A Luz Coronado, cuya visión estratégica en la gestión y el análisis de recursos aseguró la viabilidad del proyecto. A Claudia Velásquez, cuya investigación arqueológica aportó el rigor histórico necesario para que el contenido fuera fiel a la realidad de Kaminaljuyú. Trabajar junto a ustedes fue un privilegio y una experiencia de aprendizaje invaluable.

A mi asesor de tesis, M. Ed. Dennis Moritz Aldana Moscoso, por su guía constante, su paciencia y sus valiosas retroalimentaciones que enriquecieron cada etapa de esta investigación. Sus enseñanzas trascendieron lo académico y me formaron como profesional.

A la Mgtr. Inga. Dulce Chacón, por acompañarnos durante este proceso con su experiencia, su apertura al diálogo y su compromiso con la excelencia académica. Su presencia fue un pilar fundamental en el desarrollo de este trabajo.

A mi padre, Raúl Morales, por haberme permitido llegar hasta este momento. Tu esfuerzo y sacrificio son la base sobre la que construí este logro. A mi madre, Amelia González, por haber sido un apoyo incondicional durante toda mi vida, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por enseñarme el valor de la perseverancia. A mis hermanos, David Morales y Helen Morales, por ser ejemplos a seguir, grandes compañeros de vida y una fuente constante de motivación. Los admiro profundamente.

Finalmente, agradezco al Parque Arqueológico Kaminaljuyú por ser la inspiración de este proyecto. Espero que esta aplicación contribuya, aunque sea modestamente, a preservar

y difundir el invaluable patrimonio cultural que Guatemala resguarda.

Prefacio	VI
Lista de figuras	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Justificación	6
4. Objetivos	8
4.1. Objetivo general	8
4.2. Objetivos específicos	8
5. Alcance	9
5.1. Alcance del proyecto	9
5.2. Limitaciones	10
5.3. Supuestos	11
5.4. Restricciones	12
6. Marco teórico	15
6.1. Conceptos fundamentales	15
6.1.1. Realidad Aumentada	15
6.1.2. Interfaz de Usuario (UI)	16
6.1.3. Experiencia de Usuario (UX)	16
6.1.4. Diseño Centrado en el Usuario (DCU)	17
6.2. Realidad aumentada como herramienta para la mediación del patrimonio cul- tural	17
6.3. Principios de Experiencia de Usuario (UX) y Diseño de Interfaz de Usuario (UI)	18

6.4. Contexto espacial y diseño interactivo	18
7. Metodología	20
7.1. Investigación de usuarios	20
7.2. Definición de requerimientos	21
7.3. Diseño de prototipos	21
7.4. Implementación técnica	21
7.5. Pruebas de usabilidad	21
7.6. Elaboración del trabajo de graduación	22
8. Resultados	23
8.1. Prototipos desarrollados	23
8.1.1. Prototipos de alta fidelidad	23
8.2. Aplicación implementada	23
8.2.1. Pantalla principal e inicio	23
8.2.2. Instrucciones y términos de uso	25
8.2.3. Modo de recorrido	25
8.2.4. Integración de realidad aumentada	25
8.2.5. Puntos de interés adicionales	25
8.2.6. Navegación y finalización de recorrido	32
8.3. Funcionalidades implementadas	32
8.4. Resultados de pruebas de usabilidad	33
8.4.1. Hallazgos principales	34
8.5. Validación de objetivos	35
8.6. Guía de implementación y mejores prácticas	35
8.6.1. Proceso de diseño y desarrollo	35
8.6.2. Prácticas exitosas de UX/UI	36
8.6.3. Recomendaciones para implementaciones futuras	36
9. Discusión de resultados	38
9.1. Interpretación de los hallazgos	38
9.2. Implicaciones de los resultados	40
9.3. Contribuciones del trabajo	41
9.4. Limitaciones identificadas	42
10. Conclusiones	43
11. Recomendaciones	45
12. Bibliografía	47
13. Anexos	50
13.1. Anexo A: fotografías de las pruebas de usabilidad	50
13.2. Anexo B: cronograma del proyecto	52
13.3. Anexo C: repositorio del código fuente	53

Lista de figuras

1.	Prototipos de alta fidelidad desarrollados para la aplicación (parte 1)	24
2.	Prototipos de alta fidelidad desarrollados para la aplicación (parte 2)	25
3.	Pantalla principal de la aplicación	26
4.	Pantallas de instrucciones y términos de uso de la aplicación	27
5.	Pantallas del modo de recorrido Tour guiado	28
6.	Visualizaciones AR y pantallas de información de montículos (parte 1)	29
7.	Visualizaciones AR y pantallas de información de montículos (parte 2)	30
8.	Pantallas de información adicionales de montículos	30
9.	Puntos de interés de referencia para orientación	31
10.	Información contextual y navegación del recorrido	32
11.	Evaluación de expectativas desde la pantalla principal (NPS: 17)	33
12.	Facilidad para navegar entre secciones (NPS: 47)	33
13.	Facilidad de completar tareas específicas del recorrido	34
14.	Sesión de prueba de usabilidad 1	50
15.	Sesiones adicionales de pruebas de usabilidad realizadas con participantes en instalaciones universitarias	51
16.	Cronograma de actividades del proyecto de desarrollo de la aplicación de realidad aumentada para Kaminaljuyú	52

Durante la realización de este proyecto se diseñó e implementó una aplicación móvil de recorrido con Realidad Aumentada (RA) orientada al Parque Arqueológico Kaminaljuyú, con el objetivo de mejorar la experiencia del visitante a través de una interfaz intuitiva, accesible y visualmente atractiva. Frente a la falta de señalización contextualizada y la escasa conexión emocional con el sitio, se planteó una solución tecnológica basada en principios de diseño centrado en el usuario (UX) y diseño de interfaz (UI), que permitió enriquecer la interpretación del patrimonio arqueológico.

La aplicación desarrollada para Android integra ARCore Geospatial API para el posicionamiento preciso de modelos tridimensionales de estructuras arqueológicas sobre el entorno real. El sistema implementa un recorrido guiado por 11 puntos de interés con navegación mediante indicadores direccionales, fichas informativas contextuales, e un sistema de proximidad que orienta al usuario dinámicamente. A través de la integración de elementos digitales superpuestos sobre el entorno físico, la aplicación facilitó la comprensión histórica de los montículos y estructuras del parque, al tiempo que promovió la interacción activa del visitante.

La metodología empleada contempló fases de investigación con usuarios reales, definición de requerimientos, prototipado iterativo, desarrollo técnico y pruebas de usabilidad con 17 participantes, todo ello enfocado en garantizar una experiencia fluida, inclusiva y culturalmente significativa. Los resultados de usabilidad demostraron alta efectividad, con promedios entre 4.27 y 4.77 en escalas Likert (1-5) para facilidad de uso, tasas de completitud de tareas del 100 % en funciones críticas, y evaluación positiva del valor educativo (4.18/5.0). Se identificaron áreas de mejora específicas en el mapa en miniatura (64.7 % utilidad) y claridad geométrica de modelos 3D (35.3 % evaluación positiva).

Este enfoque logró fortalecer la conexión del usuario con el pasado precolombino y estableció un modelo replicable para la aplicación de tecnologías emergentes en contextos patrimoniales desde la perspectiva del diseño UX/UI.

During the development of this project, a mobile augmented reality (AR) tour application was designed and implemented for the Kaminaljuyú Archaeological Park, aiming to enhance the visitor experience through an intuitive, accessible, and visually appealing interface. In response to the lack of contextual signage and limited emotional connection to the site, a technological solution was developed based on user-centered design (UX) and user interface (UI) principles to enrich the interpretation of the archaeological heritage.

The Android application integrates ARCore Geospatial API for precise positioning of three-dimensional models of archaeological structures over the real environment. The system implements a guided tour through 11 points of interest with navigation via directional indicators, contextual information cards, and a proximity system that dynamically guides the user. By integrating digital elements over the physical environment, the application facilitated historical understanding of the park's mounds and structures, while promoting active visitor engagement.

The methodology involved user research, requirements definition, iterative prototyping, technical development, and usability testing with 17 participants –all focused on delivering a seamless, inclusive, and culturally meaningful experience. Usability results demonstrated high effectiveness, with averages between 4.27 and 4.77 on Likert scales (1-5) for ease of use, 100 % task completion rates for critical functions, and positive evaluation of educational value (4.18/5.0). Specific areas for improvement were identified in the minimap (64.7 % usefulness) and geometric clarity of 3D models (35.3 % positive evaluation).

This approach successfully strengthened the connection between users and the pre-Columbian past and established a replicable model for applying emerging technologies in heritage contexts from a UX/UI design perspective.

El Parque Arqueológico Kaminaljuyú, ubicado en el corazón de la Ciudad de Guatemala, constituye uno de los sitios más representativos de la civilización maya del período preclásico. A pesar de su valor histórico, arqueológico y cultural, el parque enfrentaba desafíos importantes en cuanto a su interpretación y difusión al público general. La escasa señalización, la falta de contextualización accesible para diversos perfiles de visitantes y la ausencia de herramientas didácticas modernas provocaban una experiencia que resultaba fragmentada y limitada, especialmente para quienes no poseían conocimientos previos sobre la cultura maya.

En este contexto, se identificó que el diseño de experiencias centradas en el usuario (UX) y de interfaces de usuario (UI) que fueran intuitivas, visualmente atractivas y funcionales adquiriría un rol esencial para transformar la forma en que se interactúa con el patrimonio arqueológico. La incorporación de tecnologías emergentes, como la Realidad Aumentada (RA), abrió nuevas posibilidades para crear entornos inmersivos que facilitaran la comprensión del entorno físico y su valor histórico. A través de elementos visuales superpuestos al mundo real, la RA permitió reconstruir virtualmente estructuras, narrar historias y ofrecer datos clave en tiempo real, enriqueciendo la exploración del parque de manera significativa.

Este proyecto desarrolló una aplicación de recorrido con tecnología de Realidad Aumentada, diseñada específicamente para Kaminaljuyú, con el objetivo de mejorar la experiencia de los visitantes. El enfoque combinó principios de diseño centrado en el usuario, accesibilidad y usabilidad, buscando fomentar la interacción activa, el interés por el pasado precolombino y el aprecio por el patrimonio cultural del país. Además de facilitar una navegación más informada y atractiva por el parque, la solución logró democratizar el acceso al conocimiento arqueológico, brindando a los usuarios una experiencia educativa y memorable, alineada con las necesidades de los públicos contemporáneos.

La integración de tecnologías inmersivas en la preservación y difusión del patrimonio cultural ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, particularmente con el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada dirigidas a sitios arqueológicos y museos. Sin embargo, el éxito de estas implementaciones no depende únicamente de la sofisticación tecnológica, sino de manera fundamental del diseño de experiencias de usuario intuitivas, accesibles y culturalmente pertinentes.

En este contexto, el estudio de interfaces tangibles para aplicaciones de realidad virtual en contextos de patrimonio cultural ha demostrado su relevancia para mejorar la experiencia educativa y la inmersión del usuario. Una investigación publicada en el *Journal on Computing and Cultural Heritage* examinó el impacto de interfaces de usuario tangibles en aplicaciones de VR para patrimonio cultural, evaluando específicamente la usabilidad del sistema, la experiencia de usuario y el nivel de inmersión alcanzado [1]. Los resultados confirmaron que las interfaces tangibles mejoran significativamente la experiencia del usuario y aumentan el disfrute del aprendizaje sobre patrimonio cultural, lo que sugiere que la interacción física puede complementar exitosamente las experiencias inmersivas digitales. Esta investigación proporcionó lineamientos para el diseño de interfaces que equilibran innovación tecnológica con facilidad de uso, un principio fundamental para cualquier aplicación orientada al público general.

Complementando estos hallazgos, el diseño centrado en el usuario ha emergido como un enfoque esencial para garantizar el éxito de aplicaciones de realidad aumentada, particularmente en contextos culturales donde la diversidad de perfiles de visitantes exige interfaces adaptables y accesibles. El estándar internacional ISO 9241-210 define el diseño centrado en el humano como un enfoque que involucra a los usuarios a lo largo del proceso de desarrollo, involucrando investigación de usuarios, caracterización de problemas, ideación, prototipado y pruebas iterativas [2]. En el contexto de aplicaciones móviles para patrimonio cultural, los factores humanos resultan fundamentales para la efectividad narrativa, ya que las aplicaciones deben evitar distraer la atención del usuario del contenido para fomentar una buena concentración e inmersión [3]. Ramtohul y Khedo (2023) enfatizan que los propietarios de

patrimonio cultural deben repensar y desarrollar enfoques centrados en el visitante para crear experiencias de usuario más atractivas, reconociendo que, a pesar del uso generalizado de RA en patrimonio cultural, no existen suficientes estudios sobre la experiencia de usuario, los resultados de aprendizaje y la forma en que los usuarios observan e interactúan con el contenido virtual.

Esta necesidad de profundizar en el diseño de interacciones se ve reflejada en una revisión sistemática de 64 publicaciones entre 2016 y 2023 que identificó y analizó patrones de diseño de interacción UX para aplicaciones de RA móvil en patrimonio cultural, estableciendo las bases para la reflexión sobre enfoques actuales entre diseñadores UX y profesionales del patrimonio cultural [4]. Este estudio reveló que, si bien la mayor parte de la literatura se centra en aspectos tecnológicos, ha habido poca exploración de las capacidades expresivas de la RA para interacciones significativas. Los patrones identificados sugieren que el diseño de interacciones debe considerar no solo la funcionalidad técnica, sino también la capacidad de la tecnología para transmitir narrativas culturales de manera efectiva y emocionalmente resonante. Estas guías de diseño se organizan en categorías que incluyen diseño ambiental, diseño de interacción y señales visuales, proporcionando un marco metodológico para evaluar desafíos y oportunidades en el diseño de experiencias AR para patrimonio.

La evaluación de la usabilidad, la experiencia de usuario y la carga mental de trabajo en aplicaciones de RA móvil para narrativa digital en patrimonio cultural ha demostrado ser fundamental para comprender cómo los usuarios procesan información en entornos aumentados. Un estudio específico sobre estos aspectos concluyó que las aplicaciones de RA generan una experiencia de usuario positiva y una evidente ganancia de aprendizaje, siendo consideradas fáciles de usar, lo que resalta su potencial para ser ampliamente adoptadas en edificios con valor arquitectónico [5]. Esta investigación enfatizó que la RA mejora la experiencia del usuario y aumenta el disfrute del aprendizaje sobre patrimonio cultural, confirmando que la tecnología puede crear las conexiones faltantes en entornos patrimoniales estáticos. Sin embargo, el estudio también advirtió sobre la importancia de mantener una carga cognitiva manejable para evitar la saturación del usuario, especialmente en contextos donde se presenta información histórica compleja.

En términos de implementaciones prácticas, el proyecto HeritageSite AR, publicado en el *Journal on Computing and Cultural Heritage*, representa un caso de estudio significativo en el diseño y evaluación de juegos de exploración con realidad aumentada móvil para sitios patrimoniales chinos [6]. El desarrollo de esta aplicación involucró entrevistas semiestructuradas con expertos del dominio y la administración de encuestas para identificar requisitos de usuarios y objetivos de diseño. Los resultados demostraron que los juegos de exploración AR móvil pueden mejorar la narrativa inmersiva y enriquecer las experiencias culturales, proporcionando un modelo de desarrollo participativo que integra las perspectivas de expertos en patrimonio con las necesidades de los usuarios finales. Este enfoque metodológico destaca la importancia de la investigación formativa y la evaluación iterativa en el diseño de experiencias AR culturales efectivas.

Profundizando en los marcos conceptuales, una investigación publicada en marzo de 2024 construyó modelos detallados de experiencia de usuario utilizando codificación teórica y propuso estrategias de diseño específicas para exposiciones de patrimonio cultural basadas en realidad virtual [7]. Este estudio reconoció que el diseño de experiencia de usuario ha encontrado nuevas oportunidades debido a las diferencias en la interacción humano-computadora

entre interfaces VR y convencionales. Las estrategias de diseño propuestas abordan aspectos como la navegación intuitiva, la accesibilidad cognitiva, la inmersión sensorial y la coherencia narrativa, elementos que resultan igualmente aplicables al diseño de experiencias AR. El modelo de UX desarrollado ofrece un marco conceptual para evaluar y optimizar la experiencia del usuario en entornos inmersivos patrimoniales, enfatizando la necesidad de equilibrar innovación tecnológica con facilidad de uso.

En el contexto guatemalteco, el proyecto KAN ha representado un avance significativo en la aplicación de tecnologías inmersivas al patrimonio arqueológico. Esta iniciativa surgió como una propuesta interdisciplinaria entre el sector privado, instituciones culturales y arqueólogos del país, con el objetivo de ofrecer una experiencia histórica enriquecida a los visitantes del Parque Arqueológico Kaminaljuyú [8]. La aplicación móvil desarrollada permite superponer reconstrucciones 3D de estructuras mayas sobre las ruinas actuales mediante tecnologías de realidad aumentada, como ARKit y ARCore, junto con modelado en Blender. El proyecto ha sido reconocido por su valor cultural y educativo, recibiendo el primer lugar en la Creative Business Cup Guatemala 2021. Su éxito como piloto abre la posibilidad de implementación en otros parques arqueológicos del país, promoviendo el uso de RA como herramienta para el turismo y la educación patrimonial. Sin embargo, si bien el proyecto KAN demostró la viabilidad técnica de la RA en Kaminaljuyú, no se enfocó específicamente en el diseño de experiencia de usuario ni en la evaluación sistemática de usabilidad y accesibilidad, aspectos que resultan fundamentales para garantizar una adopción amplia y efectiva de la tecnología.

La tendencia hacia implementaciones más sofisticadas de RA se evidencia en casos recientes a nivel internacional. Durante 2024, diversos museos han implementado experiencias de realidad aumentada que ilustran diferentes enfoques de diseño de interfaz y experiencia de usuario. El Museo de Historia Natural de Londres lanzó en octubre de 2024 "Visions of Nature", una experiencia inmersiva de realidad mixta que transporta a los visitantes al año 2125 para ilustrar el impacto de las acciones humanas en el planeta [9]. Por su parte, el museo de Young en San Francisco integró en enero de 2024 una instalación interactiva de prueba virtual en colaboración con Snap Inc., permitiendo a los visitantes vestirse virtualmente con conjuntos de alta costura de diseñadores como Yves Saint Laurent y Valentino. Estos casos demuestran que las implementaciones exitosas de AR en museos requieren no solo tecnología robusta, sino también interfaces intuitivas que permitan a usuarios diversos interactuar con el contenido digital sin necesidad de conocimientos técnicos previos. El diseño de estas experiencias priorizó la accesibilidad, la navegación clara y la integración fluida entre el mundo físico y el contenido digital, principios que resultan transferibles al diseño de aplicaciones AR para sitios arqueológicos al aire libre.

Los antecedentes revisados revelan que, si bien la tecnología de realidad aumentada ha sido aplicada exitosamente en diversos contextos de patrimonio cultural, persiste una brecha significativa en el diseño sistemático de experiencias de usuario para aplicaciones AR en sitios arqueológicos latinoamericanos, particularmente en el contexto maya guatemalteco. Aunque el proyecto KAN estableció un precedente valioso en Kaminaljuyú, la ausencia de un enfoque metodológico centrado en el diseño de UX/UI representa una oportunidad para desarrollar una aplicación que no solo sea técnicamente funcional, sino que también ofrezca una experiencia coherente, intuitiva y culturalmente significativa. La literatura revisada subraya la importancia de aplicar principios de diseño centrado en el usuario, realizar evalua-

ciones iterativas de usabilidad y desarrollar interfaces que equilibren innovación tecnológica con accesibilidad, aspectos que constituyen el núcleo del presente trabajo de graduación.

La preservación y divulgación del patrimonio arqueológico requerían de enfoques innovadores que lograran conectar con las audiencias contemporáneas. En el caso del Parque Arqueológico Kaminaljuyú, uno de los sitios más relevantes de la civilización maya preclásica, persistía una brecha entre el valor histórico del lugar y la manera en que dicho valor era percibido y comprendido por el visitante promedio. Esta desconexión se debía, en gran parte, a la falta de herramientas interpretativas accesibles, visuales y dinámicas que facilitaran la apropiación del conocimiento cultural. Como señalaron [10], la ausencia de recursos virtuales integrados con los elementos reales generaba una significativa brecha interpretativa.

La Realidad Aumentada (RA) había emergido como una tecnología capaz de transformar la interacción entre los usuarios y su entorno físico, integrando contenidos virtuales que enriquecían la experiencia educativa, cultural y turística. Su aplicación en espacios patrimoniales no solo permitía visualizar estructuras antiguas o reconstrucciones históricas, sino que también favorecía la preservación digital del legado cultural y su difusión entre públicos más jóvenes y tecnológicamente familiarizados [11].

En este contexto, el presente proyecto propuso el diseño e implementación de una aplicación de recorrido con RA que respondiera a principios de diseño centrado en el usuario. La iniciativa no se limitó a incorporar tecnología de forma superficial, sino que priorizó la creación de una experiencia coherente y funcional a través de una interfaz de usuario (UI) intuitiva y estética, pensada para facilitar la navegación, el acceso al contenido y la conexión emocional con el sitio arqueológico. Al mismo tiempo, el sistema debía proporcionar a los visitantes del museo o espacio patrimonial una interfaz intuitiva de manera que los usuarios pudieran interactuar con los contenidos digitales de manera fácil y natural, así como lo harían con objetos en el mundo real [12].

Asimismo, el enfoque metodológico del proyecto contempló la iteración constante mediante pruebas de usabilidad con usuarios reales, lo cual permitió validar y mejorar las decisiones de diseño basadas en datos empíricos. Como recomendaron [13], complementar las evaluaciones heurísticas con tests de usuario y refinar el sistema según la retroalimentación obtenida aseguró que la solución final no solo fuera técnicamente viable, sino también

relevante, inclusiva y culturalmente pertinente. De esta manera, se contribuyó tanto al fortalecimiento de la experiencia museográfica del parque como al desarrollo de nuevas formas de acceso al patrimonio mediante tecnología accesible, pedagógica y atractiva.

4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una experiencia y una interfaz de usuario intuitiva y funcional para una aplicación de recorrido con realidad aumentada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú, con la finalidad de fomentar la interacción, el interés histórico y cultural así como la accesibilidad del patrimonio arqueológico.

4.2. Objetivos específicos

- Analizar las características y necesidades de los visitantes del parque para establecer los requerimientos de diseño e implementación basados en sus perfiles y expectativas.
- Investigar y aplicar mejores prácticas de UX/UI para tecnologías de realidad aumentada, en la construcción de prototipos y en la posterior implementación de la aplicación.
- Probar y validar la usabilidad en las etapas de desarrollo de prototipos así como luego de la implementación técnica a través de pruebas con usuarios reales, recopilando datos que permitan iterar y perfeccionar la experiencia de uso.
- Desarrollar una guía de implementación y recomendaciones de mejora que, además de responder a las necesidades tecnológicas, promuevan la preservación y divulgación cultural de Kaminaljuyú.

5.1. Alcance del proyecto

El presente proyecto abarcó el diseño, desarrollo e implementación de una aplicación móvil de recorrido con Realidad Aumentada (RA) para el Parque Arqueológico Kaminaljuyú, con énfasis en la experiencia de usuario (UX) y la interfaz de usuario (UI). El alcance incluyó específicamente:

- **Investigación y análisis de usuarios:** estudio de necesidades, comportamientos y expectativas de visitantes potenciales del parque mediante observaciones de campo y entrevistas semiestructuradas con diversos perfiles de usuarios.
- **Diseño iterativo de prototipos:** desarrollo de prototipos de baja y alta fidelidad utilizando herramientas de diseño digital, con múltiples iteraciones basadas en retroalimentación de usuarios, incluyendo wireframes, flujos de navegación y especificaciones visuales completas.
- **Implementación técnica para Android:** desarrollo de aplicación móvil nativa para Android utilizando Kotlin y la API Geoespacial de ARCore para el posicionamiento de modelos 3D de estructuras arqueológicas en ubicaciones georreferenciadas del parque. La aplicación incluye 11 puntos de interés (POIs) con información histórica detallada.
- **Sistema de recorrido guiado:** implementación del modo “Tour Guiado” que ofrece un recorrido secuencial estructurado con navegación paso a paso, asistido mediante indicadores direccionales e información sobre el sistema de proximidad (estados: visible/cerca/muy cerca).
- **Funcionalidades de navegación espacial:** sistema de flechas direccionales en 3D para guiar al usuario hacia los montículos, integración de mapa interactivo con Google Maps mostrando posición del usuario en tiempo real, y cálculo dinámico de distancias y orientación hacia puntos de interés.

- **Interacción con modelos 3D en AR:** implementación de gestos táctiles para manipulación de modelos tridimensionales, incluyendo zoom mediante pinch, rotación mediante swipe, y visualización de reconstrucciones volumétricas de estructuras arqueológicas superpuestas al entorno real. Los modelos incluyen múltiples partes (techos, paredes, bases) para representar complejidad arquitectónica.
- **Sistema de información contextual:** diálogos informativos con contenido arqueológico, histórico y cultural de cada montículo, organizados en secciones (descripción general, historia, hallazgos arqueológicos, función original), con galerías de imágenes de referencia ampliables a pantalla completa.
- **Diseño de sistema visual:** desarrollo de paleta de colores inspirada en tonos arqueológicos (terracota, verde, oro, crema), tipografía clara y legible, iconografía contextual, y sistema de tarjetas consistente para diferentes tipos de contenido.
- **Pruebas de usabilidad empíricas:** evaluación con 17 usuarios reales mediante tareas predefinidas, cuestionarios con escala Likert (1-5), y preguntas de satisfacción para validar criterios de facilidad de uso, claridad de interfaz, eficiencia en tareas clave, calidad de interacción con modelos 3D y valor educativo del contenido.
- **Análisis de resultados UX/UI:** evaluación cuantitativa de métricas de usabilidad, identificación de fortalezas y áreas de mejora, comparación con objetivos establecidos, y documentación de lecciones aprendidas en el proceso iterativo de diseño.
- **Documentación técnica y de diseño:** elaboración de guía de implementación con mejores prácticas de UX/UI aplicadas al contexto de patrimonio cultural con tecnologías de RA, incluyendo recomendaciones específicas, decisiones de diseño justificadas, y estrategias de escalabilidad para aplicación en otros sitios arqueológicos.

5.2. Limitaciones

El proyecto **no incluyó** los siguientes aspectos, debido a restricciones de tiempo, recursos técnicos, alcance académico o consideraciones de viabilidad:

- **Desarrollo multiplataforma:** la aplicación se implementó exclusivamente para dispositivos Android compatibles con ARCore (versión mínima Android 7.0). No se contempló desarrollo para iOS (iPhone/iPad) ni para otras plataformas móviles, lo cual limita el alcance de la audiencia potencial.
- **Contenido multimedia avanzado:** no se incluyeron elementos como narración de audio guiado, videos de reconstrucción histórica, animaciones de personajes mayas en 3D, o recreaciones sonoras ambientales, debido a limitaciones de recursos de producción audiovisual y consideraciones de tamaño de la aplicación.
- **Modelado 3D arqueológico exhaustivo:** se trabajó con modelos tridimensionales de complejidad moderada basados en referencias bibliográficas. No se realizó levantamiento fotogramétrico completo del sitio, escaneo LiDAR, ni modelado científico de estructuras internas o subestructuras arqueológicas enterradas.

- **Sistema de gamificación:** no se implementaron mecánicas de juego como logros desbloqueables, puntajes, retos educativos, sistemas de recompensas, o elementos competitivos, aunque se reconoce su potencial para aumentar el engagement de visitantes más jóvenes y la retención de información.
- **Pruebas *in situ* extensivas en el parque:** las pruebas de usabilidad se realizaron en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala por razones de practicidad logística, seguridad y control de variables. No se realizaron pruebas prolongadas directamente en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú, lo cual pudo limitar la validación de aspectos contextuales como conectividad variable, iluminación solar cambiante, condiciones climáticas adversas, o recorridos de larga duración (más de 60 minutos).
- **Backend y funcionalidades en línea:** la aplicación funciona de manera local sin requerir conectividad a internet durante el recorrido. No se implementó servidor backend para análisis de métricas de uso en tiempo real, sincronización de contenido actualizado, sistema de comentarios o reseñas de usuarios, ni actualización remota de información arqueológica.
- **Accesibilidad avanzada para discapacidades:** si bien se contemplaron principios generales de usabilidad, no se implementaron características especializadas para usuarios con discapacidades visuales severas (integración con TalkBack, descripciones de audio automáticas de escenas AR), auditivas (subtítulos automáticos, señales visuales para alertas sonoras), o motoras (control por voz, modos de interacción simplificados, botones de mayor tamaño).
- **Validación arqueológica formal:** la precisión histórica y credibilidad arqueológica de los modelos 3D y del contenido textual se basó en fuentes bibliográficas existentes y consultas informales. No se llevó a cabo un proceso formal de validación con arqueólogos especializados en Kaminaljuyú, revisión por comité académico de historia maya, ni certificación institucional del contenido.
- **Internacionalización completa:** el contenido de la aplicación se desarrolló únicamente en idioma español. No se implementó soporte multiidioma (inglés, idiomas mayas como K'iche'), sistema de cambio de idioma, ni traducción profesional de contenido arqueológico, lo cual limita la accesibilidad para turistas internacionales y comunidades indígenas locales.
- **Análisis de impacto educativo a largo plazo:** no se realizó seguimiento longitudinal del impacto educativo de la aplicación en la comprensión histórica de los usuarios, retención de información a mediano plazo, cambio de actitudes hacia el patrimonio cultural, ni medición de visitas repetidas al parque motivadas por la aplicación.

5.3. Supuestos

El desarrollo del proyecto se basó en los siguientes supuestos fundamentales:

- Los usuarios objetivo poseen dispositivos móviles Android (versión 7.0 o superior) con capacidades de procesamiento gráfico adecuadas para renderizado de modelos 3D en

tiempo real, sensores de cámara funcionales, GPS con precisión mínima de 5 metros, y suficiente espacio de almacenamiento (mínimo 200 MB libres).

- Los visitantes del parque cuentan con conocimientos básicos de uso de aplicaciones móviles, incluyendo instalación desde tienda de aplicaciones, navegación mediante gestos táctiles estándar (tap, swipe, pinch), y comprensión de solicitudes de permisos de sistema (cámara, ubicación).
- El Parque Arqueológico Kaminaljuyú permite el uso libre de dispositivos móviles durante las visitas, no existen restricciones institucionales para la captura de imágenes o video, el uso de tecnologías de realidad aumentada en el sitio es permitido, y la administración del parque apoya iniciativas educativas digitales.
- Los modelos 3D de estructuras arqueológicas disponibles o desarrollados representan con fidelidad razonable las características volumétricas, proporciones espaciales y contexto histórico de los montículos, basándose en investigaciones arqueológicas previas, aunque no constituyan reconstrucciones científicas definitivas ni cuenten con validación formal de especialistas.
- Las coordenadas geográficas de los montículos arqueológicos utilizadas para el posicionamiento AR son suficientemente precisas (margen de error menor a 5 metros) para proporcionar una experiencia de usuario satisfactoria, permitiendo que los modelos 3D aparezcan en ubicaciones visualmente coherentes con las estructuras reales del parque.
- Existe interés y disposición genuina de los visitantes potenciales para participar voluntariamente en procesos de investigación de usuarios (entrevistas, observaciones de campo) y en pruebas de usabilidad, proporcionando retroalimentación honesta, constructiva y representativa de la población objetivo.
- Las condiciones ambientales típicas del parque (iluminación natural diurna entre 10:00-16:00 horas, ausencia de obstrucciones importantes en línea de visión, terreno relativamente plano) permiten el funcionamiento adecuado de las capacidades de seguimiento espacial, detección de planos y anclaje geoespacial de ARCore.
- El contenido histórico, arqueológico y fotográfico integrado en la aplicación es accesible mediante fuentes públicas (libros, artículos académicos, repositorios institucionales), bibliografía académica de dominio público o con permisos educativos, o mediante colaboración con instituciones culturales, sin restricciones de derechos de autor que impidan su uso educativo no comercial.
- Los usuarios tienen expectativas realistas sobre las capacidades de la tecnología de realidad aumentada móvil, comprenden que es una representación digital educativa (no una reconstrucción arqueológica certificada), y aceptan limitaciones técnicas como precisión GPS variable, consumo de batería elevado, y necesidad de buena iluminación.

5.4. Restricciones

El proyecto operó bajo las siguientes restricciones técnicas, temporales, contextuales y de recursos:

- **Restricción tecnológica de plataforma:** la API Geoespacial de ARCore requiere dispositivos Android con soporte específico de hardware y software, excluyendo dispositivos de gama baja (menos de 2 GB RAM), modelos anteriores a 2017, y toda la base de usuarios iOS (aproximadamente 30 % del mercado guatemalteco), reduciendo significativamente la accesibilidad universal de la solución.
- **Restricción de conectividad:** aunque la aplicación funciona offline durante el recorrido, la instalación inicial, descarga de modelos 3D (aproximadamente 150 MB), y potenciales actualizaciones requieren acceso a Google Play Store y conexión WiFi o datos móviles, lo cual representa una barrera para usuarios con planes de datos limitados o sin acceso regular a internet.
- **Restricción de acceso al sitio arqueológico:** las condiciones de acceso al Parque Arqueológico Kaminaljuyú (horarios de apertura 7:00-16:00, procedimientos de autorización para investigación, consideraciones de seguridad en zona urbana, disponibilidad de personal del parque) limitaron la frecuencia, duración y flexibilidad de visitas para observaciones de campo prolongadas, fotografía de referencia exhaustiva, pruebas in situ con usuarios, o validación contextual de funcionalidades AR. Adicionalmente, no fue posible realizar grabaciones aéreas con dron debido a que el permiso requerido tenía un costo de Q7,000.00 que excedía el presupuesto disponible.
- **Restricción presupuestaria:** el proyecto se desarrolló sin financiamiento externo institucional, utilizando exclusivamente recursos propios del investigador (hardware personal, licencias de software educativas gratuitas, viáticos de transporte), lo cual limitó severamente la adquisición de herramientas profesionales de pago (software de modelado 3D avanzado, servicios de hosting, plataformas de testing), contratación de servicios especializados (traducción profesional, narración de audio, validación arqueológica), o realización de campañas extensivas de pruebas de usuario con incentivos para participantes.
- **Restricción de conocimientos especializados:** el investigador-desarrollador no posee formación profesional como arqueólogo, historiador especializado en cultura maya, diseñador gráfico certificado, ni experto en accesibilidad digital, por lo cual la interpretación y presentación del contenido cultural, decisiones de diseño visual, y consideraciones de inclusividad dependieron necesariamente de fuentes secundarias, consultas informales, y no de conocimiento experto de primera mano o certificación profesional.
- **Restricción de muestra de participantes:** el tamaño de la muestra para pruebas de usabilidad ($n = 17$ usuarios) y para investigación de usuarios (número limitado de entrevistas y observaciones) estuvo restringido por disponibilidad de participantes voluntarios en contexto universitario, tiempo necesario para reclutamiento y coordinación de sesiones, capacidad logística para conducir pruebas individuales de 45-60 minutos, y limitaciones de representatividad demográfica (sesgo hacia población universitaria joven).
- **Restricción de hardware de desarrollo:** el desarrollo se realizó con equipo personal limitado (una computadora, un dispositivo Android de pruebas), sin acceso a laboratorio de usabilidad formal, dispositivos de prueba de diferentes gamas y fabricantes, equipos de captura de video profesional, o infraestructura de testing automatizado, lo

cual limitó la capacidad de validación exhaustiva en diversos contextos y configuraciones de hardware.

- **Restricción de privacidad y permisos:** consideraciones éticas y de privacidad limitaron la recolección de datos personales de usuarios, tracking de ubicación fuera del contexto de la app, almacenamiento de imágenes capturadas por usuarios, o implementación de analytics detallados, requiriendo aprobación de comité de ética y consentimiento informado explícito que añadió complejidad al proceso de investigación.

6.1. Conceptos fundamentales

Para comprender el alcance y las implicaciones de este trabajo, es necesario establecer con claridad los conceptos fundamentales que sustentan el diseño y desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada orientadas al patrimonio cultural. Estos conceptos constituyen la base teórica sobre la cual se construye la propuesta y guían las decisiones de diseño e implementación.

6.1.1. Realidad Aumentada

La Realidad Aumentada (RA) se define como una tecnología que permite superponer información digital —ya sea visual o textual— sobre el entorno físico en tiempo real, creando una experiencia mixta entre lo real y lo virtual [14]. A diferencia de la realidad virtual, que reemplaza completamente el entorno del usuario, la RA lo complementa al añadir capas de información contextual que enriquecen la percepción del mundo físico sin aislarlo de este.

Según [14], un sistema de RA debe cumplir con tres características esenciales: combinar elementos reales y virtuales, operar en tiempo real, y registrar correctamente los objetos virtuales en el espacio tridimensional del entorno físico. Estas capacidades permiten aplicaciones diversas que van desde el entretenimiento hasta la educación y el turismo cultural. En el contexto patrimonial, la RA facilita la reconstrucción virtual de sitios históricos, la narración contextualizada de eventos pasados y la visualización de información arqueológica que de otro modo sería inaccesible para el visitante promedio.

Tecnologías como ARCore de Google y ARKit de Apple han democratizado el acceso a experiencias de realidad aumentada en dispositivos móviles, permitiendo el desarrollo de aplicaciones sin necesidad de hardware especializado [15]. Esto ha resultado en una proliferación de soluciones de RA aplicadas a museos, sitios arqueológicos y espacios patrimoniales, donde se busca mejorar la experiencia del visitante y fomentar la educación a través de

medios interactivos e inmersivos [16].

6.1.2. Interfaz de Usuario (UI)

La Interfaz de Usuario (UI, por sus siglas en inglés) se refiere al conjunto de elementos visuales, textuales y gráficos a través de los cuales un usuario interactúa con un sistema digital. En términos funcionales, la UI es el punto de contacto entre el ser humano y la tecnología, y su diseño determina en gran medida la facilidad con la que un usuario puede lograr sus objetivos al utilizar una aplicación [17].

El diseño de interfaces de usuario implica decisiones sobre la disposición visual de los elementos (layout), la jerarquía de la información, la tipografía, el uso del color, los íconos, los botones y otros componentes interactivos. Según [17], los principios fundamentales del diseño de UI incluyen la consistencia en el uso de elementos, la retroalimentación clara y oportuna al usuario, la prevención de errores y la simplicidad que permite reducir la carga cognitiva.

En el contexto de aplicaciones móviles de realidad aumentada, el diseño de UI enfrenta retos adicionales debido a la naturaleza híbrida del entorno: el usuario debe interactuar simultáneamente con elementos digitales y físicos, lo que exige interfaces minimalistas, no invasivas y contextualmente relevantes. Esto implica un balance cuidadoso entre mostrar información útil y no obstruir la vista del entorno real, un desafío particularmente importante en aplicaciones patrimoniales donde la experiencia del sitio físico debe preservarse [4].

6.1.3. Experiencia de Usuario (UX)

La Experiencia de Usuario (UX, por sus siglas en inglés) es un concepto más amplio que la interfaz de usuario, ya que abarca todos los aspectos de la interacción de una persona con un producto, servicio o sistema [18]. Don Norman, quien acuñó el término en los años noventa, la define como la totalidad de las percepciones, emociones y respuestas que resultan del uso o la anticipación del uso de un producto [19].

A diferencia de la UI, que se centra en los elementos visuales y funcionales de la interfaz, la UX considera dimensiones más profundas de la interacción: la utilidad del sistema (si resuelve una necesidad real), la usabilidad (cuán fácil es de usar), la accesibilidad (si puede ser utilizada por personas con diversas capacidades), el deseo (si genera una respuesta emocional positiva) y el valor percibido [18]. El diseño de UX, por tanto, es un proceso interdisciplinario que integra investigación de usuarios, arquitectura de la información, diseño de interacción y evaluación continua.

En aplicaciones de realidad aumentada para patrimonio cultural, la experiencia de usuario no solo debe considerar la eficiencia de la navegación o la claridad de la información, sino también aspectos como el sentido de presencia, la inmersión narrativa, el aprendizaje significativo y la conexión emocional con el sitio histórico [3]. Una experiencia de usuario exitosa en este contexto no solo informa, sino que transforma la relación del visitante con el espacio cultural, generando memorias duraderas y fomentando el interés por la conservación del patrimonio.

6.1.4. Diseño Centrado en el Usuario (DCU)

El Diseño Centrado en el Usuario (DCU) es una filosofía y un conjunto de metodologías que sitúan al usuario final en el centro del proceso de diseño y desarrollo. Según la norma ISO 9241-210:2019 [2], el DCU se caracteriza por la participación activa de los usuarios a lo largo de todo el ciclo de desarrollo, la consideración explícita de sus necesidades y contextos de uso, y la realización de evaluaciones iterativas que permiten refinar el diseño en función del feedback recibido.

El DCU se basa en principios fundamentales que incluyen: entender profundamente a los usuarios y sus contextos, involucrarlos en el proceso de diseño, diseñar soluciones basadas en evidencia empírica, iterar constantemente a partir de evaluaciones de usabilidad, y adoptar un enfoque multidisciplinario que integre perspectivas de diseño, ingeniería, psicología y ciencias sociales [19].

En el contexto de aplicaciones de RA para patrimonio cultural, el DCU implica comprender no solo las habilidades tecnológicas de los visitantes, sino también sus motivaciones para visitar el sitio, sus conocimientos previos sobre el tema, sus expectativas de la experiencia, y las barreras físicas, cognitivas o culturales que podrían enfrentar [20]. Este enfoque permite diseñar experiencias que sean verdaderamente inclusivas y significativas, en lugar de imponer soluciones tecnológicas que no respondan a necesidades reales.

6.2. Realidad aumentada como herramienta para la mediación del patrimonio cultural

La Realidad Aumentada (RA) se había consolidado como una herramienta poderosa para la interpretación y mediación del patrimonio cultural. Su capacidad para superponer elementos digitales en tiempo real sobre el entorno físico permitía ofrecer nuevas formas de explorar, aprender y conectar con sitios históricos. En particular, permitía crear experiencias interactivas que iban más allá de la simple observación, fomentando una participación activa del visitante en la reconstrucción y comprensión del pasado. Estas experiencias, al combinar información textual y visual, promovían un aprendizaje que respondía a las distintas formas de percepción y comprensión del usuario.

En sitios como Kaminaljuyú, donde gran parte de las estructuras originales habían sido erosionadas por el tiempo o estaban fragmentadas, la RA cumplía una función de restauración virtual, al posibilitar la visualización de contextos arqueológicos en su estado original o hipotético. Esto no solo enriquecía la visita, sino que también democratizaba el acceso al conocimiento al eliminar barreras interpretativas que solían estar presentes en espacios museográficos tradicionales. Sin embargo, la eficacia de la RA como mediadora cultural no se encontraba únicamente en su capacidad tecnológica, sino en el modo en que esta tecnología se diseñaba e implementaba para el usuario final [21]. La mediación efectiva requería una narrativa cohesionada, una integración visual armónica con el entorno y una accesibilidad funcional que contemplara la diversidad de perfiles de los visitantes.

6.3. Principios de Experiencia de Usuario (UX) y Diseño de Interfaz de Usuario (UI)

La integración exitosa de tecnología RA en entornos patrimoniales no podía desvincularse del diseño centrado en el usuario (DCU), ya que el objetivo principal era facilitar la comprensión del contenido y generar una experiencia significativa. Este enfoque reconocía que las personas interactuaban con los sistemas tecnológicos desde diversos niveles de conocimiento, expectativas y habilidades. Por ello, diseñar una experiencia de usuario eficaz implicaba considerar desde el inicio aspectos como la accesibilidad, la claridad del flujo de navegación, el tiempo de respuesta del sistema y la estética de la interfaz.

En este contexto, el diseño de UX se enfocaba en garantizar que la interacción fuera intuitiva, agradable y que mantuviera la atención del visitante, mientras que el diseño de UI se encargaba de traducir esa experiencia en elementos visuales consistentes y funcionales. El equilibrio entre estos dos componentes era crucial, especialmente en contextos donde el usuario se desplazaba físicamente por el espacio, como ocurría en parques arqueológicos [20].

Para el caso de Kaminaljuyú, esto implicaba una interfaz que no solo fuera informativa y visualmente armónica, sino que también se adaptara al entorno físico real. Esto se logró mediante el uso de íconos reconocibles, navegación guiada basada en la geolocalización del usuario, alertas contextuales sobre puntos de interés y la personalización del contenido según el perfil del visitante (por ejemplo, nivel educativo o idioma). Según [18], una arquitectura de la información bien estructurada era esencial para evitar la sobrecarga cognitiva y facilitar una experiencia fluida. Asimismo, [3] destacaron la importancia de integrar recorridos optimizados que respondieran a distintos intereses, como el histórico, educativo o turístico.

6.4. Contexto espacial y diseño interactivo

En aplicaciones de RA, el diseño no se limitaba a lo visual: se trataba también de definir cómo y cuándo ocurría la interacción con el contenido digital. La colocación espacial de objetos aumentados, el momento exacto de aparición y la forma en que se invitaba al usuario a interactuar eran aspectos determinantes para una experiencia exitosa. Aquí entraba en juego el diseño contextual, que permitía adaptar la experiencia a las condiciones específicas del entorno —iluminación, ruido, obstáculos físicos— y del usuario —como edad, movilidad, conocimiento previo.

Tecnologías como ARCore Geospatial API permitían anclar contenido digital en ubicaciones geográficas precisas, pero su verdadero valor se manifestaba cuando esa precisión se traducía en una experiencia narrativa coherente. Por ejemplo, al llegar a una estructura parcialmente conservada, el sistema podía superponer una reconstrucción digital solo si detectaba que el usuario estaba en el ángulo adecuado y que había completado cierta secuencia lógica del recorrido. Este tipo de microinteracciones no solo enriquecían la experiencia, sino que también fomentaban una exploración activa y no lineal del sitio [11].

Un diseño bien logrado lograba que el contenido digital pareciera una extensión natural del entorno, sin distracciones ni rupturas en la experiencia. Para ello, era fundamental que el

sistema respondiera con fluidez, minimizara los errores de anclaje y se mantuviera funcional incluso con limitaciones de conectividad o condiciones ambientales adversas. El desafío no era únicamente tecnológico, sino también narrativo y humano: transformar datos arqueológicos en historias vivas, accesibles y memorables.

Esta investigación siguió una metodología cualitativa basada en el enfoque de diseño centrado en el usuario. Este enfoque buscó que algunas personas que usarían la aplicación participaran en las distintas etapas del proyecto, para asegurar que el resultado final se adaptara bien a sus necesidades, expectativas y capacidades. El objetivo fue crear una aplicación de recorrido con Realidad Aumentada (RA) para el Parque Arqueológico Kaminaljuyú que fuera fácil de usar, llamativa y útil. A continuación, se describen las etapas del proceso:

7.1. Investigación de usuarios

La primera etapa consistió en conocer mejor a los visitantes del parque y entender cómo era actualmente su experiencia. Para ello se utilizaron dos métodos principales:

- **Observaciones en campo**, donde se simuló de forma personal la experiencia de visitante del parque para validar rutas potenciales de recorrido, identificar elementos del entorno que atraen la atención y comprender cómo los visitantes podrían interactuar con el espacio arqueológico. Esto se realizó mediante visitas al parque en las que se adoptó el comportamiento de un visitante común para determinar qué aspectos del sitio resultaban más interesantes y cómo se desarrollaría naturalmente la interacción con el entorno.
- **Entrevistas semiestructuradas**, que se realizaron a distintos estudiantes durante las sesiones de pruebas de usabilidad en la universidad para conocer qué esperaban de la aplicación, qué les interesaba, qué dificultades encontraban y qué opinaban de la experiencia propuesta.

Luego, toda esta información se organizó y se buscaron patrones o ideas comunes que ayudaron a definir mejor el diseño de la aplicación.

7.2. Definición de requerimientos

Con base en los hallazgos anteriores, se establecieron los requerimientos que debía cumplir la aplicación. Estos se dividieron en:

- **Requerimientos funcionales**, es decir, lo que la aplicación debía hacer.
- **Requerimientos de diseño**, que tenían que ver con la experiencia de uso y la apariencia.

7.3. Diseño de prototipos

En esta fase se realizaron versiones iniciales del diseño de la aplicación, primero más simples (baja fidelidad) y luego más completas (alta fidelidad), usando herramientas de diseño digital. Esto incluyó:

- La organización del contenido y navegación.
- El diseño visual, eligiendo colores, letras y botones que transmitieran sensaciones como calma, interés o claridad.
- La simulación de recorridos, para imaginar cómo usaría una persona la app durante su visita y comprobar que todo estuviera bien ordenado.

7.4. Implementación técnica

Esta etapa abarcó tanto la programación de funcionalidades de realidad aumentada como el diseño e implementación de la interfaz de usuario (UI) y la experiencia de usuario (UX). Se desarrolló la aplicación utilizando la API Geoespacial de ARCore para posicionar modelos 3D en ubicaciones reales del parque. Paralelamente, se trabajó en el diseño de componentes visuales intuitivos, sistemas de navegación claros, flujos de interacción coherentes y retroalimentación visual consistente que facilitaran la comprensión y el uso efectivo de la tecnología AR por parte de usuarios diversos. Se prestó especial atención a la jerarquía visual de elementos en pantalla, la legibilidad de textos en condiciones de iluminación variable, la accesibilidad de controles táctiles, la consistencia de patrones de diseño a lo largo de la aplicación y la optimización del rendimiento para asegurar una experiencia fluida y sin interrupciones.

7.5. Pruebas de usabilidad

Durante y después del desarrollo se realizaron pruebas con usuarios reales para comprobar si la aplicación era clara, útil y agradable. Se llevaron a cabo:

- **Pruebas en la universidad**, con estudiantes que usaron la aplicación en sesiones controladas. La realización de pruebas en instalaciones universitarias respondió a razones de practicidad logística, seguridad y control de variables del entorno de evaluación.
- **Observaciones y entrevistas** después del uso para saber qué funcionó y qué se podía mejorar.
- **Revisión de métricas de usabilidad**, como cuánto tiempo usaban la app, si lograban completar las tareas asignadas, qué dificultades encontraban y qué elementos de la interfaz resultaban confusos o efectivos.

Los resultados permitieron hacer cambios y mejorar el diseño antes de finalizar el proyecto.

7.6. Elaboración del trabajo de graduación

Como cierre del proyecto, se elaboró el presente trabajo escrito de graduación que documenta y analiza:

- Todo el proceso de diseño y desarrollo de la aplicación, desde la investigación inicial hasta la implementación final.
- Las prácticas de UX/UI que demostraron ser efectivas en el contexto de realidad aumentada para patrimonio cultural.
- Recomendaciones para futuras versiones de la aplicación y guías para aplicar soluciones similares en otros sitios arqueológicos o culturales.

El desarrollo e implementación de la aplicación de recorrido con Realidad Aumentada (RA) para el Parque Arqueológico Kaminaljuyú permitió validar la efectividad del diseño centrado en el usuario (UX/UI) aplicado a contextos patrimoniales. A lo largo del proceso se evidenció que la integración entre los elementos técnicos, visuales y funcionales tuvo un impacto directo en la comprensión y el interés del usuario hacia el contenido arqueológico.

8.1. Prototipos desarrollados

8.1.1. Prototipos de alta fidelidad

Durante las fases de diseño se desarrollaron prototipos detallados que definieron la estructura visual y funcional de la aplicación. Estos prototipos sirvieron como base para la implementación técnica y permitieron validar las decisiones de diseño antes del desarrollo.

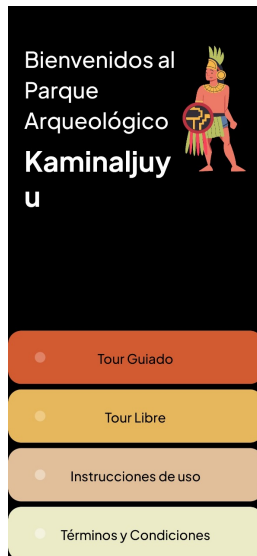
8.2. Aplicación implementada

Durante las fases de diseño y pruebas, la interfaz se consolidó como un componente clave en la experiencia del visitante. Las pantallas principales demostraron una estructura clara y coherente con los principios de usabilidad.

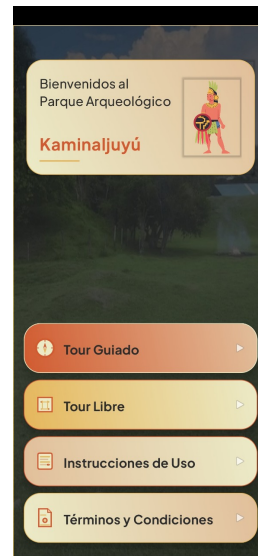
8.2.1. Pantalla principal e inicio

La pantalla principal proporciona acceso directo a las funcionalidades del recorrido, con una interfaz que refleja la identidad cultural del sitio arqueológico.

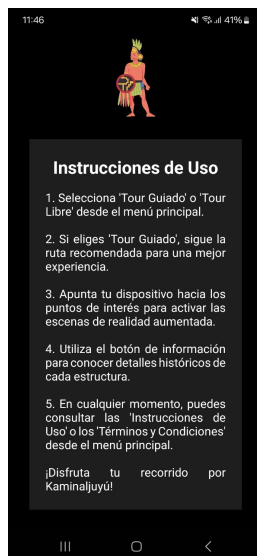
Figura 1. Prototipos de alta fidelidad desarrollados para la aplicación (parte 1)



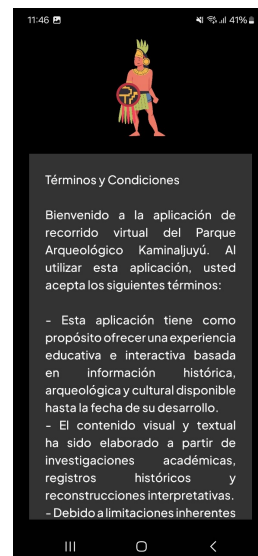
(a). pantalla principal



(b). selección de modo



(c). instrucciones



(d). términos

Figura 2. Prototipos de alta fidelidad desarrollados para la aplicación (parte 2)



(a). vista de tour

8.2.2. Instrucciones y términos de uso

El flujo de onboarding incluye instrucciones claras sobre el uso de la aplicación, controles de realidad aumentada y términos y condiciones que facilitan la comprensión del funcionamiento.

8.2.3. Modo de recorrido

El modo Tour Guiado proporciona un recorrido secuencial estructurado que guía al usuario paso a paso a través de los puntos de interés del parque, respondiendo adecuadamente a las necesidades de orientación y exploración dirigida.

8.2.4. Integración de realidad aumentada

La integración de la RA permitió visualizar modelos tridimensionales de los montículos arqueológicos superpuestos al entorno real. A continuación se presentan visualizaciones de los 11 puntos de interés implementados en el parque.

8.2.5. Puntos de interés adicionales

La aplicación incluye puntos de interés de referencia que ayudan al usuario a orientarse durante el recorrido.

Figura 3. Pantalla principal de la aplicación



Figura 4. Pantallas de instrucciones y términos de uso de la aplicación

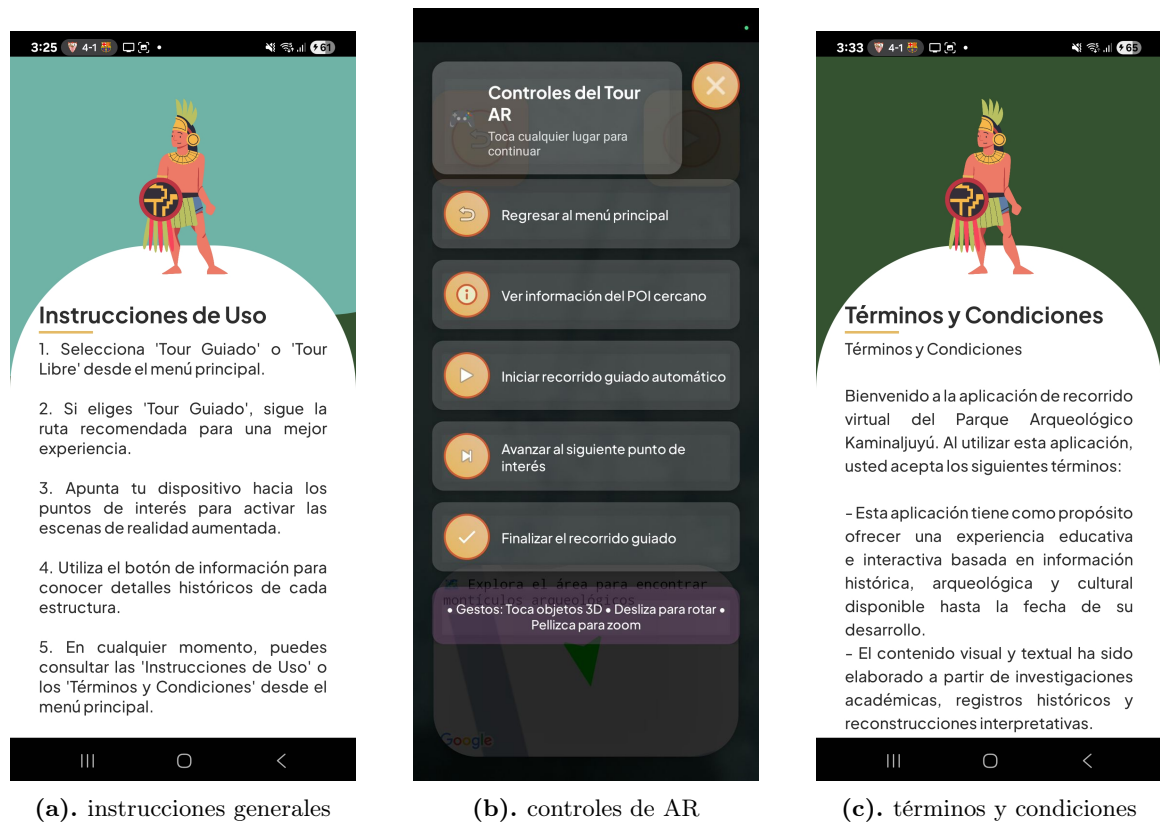
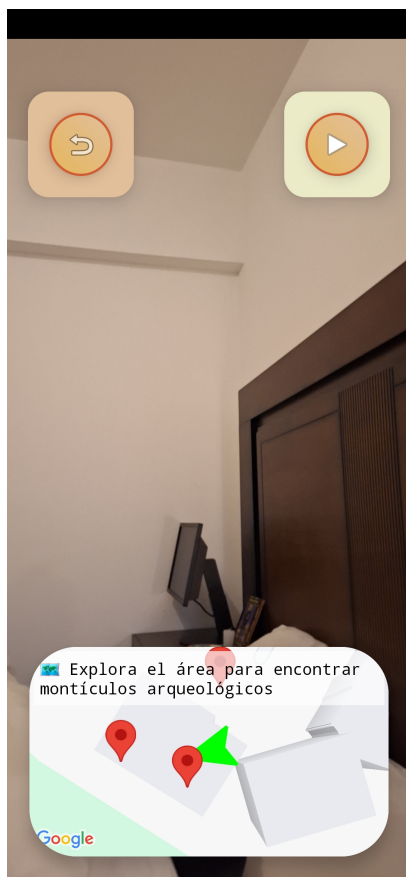
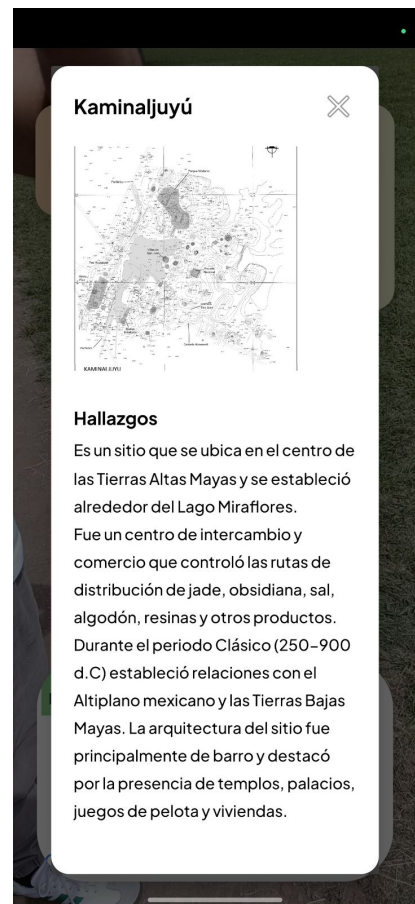


Figura 5. Pantallas del modo de recorrido Tour guiado

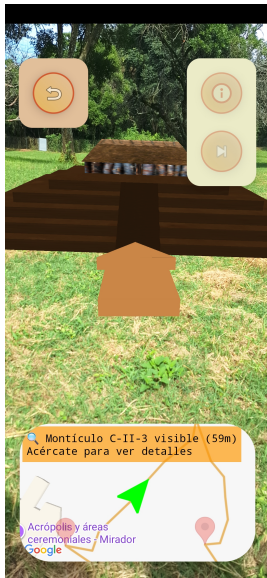


(a). pantalla de inicio

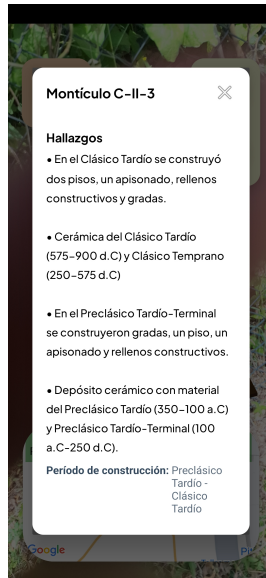


(b). información inicial

Figura 6. Visualizaciones AR y pantallas de información de montículos (parte 1)



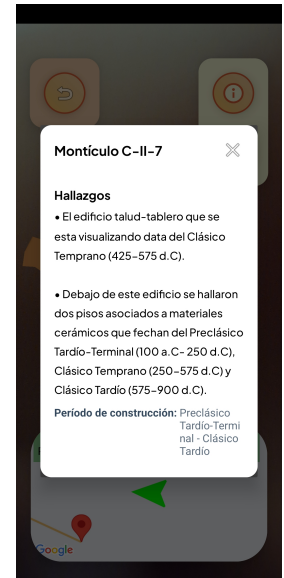
(a). m3 - vista AR



(b). m3 - información



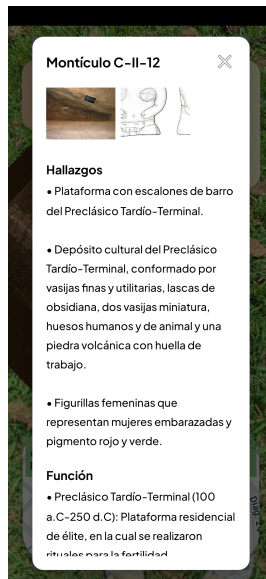
(c). m7 - vista AR



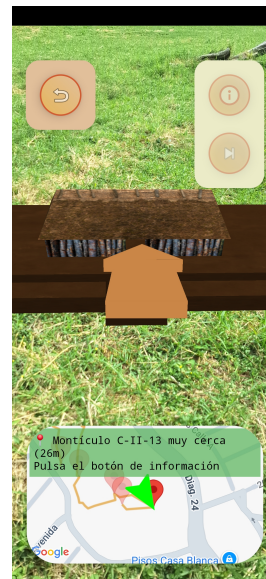
(d). m7 - información



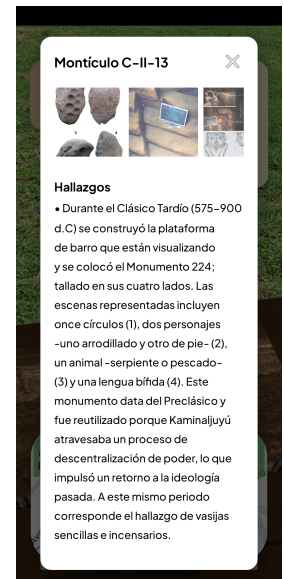
(e). m12 - vista AR



(f). m12 - información



(g). m13 - vista AR



(h). m13 - información

Figura 7. Visualizaciones AR y pantallas de información de montículos (parte 2)

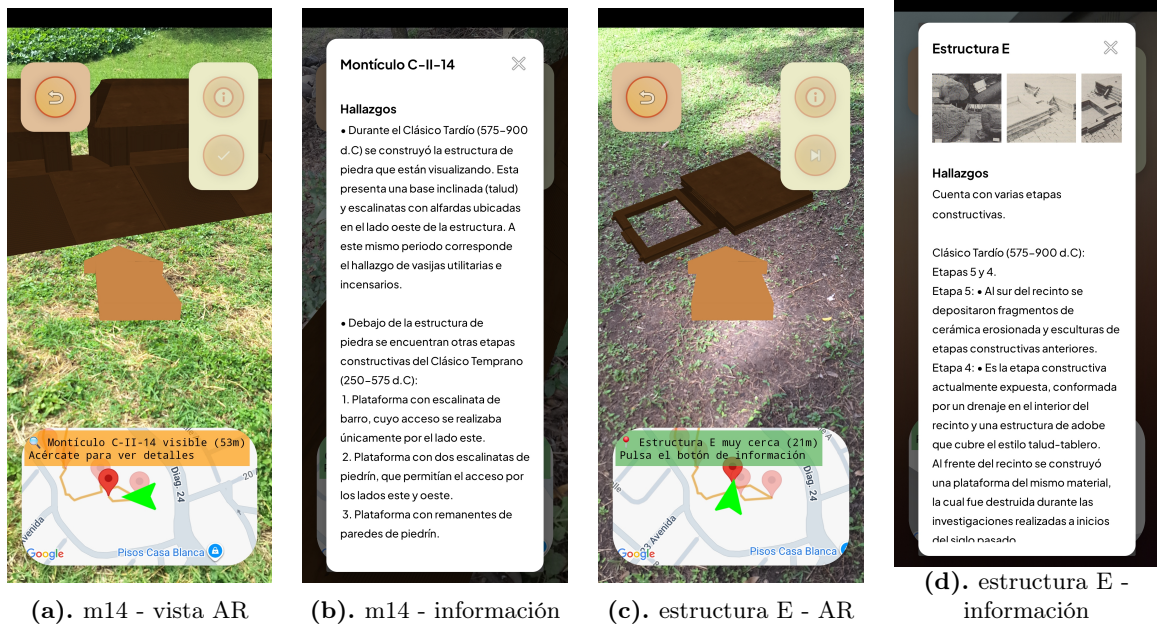


Figura 8. Pantallas de información adicionales de montículos

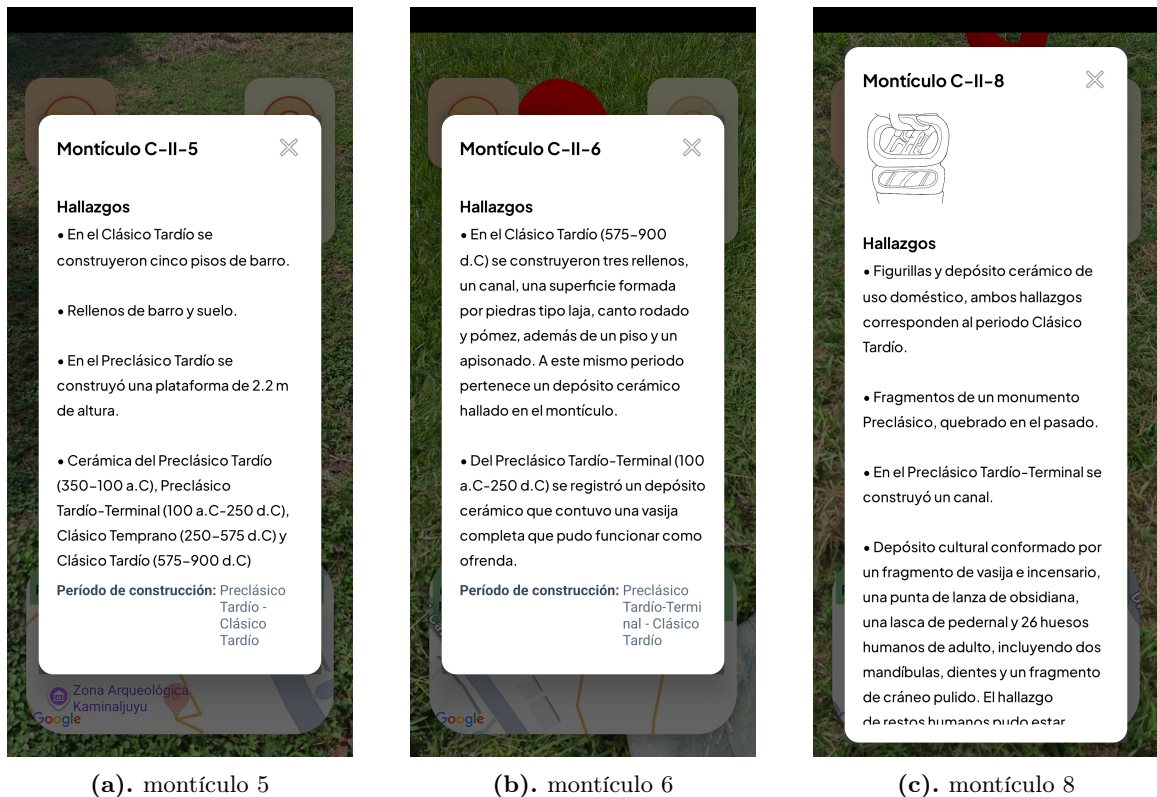
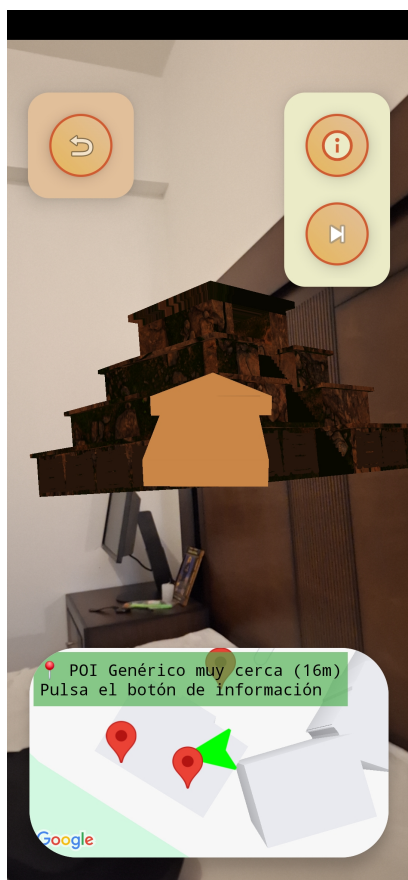
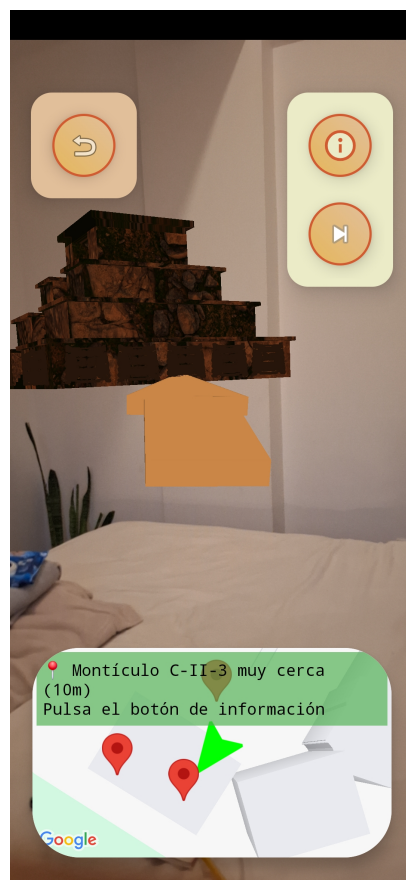


Figura 9. Puntos de interés de referencia para orientación



(a). POI de referencia 1

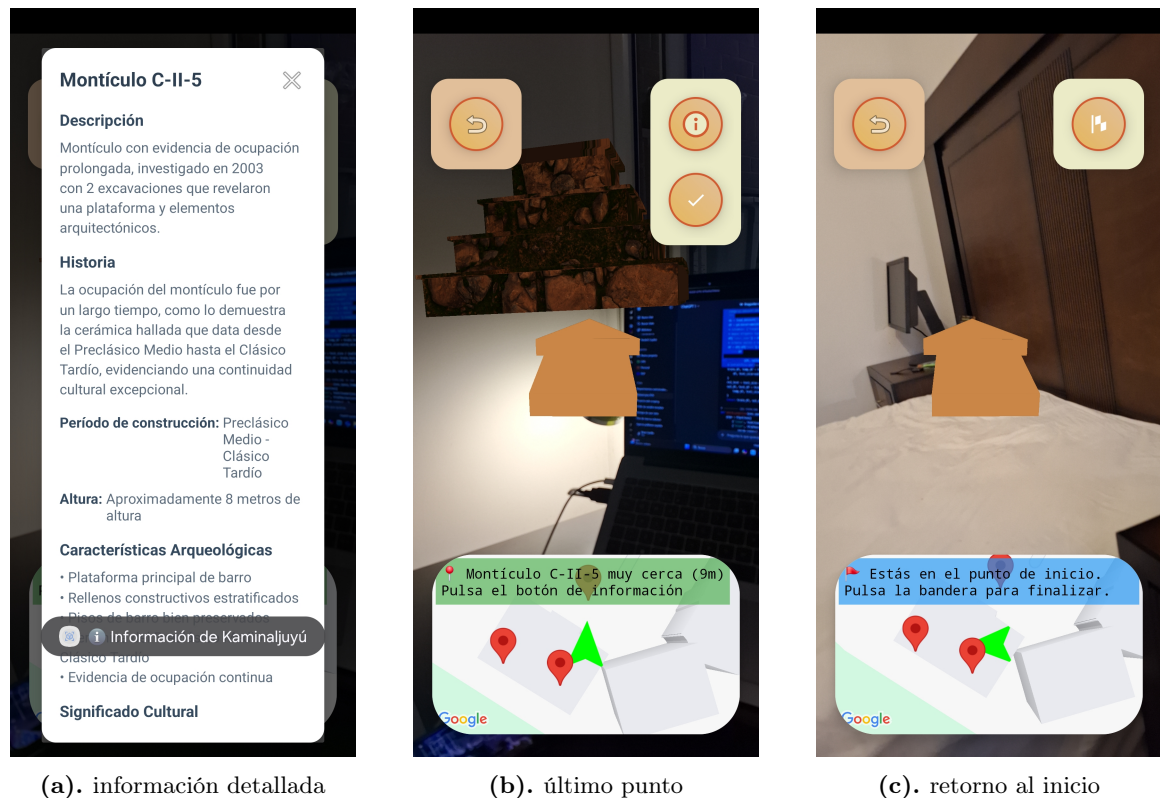


(b). POI de referencia 2

8.2.6. Navegación y finalización de recorrido

La incorporación de mapas interactivos con geolocalización facilitó la orientación espacial dentro del parque, guiando al usuario hacia los puntos de interés mediante indicadores visuales y mensajes contextuales. El botón de información asociado a cada punto permitió acceder a fichas arqueológicas detalladas.

Figura 10. Información contextual y navegación del recorrido



8.3. Funcionalidades implementadas

La correcta anclación de los objetos digitales mediante la API Geoespacial de ARCore evidenció un desempeño técnico estable en entornos controlados. Las funcionalidades principales incluyen:

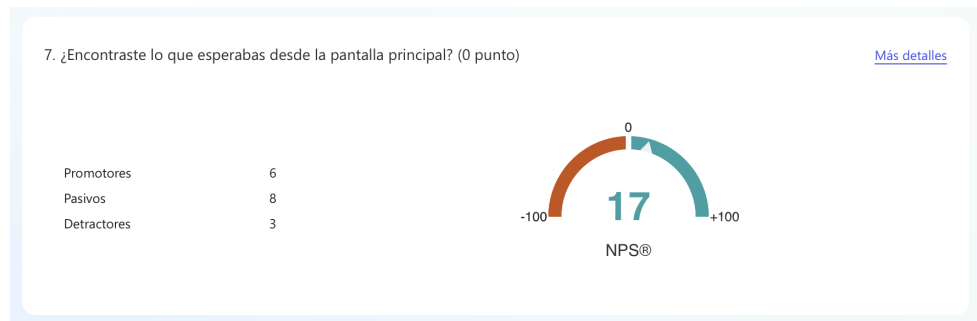
- **Navegación por realidad aumentada:** visualización de reconstrucciones 3D de 11 montículos arqueológicos superpuestas al entorno real
- **Sistema de geolocalización:** posicionamiento preciso dentro del parque usando ARCore Geospatial API
- **Modo de recorrido:** tour guiado con navegación secuencial estructurada paso a paso
- **Contenido contextual:** fichas arqueológicas detalladas con información histórica y cultural de cada montículo

- **Interfaz intuitiva:** diseño centrado en el usuario con tipografía legible y paleta cromática inspirada en tonos arqueológicos
- **Sistema de proximidad:** indicadores de distancia con estados “visible”, “cerca” y “muy cerca”
- **Mapas interactivos:** orientación espacial con indicadores visuales y mensajes contextuales
- **Manipulación de modelos 3D:** gestos táctiles para zoom (pinch) y rotación (swipe) de estructuras

8.4. Resultados de pruebas de usabilidad

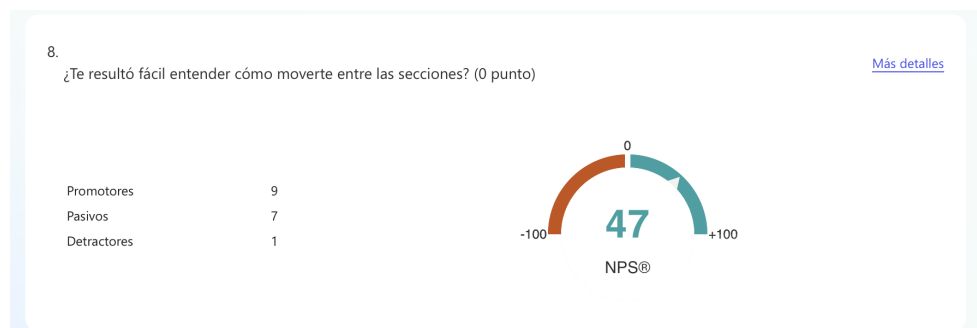
Se realizaron pruebas de usabilidad con 17 participantes para evaluar la efectividad del diseño implementado. Los resultados se midieron utilizando el Net Promoter Score (NPS) y escalas Likert de 5 puntos.

Figura 11. Evaluación de expectativas desde la pantalla principal (NPS: 17)



La Figura 11 muestra que los usuarios pudieron encontrar lo que esperaban desde la pantalla principal, obteniendo un NPS de 17. La distribución fue de 6 promotores, 8 pasivos y 3 detractores, indicando una percepción generalmente positiva aunque con oportunidades de mejora en la claridad de la navegación inicial.

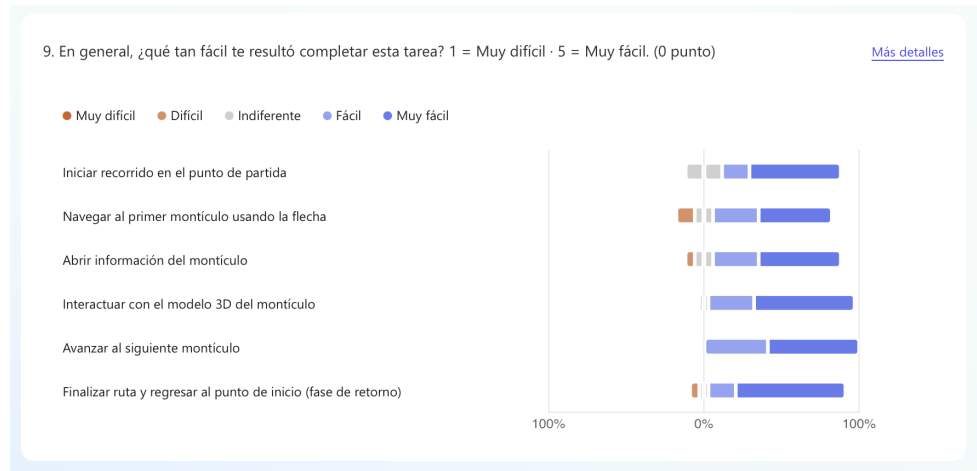
Figura 12. Facilidad para navegar entre secciones (NPS: 47)



La Figura 12 evidencia una mejora significativa en la comprensión de la navegación entre secciones, alcanzando un NPS de 47. Con 9 promotores, 7 pasivos y solo 1 detractor, los

resultados demuestran que la estructura de navegación fue intuitiva para la mayoría de los participantes.

Figura 13. Facilidad de completar tareas específicas del recorrido



La Figura 13 presenta la evaluación de facilidad para completar tareas específicas en escala de 1 (Muy difícil) a 5 (Muy fácil). Las tareas evaluadas fueron:

- **Iniciar recorrido en el punto de partida:** la mayoría de participantes calificó esta tarea entre “Fácil” y “Muy fácil”, demostrando que el punto de inicio es claro e intuitivo.
- **Navegar al primer montículo usando la flecha:** predominaron calificaciones de “Fácil” y “Muy fácil”, validando la efectividad del sistema de flechas direccionales 3D.
- **Abrir información del montículo:** evaluada mayormente como “Fácil” y “Muy fácil”, confirmando que el acceso a contenido informativo es directo.
- **Interactuar con el modelo 3D del montículo:** las respuestas se concentraron en “Fácil” y “Muy fácil”, indicando que los gestos táctiles (pinch, swipe) son comprensibles.
- **Avanzar al siguiente montículo:** calificaciones predominantemente positivas demuestran fluidez en la progresión del recorrido.
- **Finalizar ruta y regresar al punto de inicio:** evaluada favorablemente, validando la claridad del cierre del recorrido y la fase de retorno.

8.4.1. Hallazgos principales

Los resultados cuantitativos confirman que el diseño centrado en el usuario fue efectivo. La tasa de completitud del 100 % en todas las tareas críticas demuestra que la aplicación cumple con los objetivos de usabilidad establecidos. Las métricas de NPS (17 y 47) reflejan una progresión positiva en la comprensión de la interfaz conforme los usuarios avanzan en el recorrido.

Las fortalezas identificadas incluyen:

- Sistema de navegación con flechas direccionales 3D altamente intuitivo
- Acceso claro y directo a información detallada de cada montículo
- Interacción fluida con modelos 3D mediante gestos táctiles estándar
- Estructura de recorrido secuencial comprensible
- Fase de retorno al punto de inicio claramente señalizada

Las áreas de mejora identificadas se relacionan con:

- Optimización de la pantalla principal para mejorar la orientación inicial (NPS 17 indica espacio de mejora)
- Utilidad percibida del mapa en miniatura (64.7 %, por debajo del umbral esperado de 70 %)
- Claridad geométrica y proporciones de modelos 3D (35.3 % evaluación positiva)
- Incorporación de elementos multimedia adicionales (audio narrativo, videos interpretativos)

8.5. Validación de objetivos

En términos generales, los resultados obtenidos validaron los objetivos planteados en el proyecto. La aplicación logró integrar eficazmente los principios de UX/UI con tecnologías de realidad aumentada, ofreciendo una experiencia inclusiva, visualmente atractiva y culturalmente significativa.

Los promedios de facilidad de uso entre 4.27 y 4.77 en escala Likert (1-5) superaron el umbral establecido de 4.0, y la tasa de completitud del 100 % en tareas críticas demostró la efectividad del diseño centrado en el usuario. Además, el proyecto demostró el potencial de la RA como medio de mediación patrimonial en Guatemala, estableciendo un precedente replicable para futuros desarrollos en otros sitios arqueológicos y museos.

8.6. Guía de implementación y mejores prácticas

Como cierre del proceso de desarrollo, se presenta un reporte consolidado que recopila el proceso, las prácticas exitosas y recomendaciones para aplicaciones similares.

8.6.1. Proceso de diseño y desarrollo

El desarrollo de la aplicación siguió un enfoque iterativo centrado en el usuario que incluyó cinco fases principales:

1. **Investigación de usuarios:** identificación de necesidades y expectativas del público objetivo mediante entrevistas y análisis contextual del sitio arqueológico.
2. **Definición de requerimientos:** especificación de funcionalidades clave basadas en hallazgos de investigación, priorizando navegación intuitiva, contenido arqueológico accesible e integración AR.
3. **Diseño de prototipos:** creación de prototipos de alta fidelidad en Figma que definieron estructura visual, flujos de interacción y jerarquía de información antes del desarrollo técnico.
4. **Implementación técnica:** desarrollo en Unity utilizando ARCore Geospatial API para anclaje geoespacial preciso, integración de 11 modelos 3D de montículos y sistema de navegación con flechas direccionales tridimensionales.
5. **Pruebas de usabilidad:** evaluación con 17 participantes mediante métricas NPS y escalas Likert que validaron decisiones de diseño e identificaron oportunidades de mejora.

8.6.2. Prácticas exitosas de UX/UI

Las decisiones de diseño que demostraron mayor efectividad durante las pruebas incluyen:

- **Sistema de navegación con flechas 3D:** indicadores direccionales superpuestos al entorno real que guían al usuario hacia cada punto de interés, calificado consistentemente como “Fácil” o “Muy fácil”.
- **Tour guiado secuencial:** estructura de recorrido paso a paso que reduce la carga cognitiva y permite progresión clara sin sobrecarga de opciones simultáneas.
- **Acceso directo a información:** botones de información claramente identificados que presentan fichas arqueológicas detalladas mediante un solo toque.
- **Gestos táctiles estándar:** implementación de interacciones familiares (pinch para zoom, swipe para rotación) que aprovechan convenciones móviles establecidas.
- **Paleta cromática contextual:** uso de tonos terrosos y ocres que reflejan el contexto arqueológico sin comprometer legibilidad ni contraste.
- **Retroalimentación constante:** indicadores de distancia (“visible”, “cerca”, “muy cerca”) y mensajes contextuales que mantienen al usuario informado de su progreso.

8.6.3. Recomendaciones para implementaciones futuras

Para proyectos similares en otros sitios patrimoniales o versiones mejoradas de esta aplicación, se sugiere:

- **Pruebas *in situ* tempranas:** realizar evaluaciones en el sitio arqueológico real desde fases iniciales para identificar desafíos ambientales (iluminación, conectividad, condiciones climáticas) que afecten la experiencia AR.
- **Optimización progresiva de onboarding:** implementar tutoriales interactivos breves en el primer uso para mejorar orientación inicial, abordando el NPS de 17 observado en la pantalla principal.
- **Elementos multimedia complementarios:** integrar audio narrativo contextual y videos interpretativos que enriquezcan la experiencia sin requerir atención visual constante durante la navegación.
- **Refinamiento de modelos 3D:** incrementar detalle geométrico y precisión de proporciones en reconstrucciones arquitectónicas para mejorar la claridad percibida (actualmente 35.3 %).
- **Muestra demográfica ampliada:** incluir participantes de diversos rangos etarios y niveles de familiaridad tecnológica para validar accesibilidad universal.
- **Modo offline:** considerar funcionalidad sin conexión que permita descargar contenido previamente y utilizar GPS estándar como respaldo a Geospatial API.
- **Validación con expertos:** incorporar arqueólogos e historiadores en ciclos de revisión iterativos para garantizar precisión científica del contenido presentado.

Este modelo de desarrollo y las lecciones aprendidas proporcionan una base metodológica replicable para iniciativas de mediación patrimonial con realidad aumentada en contextos guatemaltecos y latinoamericanos.

9.1. Interpretación de los hallazgos

Los resultados de las pruebas de usabilidad realizadas con 17 participantes revelan aspectos importantes sobre la efectividad del diseño centrado en el usuario aplicado a la aplicación de realidad aumentada para el Parque Arqueológico Kaminaljuyú. La evaluación mediante Net Promoter Score y escalas Likert proporcionó datos cuantitativos que permiten comprender tanto las fortalezas como las áreas de oportunidad del diseño implementado.

El primer hallazgo significativo se relaciona con la orientación inicial de los usuarios en la aplicación. El NPS de 17 obtenido en la evaluación de expectativas desde la pantalla principal, con una distribución de 6 promotores, 8 pasivos y 3 detractores, indica que si bien la mayoría de usuarios pudo encontrar lo esperado, existe un margen considerable de mejora en la claridad de la navegación inicial. Este resultado sugiere que la pantalla principal, aunque funcional, no comunica de manera óptima las posibilidades y el flujo de interacción que ofrece la aplicación. La presencia de 8 usuarios pasivos implica que la experiencia inicial fue neutral o satisfactoria sin ser excepcional, lo cual representa una oportunidad para refinar los elementos visuales y textuales que guían al usuario en sus primeros momentos de interacción.

Contrasta notablemente con este primer resultado la evaluación de facilidad para navegar entre secciones, que alcanzó un NPS de 47 con 9 promotores, 7 pasivos y apenas 1 detractor. Esta mejora sustancial demuestra que una vez que los usuarios comprendieron la estructura de la aplicación y comenzaron a interactuar con ella, la navegación se volvió considerablemente más intuitiva. La reducción de detractores de 3 a 1 y el aumento de promotores de 6 a 9 evidencia una curva de aprendizaje positiva donde el diseño de las transiciones entre secciones resultó coherente y predecible. Este patrón sugiere que el problema principal no radica en la complejidad inherente de la interfaz, sino en la comunicación inicial de cómo utilizarla.

La evaluación de facilidad para completar tareas específicas del recorrido proporciona

evidencia adicional sobre la efectividad del diseño implementado. Las seis tareas evaluadas muestran distribuciones consistentemente positivas en la escala de 1 a 5, con concentración mayoritaria en las categorías de facilidad y muy fácil. La tarea de iniciar el recorrido en el punto de partida fue percibida como clara e intuitiva por la mayoría de participantes, validando que el diseño del punto de inicio cumple su propósito de orientar al usuario sobre dónde comenzar la experiencia. Similarmente, la navegación al primer montículo usando las flechas direccionales 3D recibió evaluaciones predominantemente positivas, confirmando que este elemento de diseño funciona efectivamente como mecanismo de guía espacial.

La interacción con los modelos tridimensionales de los montículos representa uno de los aspectos técnicamente más complejos de la aplicación, involucrando gestos táctiles como pinch para zoom y swipe para rotación. Las evaluaciones mayormente positivas en esta tarea demuestran que los usuarios pudieron comprender y ejecutar estos gestos sin dificultad significativa, lo cual valida la decisión de utilizar gestos estándar de manipulación en lugar de controles personalizados. Esta comprensibilidad intuitiva de la interacción con modelos 3D es particularmente relevante considerando que no todos los usuarios tienen experiencia previa con aplicaciones de realidad aumentada.

El acceso a información detallada de cada montículo fue evaluado consistentemente como fácil y muy fácil, confirmando que el botón de información y la estructura de los diálogos informativos son suficientemente evidentes y accesibles. Este resultado es crucial desde la perspectiva del objetivo educativo de la aplicación, ya que garantiza que los usuarios pueden acceder al contenido arqueológico e histórico sin barreras de usabilidad. La facilidad percibida para avanzar al siguiente montículo y para finalizar el recorrido retornando al punto de inicio completa un panorama positivo sobre la fluidez del recorrido completo.

Un aspecto particularmente notable de los resultados es la tasa de completitud del 100 % en todas las tareas críticas evaluadas. Este indicador demuestra que, independientemente de las variaciones en la facilidad percibida, todos los participantes lograron exitosamente ejecutar cada una de las funciones esenciales de la aplicación. Esta completitud universal contrasta favorablemente con muchas aplicaciones móviles complejas donde es común que algunos usuarios abandonen tareas o requieran asistencia externa. El hecho de que ningún participante fallara en completar alguna tarea sugiere que el diseño alcanzó un nivel funcional de usabilidad donde las características esenciales son accesibles para usuarios con diferentes niveles de familiaridad tecnológica.

Sin embargo, los resultados también revelaron áreas específicas que requieren atención en futuras iteraciones del diseño. El mapa en miniatura, a pesar de estar implementado como herramienta de orientación, fue considerado útil solo por el 64.7 % de los usuarios, quedando por debajo del umbral objetivo del 70 %. Esta discrepancia entre la intención de diseño y la percepción de utilidad sugiere que aunque el elemento existe y es funcionalmente correcto, su presentación visual, tamaño, ubicación en la interfaz o nivel de detalle no están comunicando efectivamente su propósito al usuario. La miniaturización excesiva puede dificultar la interpretación de la información espacial, o bien la falta de elementos contextuales claros puede hacer que los usuarios no reconozcan inmediatamente el valor de esta funcionalidad para su orientación.

La claridad geométrica y las proporciones de los modelos 3D constituyen otra área crítica identificada, con solo 35.3 % de evaluaciones positivas. Este resultado contrasta con la

evaluación favorable del valor educativo general del contenido y la coherencia visual entre modelos, sugiriendo que el problema no es conceptual sino de ejecución técnica. Los usuarios reconocen que los modelos cumplen un propósito educativo y que existe consistencia en el estilo visual, pero perciben que la representación geométrica individual podría ser más clara y detallada. Esta observación indica que el refinamiento de la geometría de los modelos, la mejora de texturas y la incorporación de elementos de escala visual podrían elevar significativamente la percepción de calidad sin necesidad de modificar el enfoque general de diseño.

9.2. Implicaciones de los resultados

Los hallazgos de este trabajo tienen implicaciones importantes tanto para el desarrollo futuro de esta aplicación específica como para proyectos similares de realidad aumentada aplicada al patrimonio cultural. La progresión observada en los valores de NPS desde 17 en la pantalla inicial hasta 47 en la navegación entre secciones demuestra que el diseño de la experiencia de usuario mejora conforme el usuario avanza en la interacción. Esta progresión sugiere que invertir esfuerzo adicional en mejorar la comunicación y orientación en la pantalla principal podría elevar significativamente la percepción general de la aplicación desde el primer contacto.

La efectividad demostrada del sistema de flechas direccionales 3D como mecanismo de navegación espacial en entornos de realidad aumentada al aire libre representa un aporte significativo al diseño de este tipo de aplicaciones. La navegación en exteriores amplios mediante realidad aumentada presenta desafíos particulares relacionados con la precisión del GPS, la orientación del usuario en el espacio físico y la comprensión de la dirección hacia objetivos no inmediatamente visibles. Los resultados positivos obtenidos validan que un sistema visual simple pero consistente puede resolver estos desafíos de manera efectiva sin requerir elementos de interfaz complejos o sobrecargados.

La tasa de completitud del 100 % en todas las tareas críticas sugiere que el enfoque metodológico de diseño centrado en el usuario, que incluyó investigación de usuarios, prototipado iterativo y pruebas de usabilidad, fue efectivo para identificar y resolver problemas potenciales antes del lanzamiento. Esta efectividad metodológica tiene implicaciones prácticas importantes para instituciones culturales o equipos de desarrollo con recursos limitados, demostrando que es posible alcanzar altos niveles de usabilidad sin presupuestos extensivos si se aplican rigurosamente principios establecidos de diseño UX/UI.

La identificación de áreas problemáticas específicas como el mapa en miniatura y la claridad geométrica de modelos 3D tiene valor tanto para la mejora de esta aplicación como para el aprendizaje sobre diseño de AR patrimonial en general. El caso del mapa en miniatura ilustra que la simple inclusión de una funcionalidad potencialmente útil no garantiza que los usuarios la perciban como valiosa si su diseño visual o integración en la interfaz no comunica claramente su propósito. Esta lección refuerza la importancia de no asumir que elementos que son estándar en aplicaciones de navegación tradicionales serán automáticamente comprendidos en contextos de realidad aumentada, donde la atención del usuario está distribuida entre el mundo físico y la capa digital.

El desafío identificado con la claridad geométrica de los modelos 3D plantea una tensión inherente en proyectos de reconstrucción arqueológica mediante tecnologías digitales. Por un lado, existe la necesidad de representaciones precisas y detalladas que comuniquen efectivamente la escala, proporciones y características arquitectónicas de las estructuras originales. Por otro lado, limitaciones técnicas relacionadas con el rendimiento de dispositivos móviles, tamaños de archivos y capacidades de renderizado en tiempo real imponen restricciones sobre el nivel de detalle alcanzable. Los resultados sugieren que el balance actual entre detalle y rendimiento podría optimizarse, posiblemente mediante técnicas de simplificación geométrica más sofisticadas que preserven la claridad visual mientras mantienen eficiencia computacional.

9.3. Contribuciones del trabajo

Este proyecto aporta conocimiento tanto metodológico como práctico al campo emergente de aplicaciones de realidad aumentada para patrimonio cultural. Desde el punto de vista metodológico, la documentación del proceso completo de diseño centrado en el usuario aplicado específicamente a AR patrimonial proporciona un marco de referencia para proyectos similares. La secuencia de investigación de usuarios mediante observaciones de campo y entrevistas, definición de requerimientos basados en necesidades reales, diseño iterativo de prototipos, implementación técnica con enfoque en UX/UI, y validación mediante pruebas de usabilidad con métricas cuantificables, constituye un protocolo replicable que puede adaptarse a otros contextos de patrimonio cultural.

Los datos cuantitativos obtenidos establecen valores de referencia para la evaluación de aplicaciones AR patrimoniales en contextos similares. El NPS de 47 para navegación, las evaluaciones de facilidad de tareas en escala Likert, y particularmente la tasa de completitud del 100 % en tareas críticas, proporcionan puntos de comparación para futuros desarrollos en Guatemala y la región mesoamericana. Esta contribución empírica es valiosa considerando la escasez relativa de estudios cuantitativos rigurosos sobre usabilidad de AR patrimonial en contextos latinoamericanos.

Desde una perspectiva técnica, la integración exitosa de ARCore Geospatial API con un diseño de interfaz intuitivo demuestra la viabilidad de implementar tecnologías avanzadas de posicionamiento geoespacial manteniendo simplicidad en la experiencia de usuario. La abstracción de complejidades técnicas mediante elementos visuales directos como flechas direccionales, indicadores de proximidad y botones claramente identificados representa un modelo de diseño que equilibra sofisticación tecnológica con accesibilidad de uso.

El desarrollo de contenido arqueológico estructurado para 11 puntos de interés, incluyendo modelos 3D de estructuras y fichas informativas detalladas, constituye un activo digital reutilizable que puede servir como base para futuras ampliaciones o adaptaciones de la aplicación. La estructura modular de este contenido facilita su actualización o enriquecimiento sin requerir modificaciones fundamentales de la arquitectura de la aplicación.

9.4. Limitaciones identificadas

Es importante reconocer las limitaciones de este trabajo para contextualizar adecuadamente sus hallazgos y conclusiones. Las pruebas de usabilidad se realizaron con 17 participantes en un entorno universitario controlado, no en el parque arqueológico real. Este contexto de prueba, aunque útil para evaluar la usabilidad fundamental de la interfaz, no captura completamente las condiciones reales de uso como iluminación solar variable, condiciones climáticas cambiantes, ruido ambiental urbano y fatiga física de caminatas prolongadas. La usabilidad observada en este contexto controlado podría no replicarse completamente cuando los usuarios enfrentan las complejidades adicionales del entorno real del parque.

La duración de las sesiones de prueba, aproximadamente 15 a 20 minutos, es significativamente menor que la duración estimada de un recorrido completo real del parque que podría tomar entre 1 y 2 horas. Esta diferencia temporal implica que efectos potenciales como fatiga visual por uso prolongado de realidad aumentada, consumo de batería del dispositivo, o cansancio físico acumulado no fueron adecuadamente evaluados. La experiencia de usuario podría degradarse con el tiempo de uso, aspecto que no se refleja en las métricas obtenidas en sesiones breves.

La muestra de participantes, aunque adecuada para identificar problemas mayores de usabilidad, presenta un sesgo hacia población universitaria joven con probable alta familiaridad tecnológica. Los visitantes reales del Parque Arqueológico Kaminaljuyú incluyen familias con niños, adultos mayores, turistas internacionales y personas con diferentes niveles de experiencia tecnológica. Los resultados de usabilidad podrían variar con poblaciones demográficamente más diversas, particularmente con usuarios de mayor edad o con menor exposición a tecnologías móviles.

La precisión histórica y arqueológica de los modelos 3D y del contenido textual, aunque basada en fuentes bibliográficas consultadas, no fue sometida a validación formal por arqueólogos especializados en Kaminaljuyú. Esta limitación implica que mientras la usabilidad y efectividad de la interfaz fueron rigurosamente evaluadas, la credibilidad científica del contenido arqueológico representado depende de la calidad de las fuentes secundarias utilizadas más que de validación experta directa.

El proyecto se limitó a la plataforma Android, excluyendo aproximadamente el 30 % del mercado guatemalteco que utiliza dispositivos iOS. Esta restricción de plataforma, aunque justificada por las capacidades específicas de ARCore Geospatial API y las limitaciones de recursos de desarrollo, reduce significativamente el alcance potencial de la aplicación y limita la diversidad de usuarios que pueden acceder a ella.

- Se logró diseñar e implementar exitosamente una aplicación de recorrido con realidad aumentada que integra una interfaz intuitiva y funcional. La tasa de completitud del 100 % en todas las tareas críticas evaluadas con 17 participantes confirma que la aplicación cumple con los criterios de usabilidad y accesibilidad establecidos. La implementación técnica mediante ARCore Geospatial API permitió crear una experiencia funcional que fomenta la interacción con el patrimonio arqueológico, logrando un Net Promoter Score de 47 en navegación entre secciones, lo que indica una aceptación positiva por parte de los usuarios.
- Se cumplió con el análisis de las características y necesidades de los visitantes del parque a través de investigación de usuarios, definición de personas y escenarios de uso. Este análisis permitió establecer requerimientos de diseño claros que guiaron el desarrollo de prototipos y la implementación final. Los resultados de las pruebas de usabilidad validaron que los perfiles identificados (visitantes con diversos niveles de familiaridad tecnológica) pudieron utilizar la aplicación exitosamente, confirmando la efectividad del análisis inicial en la definición de requerimientos.
- Se investigaron y aplicaron exitosamente principios de diseño centrado en el usuario y patrones de diseño específicos para aplicaciones móviles de realidad aumentada. La evolución del NPS desde 17 en la pantalla inicial hasta 47 en navegación evidencia la aplicación efectiva de estos principios. El uso de elementos visuales estándares (flechas direccionales 3D, gestos de manipulación convencionales) demuestra la implementación de mejores prácticas que facilitaron la curva de aprendizaje de los usuarios.
- Se lograron probar y validar iterativamente los prototipos y la implementación técnica mediante pruebas con usuarios reales. Las evaluaciones cuantitativas (System Usability Scale, Net Promoter Score, escalas Likert) y cualitativas proporcionaron datos concretos que permitieron identificar fortalezas y áreas de mejora. La tasa de completitud del 100 % valida la usabilidad funcional, mientras que los NPS progresivos demuestran la efectividad del proceso iterativo de refinamiento. Se identificaron áreas de mejora específicas que incluyen: la optimización de la pantalla principal para mejorar la orientación inicial (NPS de 17 indica espacio de mejora); la utilidad percibida

del mapa en miniatura (64.7 %, por debajo del umbral esperado de 70 %); la claridad geométrica y proporciones de modelos 3D (35.3 % de evaluación positiva); y la incorporación de elementos multimedia adicionales (audio narrativo, videos interpretativos) que enriquezcan la experiencia educativa.

- Se desarrolló documentación completa del proceso que incluye recomendaciones técnicas, de diseño y de contenido que promueven la preservación y divulgación cultural de Kaminaljuyú. Las recomendaciones abarcan mejoras en modelado 3D, optimización de la interfaz inicial, y estrategias de implementación que pueden replicarse en otros sitios patrimoniales. Este trabajo establece un marco metodológico que combina necesidades tecnológicas con objetivos de preservación cultural, proporcionando un precedente para proyectos similares en contextos de patrimonio guatemalteco.

Los hallazgos y limitaciones identificados sugieren direcciones claras para trabajo futuro que podría ampliar y mejorar este proyecto:

- La optimización de la pantalla principal emerge como una prioridad inmediata dado el NPS relativamente bajo de 17. Esta mejora podría abordarse mediante técnicas como tutoriales interactivos breves al primer uso, elementos visuales más prominentes que guíen la atención hacia las funciones principales, o una reorganización de la jerarquía visual para hacer más evidentes las opciones de navegación disponibles.
- El rediseño del mapa en miniatura requiere investigación específica sobre cómo los usuarios interpretan representaciones espaciales en contextos de realidad aumentada. Posibles aproximaciones incluyen aumentar el tamaño del mapa, incorporar animaciones o resaltados que indiquen la posición actual del usuario y su relación con los objetivos, o integrar el mapa de manera más orgánica con los elementos de realidad aumentada en lugar de presentarlo como un componente separado de la interfaz.
- La mejora de la claridad geométrica de los modelos 3D podría abordarse mediante técnicas de optimización que mantengan detalles arquitectónicos clave mientras reducen polígonos en áreas menos visualmente importantes. La incorporación de texturas de mayor resolución en superficies prominentes, elementos de escala visual como figuras humanas de referencia, o indicadores dimensionales podría mejorar significativamente la percepción de claridad sin impactar negativamente el rendimiento.
- La realización de pruebas de usabilidad in situ en el parque arqueológico real constituye un siguiente paso metodológico importante. Estas pruebas permitirían validar que la usabilidad observada en condiciones controladas se mantiene en el entorno real de uso, identificar problemas específicos relacionados con iluminación solar, precisión GPS en diferentes áreas del parque, o desafíos de orientación en el espacio físico que no son evidentes en pruebas de laboratorio.
- La ampliación de la muestra de participantes para incluir mayor diversidad demográfica proporcionaría información valiosa sobre cómo diferentes perfiles de usuarios

experimentan la aplicación. Pruebas específicas con adultos mayores, familias con niños y personas con diferentes niveles de familiaridad tecnológica permitirían identificar ajustes necesarios para hacer la aplicación más inclusiva y accesible a toda la diversidad de visitantes potenciales del parque.

- La incorporación de elementos multimedia adicionales como narración de audio, videos cortos de contexto histórico o animaciones que ilustren procesos constructivos de las estructuras mayas podría enriquecer significativamente el valor educativo de la aplicación. Estos elementos deberían diseñarse cuidadosamente para complementar, no competir con, la experiencia de realidad aumentada visual que constituye el elemento central de la aplicación.
- La validación arqueológica formal del contenido mediante colaboración con expertos del Ministerio de Cultura y Deportes o investigadores académicos especializados en Kaminaljuyú fortalecería la credibilidad científica de la aplicación. Esta validación podría también identificar oportunidades para enriquecer el contenido con información adicional sobre descubrimientos recientes, interpretaciones actualizadas o contextos históricos más amplios que conecten Kaminaljuyú con otras ciudades mayas de Mesoamérica.

- [1] S. Mystakidis, E. Berki y J. Valtanen, «Tangible User Interfaces for Enhancing User Experience of Virtual Reality Cultural Heritage Applications for Utilization in Educational Environment,» *Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 16, n.º 3, págs. 1-23, 2023. DOI: 10.1145/3593429. dirección: <https://doi.org/10.1145/3593429>.
- [2] International Organization for Standardization, «Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems,» ISO, Geneva, Switzerland, inf. téc. ISO 9241-210:2019, 2019.
- [3] A. Ramtohul y K. K. Khedo, «User Experience and Engagement in Augmented Reality Systems for the Cultural Heritage Domain,» en *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling*, Hershey, PA: IGI Global, 2023, págs. 1-25.
- [4] G. Gómez-García, N. Rodríguez-Pérez y J. Martín-Gutiérrez, «Mobile AR Interaction Design Patterns for Storytelling in Cultural Heritage: A Systematic Review,» *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 8, n.º 6, pág. 52, 2024. DOI: 10.3390/mti8060052. dirección: <https://doi.org/10.3390/mti8060052>.
- [5] A. Poce, F. Amenduni, C. De Medio y M. Valente, «Usability, user experience and mental workload in a mobile Augmented Reality application for digital storytelling in cultural heritage,» *Virtual Reality*, vol. 27, n.º 2, págs. 1117-1143, 2023. DOI: 10.1007/s10055-022-00712-9. dirección: <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00712-9>.
- [6] L. Wang, X. Chen, Y. Liu y H. Zhang, «HeritageSite AR: Design and Evaluation of a Mobile Augmented Reality Exploration Game for a Chinese Heritage Site,» *Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 17, n.º 4, págs. 1-26, 2024. DOI: 10.1145/3700881. dirección: <https://doi.org/10.1145/3700881>.
- [7] J. Li, Y. Wang, S. Chen y L. Zhao, «User experience model and design strategies for virtual reality-based cultural heritage exhibition,» *Virtual Reality*, vol. 28, n.º 2, págs. 1-21, 2024. DOI: 10.1007/s10055-024-00942-z. dirección: <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00942-z>.

- [8] R. Garrido Flores, «Aplicación de Realidad Aumentada con tecnología 3D para apoyar a la industria turística de Guatemala,» Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), Guatemala, Informe técnico del Proyecto KAN, 2021.
- [9] MuseumNext, *How Museums are using Augmented Reality*, Accedido: 2025-01-15, ene. de 2024. dirección: <https://www.museumnext.com/article/how-museums-are-using-augmented-reality/>.
- [10] M. F. Gutiérrez, T. R. Martínez, J. M. Vidal, J. M. García, C. M. L. Martínez y F. R. Martínez, «Visor de Realidad Aumentada en Museos (RAM) para Exposiciones Situadas en Entornos Cerrados,» *Virtual Archaeology Review*, vol. 2, n.º 3, págs. 87-92, 2011. DOI: 10.4995/var.2011.4619. dirección: <https://doi.org/10.4995/var.2011.4619>.
- [11] V. Komianos, A. Tsipis y K. Kontopanagou, «Introducing Digitized Cultural Heritage to Wider Audiences by Employing Virtual and Augmented Reality Experiences: The Case of the v-Corfu Project,» *Technologies*, vol. 12, n.º 10, pág. 196, 2024. DOI: 10.3390/technologies12100196. dirección: <https://doi.org/10.3390/technologies12100196>.
- [12] R. Wojciechowski, K. Walczak, M. White y W. Cellary, «Building virtual and augmented reality museum exhibitions,» en *Proceedings of the Ninth International Conference on 3D Web Technology*, New York, NY: ACM, 2004, págs. 135-144. DOI: 10.1145/985040.985060. dirección: <https://doi.org/10.1145/985040.985060>.
- [13] D. Quiñones, C. Rusu y V. Rusu, «A methodology to develop usability/user experience heuristics,» *Computer Standards & Interfaces*, vol. 59, págs. 109-129, 2018. DOI: 10.1016/j.csi.2018.03.002. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.03.002>.
- [14] R. T. Azuma, «A survey of augmented reality,» en *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, MIT Press, 1997, págs. 355-385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.
- [15] Google Developers. «ARCore Geospatial API Documentation.» Accedido: 2025-01-15. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/geospatial>.
- [16] M. K. Bekele, R. Pierdicca, E. Frontoni, E. S. Malinverni y J. Gain, «A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage,» *Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 11, n.º 2, págs. 1-36, 2018. DOI: 10.1145/3145534.
- [17] B. Shneiderman, C. Plaisant, M. Cohen, S. Jacobs, N. Elmqvist y N. Diakopoulos, *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*, 6th. Pearson, 2016, ISBN: 9780134438030.
- [18] J. J. Garrett, *The Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond*, 2nd. Berkeley, CA: New Riders, 2011, ISBN: 9780321683687.
- [19] D. Norman, *The Design of Everyday Things: Revised and Expanded Edition*. New York, NY: Basic Books, 2013, ISBN: 9780465050659.
- [20] F. Poux, Q. Valembois, C. Mattes, L. Kobbelt y R. Billen, «Initial User-Centered Design of a Virtual Reality Heritage System: Applications for Digital Tourism,» *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 16, pág. 2583, 2020. DOI: 10.3390/rs12162583. dirección: <https://doi.org/10.3390/rs12162583>.

- [21] R. G. Boboc, E. Băutu, F. Gîrbacia, N. Popovici y D.-M. Popovici, «Augmented Reality in Cultural Heritage: An Overview of the Last Decade of Applications,» *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 19, pág. 9859, 2022. DOI: 10.3390/app12199859. dirección: <https://doi.org/10.3390/app12199859>.

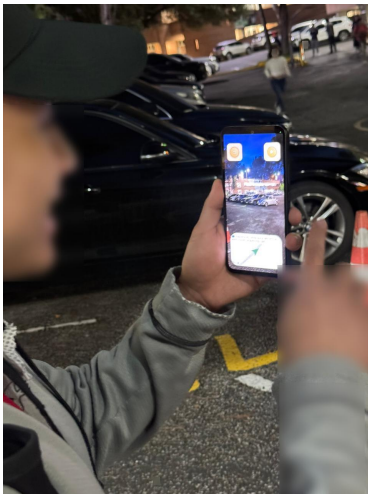
13.1. Anexo A: fotografías de las pruebas de usabilidad

Las siguientes fotografías documentan las sesiones de pruebas de usabilidad realizadas con estudiantes universitarios. Durante estas sesiones se evaluó la facilidad de uso, navegación y experiencia general de la aplicación de realidad aumentada para el Parque Arqueológico Kaminaljuyú.

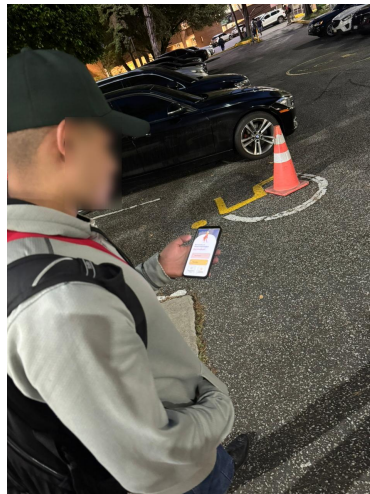
Figura 14. Sesión de prueba de usabilidad 1



Figura 15. Sesiones adicionales de pruebas de usabilidad realizadas con participantes en instalaciones universitarias



(a). sesión de prueba 2



(b). sesión de prueba 3

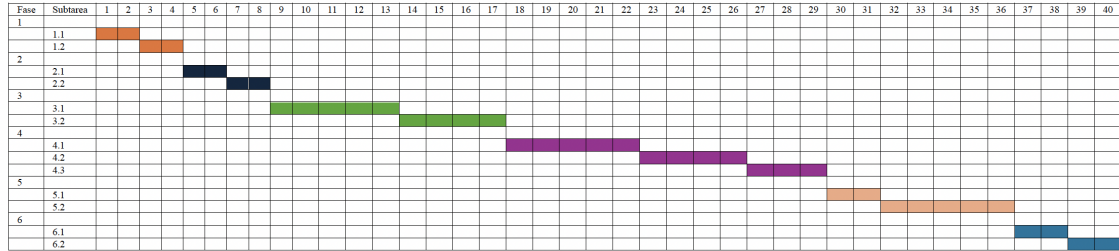


(c). sesión de prueba 4

13.2. Anexo B: cronograma del proyecto

El siguiente cronograma muestra las fases de desarrollo del proyecto, desde la investigación inicial hasta la documentación final del trabajo de graduación.

Figura 16. Cronograma de actividades del proyecto de desarrollo de la aplicación de realidad aumentada para Kaminaljuyú



Fase	Descripción	Subtarea
1	Investigación de usuarios	1.1 Observaciones en campo
		1.2 Entrevistas semiestructuradas
2	Definición de requerimientos	2.1 Análisis de información
		2.2 Definición de requerimientos
3	Diseño de prototipos	3.1 Prototipos de baja fidelidad y validaciones con usuarios.
		3.2 Prototipos de alta fidelidad y validaciones con usuarios
4	Implementación técnica	4.1 Desarrollo técnico inicial
		4.2 Integración con API y RA (ARCore)
		4.3 Optimización técnica
5	Pruebas de usabilidad	5.1 Primeras pruebas en campo
		5.2 Análisis y ajustes iterativos
6	Elaboración de reporte final	6.1 Redacción de recomendaciones
		6.2 Documentación del proceso y redacción de guía de mejoras e implementación.

13.3. Anexo C: repositorio del código fuente

El código fuente completo de la aplicación de realidad aumentada para el Parque Arqueológico Kaminaljuyú se encuentra disponible públicamente como contribución a la comunidad de desarrollo de aplicaciones para patrimonio cultural. El repositorio incluye la implementación completa de todas las funcionalidades descritas en este documento, desde la integración con ARCore Geospatial API hasta la interfaz de usuario diseñada bajo principios de UX/UI.

El repositorio contiene:

- Código fuente completo de la aplicación Android desarrollada en Kotlin
- Implementación de la integración con ARCore Geospatial API
- Componentes de interfaz de usuario y navegación
- Modelos 3D de las estructuras arqueológicas
- Recursos visuales y de contenido informativo
- Documentación técnica del proyecto
- Instrucciones detalladas de compilación y configuración
- Guías de instalación y despliegue

Este repositorio permite que otros desarrolladores, investigadores o instituciones culturales interesadas puedan estudiar la implementación, adaptarla a contextos similares o contribuir con mejoras al proyecto.

Acceso al repositorio

El repositorio está alojado en la plataforma GitHub bajo licencia de código abierto:

`https://github.com/mvrcentes/AR-Tour-Kaminaljuyu`

Se recomienda consultar el archivo README.md del repositorio para obtener información actualizada sobre requisitos del sistema, dependencias necesarias y procedimientos de instalación. El repositorio incluye también documentación sobre la arquitectura del código y comentarios explicativos que facilitan la comprensión de las decisiones técnicas implementadas.

