

---

# Geolocalización de montículos utilizando anclas de latitud, longitud y altitud en ARCore Geospatial API y definición de ruta clave para la experiencia de Realidad Aumentada desarrollada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú

---

Brian Anthony Carrillo Monzón



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**“Geolocalización de montículos utilizando anclas de latitud, longitud y altitud en ARCore Geospatial API y definición de ruta clave para la experiencia de Realidad Aumentada desarrollada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú”**

Trabajo de graduación presentado por Brian Anthony Carrillo Monzón  
para optar al grado académico de Licenciado en Ciencias de la  
Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**“Geolocalización de montículos utilizando anclas de latitud, longitud y altitud en ARCore Geospatial API y definición de ruta clave para la experiencia de Realidad Aumentada desarrollada en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú”**


Trabajo de graduación presentado por Brian Anthony Carrillo Monzón  
para optar al grado académico de Licenciado en Ciencias de la  
Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Dulce María Chacón Muñoz

(f)   
\_\_\_\_\_  
Licda. María Jimena Lucía Chocochic Arriaga

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

---

## Prefacio

---

Agradezco a Dios por permitirme culminar cinco años de estudios, en los que desde el primer día tuve la ilusión de aprender y crecer, así como de superarme día con día. Agradezco a las ingenieras Dulce María Chacón Muñoz y María Jimena Lucía Chocochoic Arriaga, quienes orientaron el proceso académico y técnico, por sus observaciones y sugerencias. Extiendo mi agradecimiento a mis compañeros de grupo Josué Morales, Carlos López, Claudia Velásquez, Luz Coronado y Marco Ramírez; quienes colaboraron en los aspectos de UI/UX, implementación de modelos, información arqueológica, evaluación de factibilidad y modelado 3D, respectivamente.

También agradezco a las autoridades y personal del Parque Arqueológico Kaminaljuyú por facilitar el acceso y el apoyo logístico necesario. Reconozco especialmente a las y los participantes que respondieron el formulario de usabilidad; sus aportes fueron decisivos para afinar la experiencia.

Dedico este esfuerzo a mi familia y amistades por su respaldo constante. Confío en que los resultados contribuyan a fortalecer iniciativas de interpretación del patrimonio y sirvan como base para futuros desarrollos que mejoren la orientación y el aprendizaje en espacios culturales.

<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>x</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>2</b>
2.1. Uso de ARCore Geospatial API para la representación de monumentos en Niš, Serbia . . . . .	2
2.2. Recorrido turístico inmersivo con ARCore en Singapur: “Merli’s Immersive Adventure” . . . . .	3
2.3. Proyecto KAN: realidad aumentada aplicada al patrimonio en Kaminaljuyú, Guatemala . . . . .	3
2.4. Xochicalco AR: realidad aumentada para piezas arqueológicas en Morelos, México . . . . .	4
2.5. Proyecto Scipio: recreación de la ciudad romana de Itálica con RA (España) . . . . .	4

<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>6</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	6
4.2. Objetivos específicos . . . . .	6
<b>5. Alcance</b>	<b>7</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>8</b>
6.1. API Geoespacial ARCore . . . . .	8
6.2. Integración de imágenes de Street View . . . . .	8
6.3. Determinación de latitud y longitud de una ubicación . . . . .	9
6.4. Anclajes geoespaciales . . . . .	9
6.5. Requisitos y sensores del dispositivo para ARCore . . . . .	9
6.6. Sistemas de referencia y geodesia práctica . . . . .	10
6.7. Distancia entre dos coordenadas: función de Haversine . . . . .	11
6.8. Navegación esférica: bearing geodésico inicial . . . . .	11
6.9. Altitud, terreno y asentamiento visual . . . . .	11
6.10. Exactitud, estabilidad y fusión sensorial . . . . .	12
6.11. Enrutamiento por puntos (waypoints) y lógica de llegada . . . . .	12
<b>7. Metodología</b>	<b>13</b>
7.1. Metodología de desarrollo . . . . .	13
7.2. Fases del proyecto . . . . .	13
7.2.1. Fase 1 – Levantamiento y verificación de datos geoespaciales . . . . .	13
7.2.2. Fase 2 – Configuración del entorno de desarrollo . . . . .	14
7.2.3. Fase 3 – Implementación de anclajes geoespaciales . . . . .	14
7.2.4. Fase 4 – Vinculación de activos 3D con anclajes geoespaciales . . . . .	14
7.2.5. Fase 5 – Diseño de la ruta guiada y navegación aumentada . . . . .	15
7.2.6. Fase 6 – Prueba piloto y validación . . . . .	15
7.2.7. Fase 7 – Documentación y entrega . . . . .	15

<b>8. Resultados</b>	<b>16</b>
8.1. Fase 1: levantamiento de coordenadas geográficas . . . . .	16
8.1.1. Definición de coordenadas para el recorrido en el parque arqueológico Kaminaljuyú . . . . .	16
8.2. Fase 2, 3 y 4: desarrollo, implementación de anclajes y vinculación de activos 3D	23
8.2.1. Geolocalización de puntos clave en el parque arqueológico Kaminaljuyú	23
8.3. Fase 5: diseño de la ruta guiada . . . . .	24
8.3.1. Puntos clave en el recorrido del parque arqueológico Kaminaljuyú . . .	24
8.4. Fase 6: prueba piloto y validación . . . . .	26
8.4.1. Definición de coordenadas para el recorrido de prueba en Universidad del Valle de Guatemala . . . . .	26
8.4.2. Puntos clave en el recorrido de prueba en Universidad del Valle de Guatemala . . . . .	27
8.4.3. Resultados de formulario sobre pruebas de usabilidad . . . . .	29
<b>9. Discusión de resultados</b>	<b>32</b>
<b>10. Conclusiones</b>	<b>34</b>
<b>11. Bibliografía</b>	<b>35</b>
<b>12. Anexos</b>	<b>37</b>
12.1. Anexo A: plan de tareas . . . . .	37
12.2. Anexo B: fotografías de pruebas de usabilidad . . . . .	40
12.3. Anexo C: cronograma de actividades . . . . .	41
12.4. Anexo D: repositorio de código . . . . .	41

---

## Lista de figuras

---

1.	Geolocalización de puntos de información y montículos 3 y 7 . . . . .	23
2.	Geolocalización de montículos 12, 13, 14 y estructura E . . . . .	24
3.	Grafo de puntos clave en el recorrido del parque arqueológico Kaminaljuyú . .	25
4.	Grafo de puntos clave utilizados en pruebas en la Universidad del Valle de Guatemala . . . . .	28
5.	Resultados en general sobre tareas evaluadas . . . . .	29
6.	Resultados sobre criterios de geolocalización . . . . .	30
7.	Pruebas de campo del prototipo en campus universitario . . . . .	40
8.	Cronograma de actividades del proyecto por fases . . . . .	41

---

## Lista de cuadros

---

1.	Puntos clave y coordenadas en el recorrido del parque arqueológico Kaminaljuyú	16
2.	Puntos de prueba y coordenadas utilizados en pruebas en la Universidad del Valle de Guatemala . . . . .	26
3.	Resultados porcentuales de tareas generales del recorrido (N=17) . . . . .	31
4.	Resultados porcentuales de criterios de geolocalización (N=17) . . . . .	31
5.	Listado de tareas y fechas . . . . .	37

Se desarrolla y valida una experiencia móvil de Realidad Aumentada para orientar a visitantes en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú mediante anclajes geoespaciales y una ruta secuencial guiada. El trabajo aborda el problema de ofrecer orientación y contenido interpretativo *in situ* sin instalar infraestructura adicional y bajo condiciones variables de señal y textura visual del entorno. El recorrido se delimita a doce puntos clave del parque enlazados por 70 waypoints.

Un piloto previo en campus universitario permitió afinar el conjunto de coordenadas y la lógica de navegación antes del despliegue en sitio. Los resultados muestran geolocalización operativa y continuidad de guía en campo. En un formulario de usabilidad con N=17, las tareas “iniciar recorrido”, “avanzar al siguiente montículo” y “finalizar con retorno” alcanzan 100% de éxito; “navegar al primer montículo” e “interactuar con el modelo 3D” logran 94.1% (16/17); “abrir información del montículo” obtiene 82.4% (14/17). En criterios de geolocalización, la ubicación consistente y la correspondencia de distancia registran 82.4% (14/17); la ubicación rápida al comenzar, la ausencia de saltos y el retorno comprensible, 88.2% (15/17); la claridad de la flecha, 70.6% (12/17).

Se concluye que el recorrido guiado con anclajes geoespaciales es viable para uso interpretativo en Kaminaljuyú. Se recomiendan ajustes concretos: reducir moderadamente el radio de llegada en tramos cortos, aumentar el suavizado angular para estabilizar la flecha, mejorar la visibilidad del acceso a la ficha informativa y aplicar pequeños offsets verticales donde la pendiente lo requiera, manteniendo la separación entre puntos de interés y nodos de tránsito.

## Abstract

This work develops and validates a mobile Augmented Reality experience to guide visitors at Kaminaljuyú Archaeological Park using geospatial anchors and a sequential guided route. It addresses the challenge of providing on-site orientation and interpretive content without installing additional infrastructure and under variable signal and visual-texture conditions. The route is limited to twelve key points in the park linked by 70 waypoints.

A prior pilot on a university campus refined the coordinate set and the navigation logic before field deployment. Results indicate operational geolocation and continuous guidance on site. In a usability questionnaire with  $N=17$ , the tasks “start the tour,” “move to the next mound,” and “finish with return” achieved 100 % success; “navigate to the first mound” and “interact with the 3D model” reached 94.1 % (16/17); “open mound information” obtained 82.4 % (14/17). For geolocation criteria, consistent placement and perceived distance correspondence reached 82.4 % (14/17); fast initial positioning, absence of directional jumps, and understandable return reported 88.2 % (15/17); arrow clarity recorded 70.6 % (12/17).

The guided tour based on geospatial anchors is feasible for interpretive use at Kaminaljuyú. Recommended adjustments include moderately reducing the arrival radius on short segments, increasing angular smoothing to stabilize the directional arrow, improving the visibility of the entry point to the information sheet, and applying small vertical offsets where slope requires it, while maintaining the separation between points of interest and transit nodes.

Este trabajo tiene como finalidad diseñar y validar una experiencia móvil de Realidad Aumentada para orientar a visitantes en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú mediante anclajes geoespaciales y navegación guiada. La propuesta busca demostrar la viabilidad técnica de ARCore Geospatial para interpretación patrimonial *in situ* y entregar un recorrido secuencial con puntos de interés priorizados.

El tema se delimita a la geolocalización y guiado peatonal sobre un conjunto acotado de montículos y estructuras del parque, definidos en WGS84 y enlazados por una ruta principal con retorno. Metodológicamente se adopta un enfoque incremental con ciclos de levantamiento, desarrollo y prueba. Se consolidan coordenadas verificadas en sitio, se implementan anclas geoespaciales y un HUD direccional, y se ajustan umbrales de inicio y llegada. La navegación se formaliza con waypoints y cálculo de distancia Haversine y rumbos geodésicos con normalización y suavizado angular. La evaluación combina comprobaciones funcionales en Kaminaljuyú y un piloto de usabilidad con 17 participantes en un entorno controlado. Los procedimientos incluyen: definición de la ruta por malla de waypoints con densidad variable; gestión del ciclo de vida de anclas; vinculación de activos 3D a identificadores geoespaciales; y medición de éxito de tareas y criterios de geolocalización mediante tablas porcentuales. Se fijan radios de inicio y llegada, zona muerta y límites de cambio direccional para estabilizar la flecha, y se documentan decisiones de configuración replicables en el repositorio (ver anexo 12.4).

Las conclusiones principales indican cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos en dos escenarios complementarios. En la Universidad del Valle de Guatemala se valida el flujo de levantamiento y anclaje; en Kaminaljuyú se materializa el recorrido con doce puntos clave enlazados por setenta waypoints, sin retrocesos y con cambios de rumbo graduales. En usabilidad, las tareas críticas alcanzan altos porcentajes de éxito, y los criterios de geolocalización reflejan ubicación consistente, correspondencia de distancia y retorno comprensible.

### **2.1. Uso de ARCore Geospatial API para la representación de monumentos en Niš, Serbia**

Tatić, Stanković y Goynov (2025) desarrollaron un sistema de realidad aumentada geoespacial aplicado al patrimonio cultural en la ciudad de Niš, Serbia. Este proyecto consistió en una aplicación móvil que permite a los visitantes interactuar con monumentos históricos mediante botones virtuales anclados con precisión geoespacial sobre los sitios reales.

Utilizando la API Geoespacial de ARCore, la aplicación combina sensores GPS con el sistema de posicionamiento visual de Google (VPS) para ubicar el contenido digital con alta exactitud, sin depender de marcadores físicos. Al tocar estos botones, el usuario accede a información multimedia, como imágenes, textos históricos y modelos 3D, directamente sobre el espacio patrimonial visitado. Esta implementación demostró que la RA geoespacial puede transformar al visitante en un participante activo en la exploración del patrimonio, y ofrecer una experiencia informativa inmersiva sin alterar físicamente los monumentos [1].

## **2.2. Recorrido turístico inmersivo con ARCore en Singapur: “Merli’s Immersive Adventure”**

La Junta de Turismo de Singapur, en colaboración con Google, lanzó una innovadora experiencia llamada “Merli’s Immersive Adventure”, que integra la tecnología de la API Geoespacial de ARCore con el entorno urbano para construir una narrativa cultural aumentada. Según Lai [2], el recorrido está guiado por un personaje animado llamado Merli y se lleva a cabo a través de una aplicación oficial que utiliza Geospatial Creator para anclar contenido interactivo 3D en seis sitios emblemáticos del país. Entre las escenas más destacadas se incluyen la recreación de un antiguo bote mercante en el río Singapur y un buzón colonial que permite enviar postales virtuales. Esta experiencia aprovecha datos visuales de Street View y la precisión geoespacial para contextualizar el patrimonio urbano sin necesidad de instalaciones físicas. Su éxito ha llevado a su expansión durante 2024, posicionándolo como un modelo replicable para turismo cultural inmersivo en otras regiones.

## **2.3. Proyecto KAN: realidad aumentada aplicada al patrimonio en Kaminaljuyú, Guatemala**

En Guatemala, el proyecto KAN ha representado un avance significativo en la aplicación de tecnologías inmersivas al patrimonio arqueológico. Según Garrido Flores [3], 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. 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.

## **2.4. Xochicalco AR: realidad aumentada para piezas arqueológicas en Morelos, México**

El Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) [4] desarrolló la aplicación Xochicalco AR con el objetivo de reforzar el vínculo entre el museo de sitio y la zona arqueológica de Xochicalco, Morelos. Esta aplicación gratuita para dispositivos móviles permite al visitante visualizar en RA piezas arqueológicas modeladas en 3D, ubicadas exactamente en el punto donde fueron halladas. Utilizando marcadores físicos distribuidos a lo largo del sitio, los visitantes pueden activar reconstrucciones virtuales que incluyen esculturas, incensarios y elementos arquitectónicos, acompañadas de fichas informativas y rutas sugeridas. La app fue descargada más de 1,600 veces en su primer año y cuenta con tres recorridos distintos. El proyecto ha sido destacado como una experiencia educativa innovadora que transforma la forma de interactuar con el patrimonio prehispánico.

## **2.5. Proyecto Scipio: recreación de la ciudad romana de Itálica con RA (España)**

En el Conjunto Arqueológico de Itálica, en Sevilla, se implementó el Proyecto Scipio, una aplicación móvil que utiliza RA para mostrar cómo lucían originalmente los espacios más emblemáticos de esta antigua ciudad romana. De acuerdo con Expósito-Barea et al. [5], la aplicación permite al visitante experimentar reconstrucciones digitales de sitios como el anfiteatro y las casas patricias, superpuestas sobre el entorno real. Estas reconstrucciones, renderizadas con tecnología de RA y elementos de realidad virtual 360°, están geolocalizadas en los puntos exactos donde se hallaban los edificios originales. La experiencia ha demostrado una notable mejora en la comprensión del sitio arqueológico por parte de los visitantes, convirtiéndose en un referente para el uso de RA como herramienta de interpretación y valorización del patrimonio.

---

### Justificación

---

La propuesta es viable y pertinente desde los aspectos técnico, económico, social, académico y operativo. Técnicamente, se apoya en ARCore Geospatial API, que fusiona sensores y visión por computadora para estimar la pose del dispositivo y fijar anclas en latitud, longitud y altitud, evitando marcadores físicos. Las tecnologías de Android/ARCore y OpenGL son estándar y bien documentadas.

En términos económicos, se minimiza infraestructura al prescindir de señalética y marcadores; los contenidos digitales son reutilizables y actualizables a bajo costo. El proyecto mejora la experiencia de visita y el conocimiento adquirido por parte del público, ofreciendo interpretación del patrimonio *in situ* sin elementos intrusivos. La ruta clave favorece la orientación autónoma del público, reduce la necesidad de señalética física y contribuye a la conservación al guiar los flujos por áreas permitidas.

Desde lo académico, el trabajo aporta una metodología replicable para anclaje geoespacial de modelos 3D en exteriores, articulada con una ruta secuencial. La recopilación de coordenadas GPS pueden ser de utilidad para futuros proyectos de realidad aumentada en el sitio. Se generan conocimientos sobre la interacción usuario-tecnología en contextos patrimoniales al aire libre, y se exploran estrategias de diseño de experiencias inmersivas y accesibles. La viabilidad operativa es alta: el alcance es acotado y un ciclo iterativo diseño–prueba–ajuste permite llegar a una versión funcional y evolucionarla con pilotos controlados antes de la validación en campo.

### 4.1. Objetivo general

Geolocalizar montículos utilizando anclas de latitud, longitud y altitud en ARCore Geospatial API y definir ruta clave para la experiencia de Realidad Aumentada a desarrollar en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú.

### 4.2. Objetivos específicos

- Identificar y registrar coordenadas geoespaciales con precisión de cada montículo relevante en Kaminaljuyú para garantizar una alineación precisa y estable de las reconstrucciones digitales con las estructuras del mundo real mediante la realización de estudios detallados e integración de la API geoespacial de ARCore.
- Crear y gestionar anclajes geoespaciales de superposiciones de realidad aumentada para brindar a los visitantes una experiencia de Realidad Aumentada consistente y confiable en diferentes puntos de vista implementando el modo geoespacial de ARCore, la gestión del ciclo de vida de los anclajes y el desarrollo en Android.
- Definir una ruta principal para los visitantes a través de Kaminaljuyú, vinculando las ubicaciones críticas de los montículos en una secuencia lógica, asegurando que los visitantes puedan seguir una progresión intuitiva, georreferenciando cada punto e integrando estas coordenadas en una superposición de navegación.

El proyecto consiste en una aplicación de Realidad Aumentada para Android que, con ARCore Geospatial API, ancla contenidos 3D mediante coordenadas de latitud, longitud y altitud y guía al visitante por una ruta clave secuencial en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú. El conjunto de puntos se define en WGS84 y se gestiona el ciclo de vida de las anclas geoespaciales. La navegación se basa en *waypoints* con llegada por distancias Haversine, orientación por *bearing* geodésico con normalización y suavizado, y una fase de retorno al inicio. La configuración define parámetros operativos específicos, tales como `GUIDED_ARRIVAL_METERS` y `TOUR_START_RADIUS_METERS`, además de establecer el punto de inicio para optimizar el sistema según las características del sitio arqueológico.

Las coordenadas utilizadas provienen de fuentes internas verificadas para fines interpretativos y las pruebas se realizan en áreas permitidas y en condiciones ambientales razonables. La evaluación se realiza mediante un cuestionario de usabilidad aplicado a las tareas, con posterior análisis descriptivo de los resultados. El control de versiones se gestiona a través del repositorio del proyecto.

El alcance asume dispositivos compatibles con ARCore y condiciones de campo favorables (cielo abierto, textura visual, posible disponibilidad de VPS). No se persigue precisión centimétrica; la alineación vertical puede requerir *offsets* locales y no se aplican correcciones por geode ni modelos de terreno de alta resolución. El realce visual se limita a elementos básicos sin sombreado físico avanzado ni oclusiones completas. No se instala infraestructura física (balizas o señalética), puesto que el funcionamiento depende de sensores del dispositivo y de conectividad para el componente geoespacial; la compatibilidad se restringe a Android con Google Play Services for AR. Se asume que la persona usuaria otorga permisos de cámara y ubicación y dispone de servicios habilitados, así como que existe cobertura mínima de datos.

### 6.1. API Geoespacial ARCore

Un aspecto central de este proyecto es el uso de la API Geoespacial ARCore de Google, que proporciona una herramienta robusta para experiencias de Realidad Aumentada precisas basadas en la ubicación. Según Google [6], la API geoespacial de ARCore permite a los desarrolladores anclar objetos virtuales en coordenadas reales, garantizando así que las reconstrucciones digitales se posicionen con precisión. Esta API aprovecha una combinación de datos de sensores y GPS para detección del entorno del dispositivo, así como técnicas de visión artificial e imágenes existentes de Street View para mejorar la localización de dispositivos en base de billones de puntos 3D de referencia. Todo esto a través de un Sistema de Posicionamiento Visual (VPS por sus siglas en inglés) que tiene por base miles de millones de imágenes recolectadas a lo largo de los años, y que hace uso de redes neuronales profundas para la identificación del posicionamiento y orientación del dispositivo. Esta capacidad es crucial en entornos donde la interacción entre estructuras naturales y construidas exige precisión posicional.

### 6.2. Integración de imágenes de Street View

La integración de imágenes de Street View en la experiencia de Realidad Aumentada es capaz de perfeccionar aún más el proceso de localización. Mediante técnicas de posicionamiento visual, ARCore puede comparar la señal de la cámara en vivo con las imágenes panorámicas disponibles en Street View para reducir la desviación, típica del posicionamiento GPS estándar. Este método de coincidencia visual mejora la precisión espacial de las aplicaciones de Realidad Aumentada [6].

### 6.3. Determinación de latitud y longitud de una ubicación

La documentación de Google ARCore [7] establece cuatro maneras en que es posible establecer las coordenadas de las ubicaciones de interés:

- Utilizar Geospatial Creator, el cual coloca el contenido 3D en base a anclajes geoespaciales en áreas cubiertas por Google Street View.
- Utilizar la aplicación Google Maps desde el computador.
- Realizar mediciones en la ubicación física.

### 6.4. Anclajes geoespaciales

Los anclajes geoespaciales permiten colocar contenido 3D en cualquier latitud, longitud y altitud con precisión, específicamente en las áreas cubiertas por Google Street View. Existen tres tipos principales definidos por la documentación de Google ARCore [8]:

- Anclajes WGS84
- Anclajes de terreno (Terrain Anchors)
- Anclajes para techos (Roof Anchors)

El ancla WGS84 especifica la posición real de un objeto en términos de latitud, longitud y altitud. Este utiliza el marco de referencia WGS84, el cual es un estándar global utilizado por GPS y otras tecnologías geoespaciales [9]. Por otra parte, el ancla de terreno es un tipo de ancla que permite colocar objetos de Realidad Aumentada solo con la latitud y la longitud, aprovechando la información de los VPS para encontrar la altitud precisa sobre el suelo. En la API Geoespacial de ARCore, los anclajes de terreno ofrecen una opción muy útil para conectar objetos virtuales a la superficie del terreno, en lugar de depender únicamente de las coordenadas geoespaciales tradicionales (latitud, longitud, altitud). Por lo tanto, cuando la altitud es cero, el ancla estará nivelada con el terreno en cuestión. Los anclajes de techo son un tipo de anclaje y son muy similares a los anclajes de terreno anteriormente descritas. La diferencia radica en que se debe proporcionar la altitud sobre la azotea de un edificio conocido por Google, en lugar de la altitud sobre el terreno. Tanto el anclaje de terreno como el anclaje para techos debe ser resuelto, por lo que este tipo de anclas no estarán listas de inmediato [7].

### 6.5. Requisitos y sensores del dispositivo para ARCore

El funcionamiento de ARCore depende de capacidades mínimas de hardware y software del dispositivo. En términos generales, Google mantiene un listado de equipos compatibles que han sido validados para *motion tracking*, estimación de luz y, cuando aplica, profundidad [10]. Desde la perspectiva de ingeniería, los componentes relevantes son:

- **IMU triaxial** (acelerómetros y giroscopios): proveen mediciones de velocidad angular y aceleración específica para la estimación de la pose por integración inercial a corto plazo, crucial para el seguimiento entre imágenes de cámara [11].
- **Magnetómetro** (brújula digital): permite estimar el rumbo absoluto respecto al Norte magnético; su uso está sujeto a calibración y puede degradarse por interferencias locales. En RA móvil suele combinarse con visión y giroscopio para mitigar sesgos [11].
- **Cámara RGB y parámetros intrínsecos**: necesaria para *visual-inertial odometry* y para el Posicionamiento Visual (VPS) cuando se usa la API Geoespacial [12].
- **Sensor de profundidad (ToF/estéreo) o Depth API**: no es estrictamente obligatorio para Geospacial, pero habilita estimaciones de profundidad más robustas para colocación y oclusiones cuando el hardware es compatible [13].
- **GNSS** (GPS, GLONASS, Galileo, etc.): aporta posicionamiento absoluto requerido por la componente geoespacial; la precisión práctica depende de la constelación, el entorno y la fusión con visión.
- **CPU/GPU y soporte gráfico**: capacidad de ejecutar gráficos en tiempo real (OpenGL ES 3.0+ o Vulkan) y redes de visión; la compatibilidad está sujeta a pruebas de rendimiento por fabricante [14].
- **Sistema operativo y servicios**: versiones de Android y Servicios de Google Play para RA acordes a la matriz de compatibilidad vigente [14].

La IMU estabiliza el seguimiento entre fotogramas y la fusión con magnetómetro y GNSS establece la orientación absoluta y la posición global. La calidad del guiado direccional depende así de la correcta calibración de la IMU y la brújula, de la textura visual del entorno y de la disponibilidad de señal satelital y/o VPS.

## 6.6. Sistemas de referencia y geodesia práctica

Para trabajar con posiciones en la Tierra se utilizan coordenadas geodésicas  $(\varphi, \lambda, h)$  sobre un elipsoide de referencia. El estándar de facto en navegación y cartografía web es WGS 84, utilizado también por GNSS. En aplicaciones móviles resulta común aproximar cálculos sobre una esfera de radio medio  $R$  para obtener métricas rápidas (p. ej., distancias cortas y rumbos), y recurrir a soluciones sobre el elipsoide cuando se requiere mayor exactitud [15]. Dos marcos locales relevantes son: (i) ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed), sistema cartesiano con origen en el centro de masas terrestre, y (ii) ENU (East-North-Up), marco tangente local cuyo eje  $+x$  apunta al Este,  $+y$  al Norte y  $+z$  hacia arriba; ambos se usan ampliamente en navegación integrada GNSS/IMU [11]. ENU es útil para expresar vectores relativos y orientaciones cercanas al usuario.

## 6.7. Distancia entre dos coordenadas: función de Haversine

Para una aproximación esférica, la distancia sobre arco entre dos puntos  $P_1(\varphi_1, \lambda_1)$  y  $P_2(\varphi_2, \lambda_2)$  se calcula con Haversine, robusta para ángulos pequeños [16]:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1, \quad (1)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right), \quad (2)$$

$$c = 2 \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}), \quad (3)$$

$$d = Rc. \quad (4)$$

Donde  $R$  es el radio de la Tierra asumido (por ejemplo,  $R = 6,371$  km). Para recorridos de cientos de metros a algunos kilómetros, el error respecto a un modelo elipsoidal suele ser despreciable en aplicaciones de guiado peatonal [15].

## 6.8. Navegación esférica: bearing geodésico inicial

Dados dos puntos  $P_1$  y  $P_2$ , en radianes (latitudes  $\varphi_1, \varphi_2$  y longitudes  $\lambda_1, \lambda_2$ ), el rumbo inicial (*initial bearing* o *forward azimuth*) desde  $P_1$  hacia  $P_2$  sobre una esfera se obtiene mediante la forma de `atan2` que evita ambigüedades de cuadrante [17]; para elipsoide, formulaciones análogas se resuelven con algoritmos robustos propuestos por Karney [18]. En el caso esférico, la expresión es la siguiente:

$$\theta = \operatorname{atan2}(\sin\Delta\lambda \cos\varphi_2, \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Delta\lambda). \quad (5)$$

Se normaliza a grados en  $[0, 360)$  mediante  $\theta_{\text{deg}} = (\theta \frac{180}{\pi} \bmod 360)$  [17]. Este ángulo se interpreta con  $0^\circ = \text{Norte}$  y  $90^\circ = \text{Este}$ . En el sistema de RA, la orientación visual del indicador se obtiene comparando el *bearing* con el *heading* de la cámara y aplicando una normalización corta para evitar saltos de  $\pm 180^\circ$ ; en recorridos de campo, esta práctica reduce jitter y mantiene continuidad angular incluso cuando el *heading* cambia rápidamente [11]:

$$\operatorname{wrap}_{180}(\alpha) = ((\alpha + 180) \bmod 360) - 180. \quad (6)$$

## 6.9. Altitud, terreno y asentamiento visual

El componente  $h$  (altitud elipsoidal) difiere de la altura ortométrica (sobre geoide) y de la elevación del terreno en un modelo digital. En experiencias AR, pequeñas discrepancias en  $h$  producen la percepción de objetos “flotantes”. Dos estrategias comunes son: (i) usar anclajes de terreno como los descritos por Google [8], y (ii) aplicar un desplazamiento local  $\Delta h$  calibrado para asentar el modelo en el plano visual del suelo.

## 6.10. Exactitud, estabilidad y fusión sensorial

La posición entregada por plataformas móviles surge de la fusión de GNSS, IMU y visión. Sus errores incluyen ruido aleatorio, sesgos, *multipath* y pérdidas temporales de observabilidad [11]. Métricas útiles son el error horizontal (mediana/P90), el tiempo a estado de seguimiento (TRACKING) y la deriva temporal del ancla.

## 6.11. Enrutamiento por puntos (waypoints) y lógica de llegada

Un recorrido peatonal puede modelarse como una secuencia ordenada de puntos  $\{P_i\}_{i=1}^N$ . Para cada paso, el objetivo activo es  $P_k$  y se evalúa la condición de llegada  $d(P_{\text{cam}}, P_k) \leq r_{\text{arriba}}$ , donde  $r_{\text{arriba}}$  es un umbral acorde a la exactitud disponible (p. ej., 40 m). La orientación visual se actualiza con el bearing (5) y el estado de interfaz habilita acciones (información, siguiente) al cumplirse la proximidad. Al completar  $P_N$ , el objetivo se redefine como el punto de inicio para la fase de retorno. Esta lógica reduce la carga cognitiva respecto a mostrar múltiples objetivos simultáneamente y mejora la eficacia de la navegación [19].

## **7.1. Metodología de desarrollo**

Se adoptó una metodología incremental e iterativa con prototipado en sitio, orientada a la experiencia del visitante y guiada por datos; dividida en tareas para su desarrollo en el tiempo provisto (ver anexos 12.1 y 12.3). Cada ciclo incluyó: (i) planificación y levantamiento geoespacial en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú (Ciudad de Guatemala); (ii) desarrollo de un incremento mínimo viable en Android con ARCore Geospatial; (iii) pruebas con usuarios en un entorno controlado; y (iv) ajuste de umbrales y comportamiento de la interfaz (flecha HUD, estados de ruta). Este enfoque equilibró la precisión geoespacial y la robustez de navegación frente a las limitaciones reales de sensores GNSS/IMU y la disponibilidad de VPS en el sitio.

En la base geodésica se aplicó Haversine para estimar distancias y el rumbo geodésico inicial para orientar la flecha, con normalización angular y suavizado para mitigar ruido [16, 17, 18]. El posicionamiento y la orientación del dispositivo se sustentaron en ARCore Geospatial (Earth Tracking, Geospatial Pose y Anchors), verificando compatibilidad de los dispositivos y condiciones de iluminación/entorno [12, 13].

## **7.2. Fases del proyecto**

### **7.2.1. Fase 1 – Levantamiento y verificación de datos geoespaciales**

Se consolidaron coordenadas de montículos y puntos de interés bajo WGS84 a partir de recorridos en el Parque Arqueológico Kaminaljuyú utilizando herramientas de captura de datos geoespaciales (Google Earth/Maps).

La información se depuró mediante normalización de formato y verificación directa sobre el terreno durante jornadas espaciadas a lo largo del desarrollo. La tolerancia operativa quedó acotada por el rendimiento típico de GNSS en teléfonos y por la asistencia visual de ARCore; sobre esa base se fijaron las fórmulas para distancia y rumbo, que sirvieron de referencia para toda la navegación [16, 17].

### **7.2.2. Fase 2 – Configuración del entorno de desarrollo**

Se preparó el proyecto nativo con Gradle y Kotlin en Android Studio, integrando ARCore Geospatial y Google Play Services for AR. Se declararon las dependencias de AR y desde la Google Cloud Console se activó la ARCore API Geospatial, generando una clave restringida por SHA-1 y por bundle ID, y añadiéndola a los archivos Manifest.xml. La compatibilidad de sensores y soporte de ARCore se verificó en los dispositivos destinados a pruebas, habilitando permisos de cámara y ubicación desde el inicio para evitar bloqueos en campo [12, 13]. La base del código se organizó en módulos claros: utilidades geodésicas, renderizado con HUD y gestión de estados de ruta, favoreciendo aislamiento y mantenibilidad.

### **7.2.3. Fase 3 – Implementación de anclajes geoespaciales**

Los puntos de interés se plasmaron con anclajes geoespaciales asociados a coordenadas WGS84 [12]. La disponibilidad de Earth Tracking y los indicadores de precisión de ARCore guiaron la activación de interacciones dentro de la app. Para la orientación del visitante se adoptó la flecha en HUD, estrategia que resultó más robusta en presencia de ruido, variaciones de iluminación y oclusiones, manteniendo la legibilidad en distintas distancias.

### **7.2.4. Fase 4 – Vinculación de activos 3D con anclajes geoespaciales**

Los modelos asociados a montículos se ligaron a anclajes geoespaciales definidos en WGS84, garantizando correspondencia uno a uno entre identificadores de punto de interés y recursos 3D. La posición y orientación de cada activo se derivaron del marco local provisto por ARCore a partir del anclaje, aplicando unidades en metros, pivote en la base del modelo y eje vertical coherente con la gravedad. Se ajustó una elevación relativa para coincidir con la cota del terreno y se mantuvo un desplazamiento mínimo para respetar la silueta arqueológica.

La activación de cada recurso se condicionó a proximidad, evitando carga y render innecesario a grandes distancias y preservando rendimiento en dispositivos destino. La verificación en campo incluyó corrección de offsets tras recorridos de prueba hasta alcanzar alineación consistente.

### **7.2.5. Fase 5 – Diseño de la ruta guiada y navegación aumentada**

La experiencia se modeló en forma de secuencia ordenada de waypoints, incluyendo montículos y nodos intermedios. En cada cuadro de render se calculó el rumbo hacia el siguiente punto y su diferencia respecto al heading del usuario, con normalización angular y suavizado mediante zona muerta y paso máximo para evitar jitter en la flecha. Se establecieron umbrales operativos coherentes con el entorno: radio de inicio de **20 m** y llegada guiada a **10 m**, criterios que habilitan contenido y marcan avance sin falsos positivos por ruido en la posición. El flujo de avance confirmó cada llegada al ingresar en el radio y seleccionó el punto siguiente manteniendo continuidad.

### **7.2.6. Fase 6 – Prueba piloto y validación**

Las sesiones con usuarios se realizaron en el campus de la Universidad del Valle de Guatemala, bajo un entorno controlado y con coordenadas predefinidas que representaron puntos de interés del recorrido (ver anexo 12.2). Los 17 participantes completaron tareas de navegación hasta objetivos señalados; se registraron percepciones mediante escalas Likert y SEQ, y se verificó el cumplimiento de tareas y la claridad de la señalética en HUD. El análisis se centró en la experiencia reportada y en la observación directa del comportamiento de la orientación [19].

En el Parque Arqueológico Kaminaljuyú se efectuaron comprobaciones funcionales visuales: aparición correcta de objetos, dirección de la flecha hacia el siguiente punto y consistencia de la ruta con el grafo planificado. La aceptación se resolvió con base en los resultados del cuestionario en campus y en la confirmación visual de funcionamiento en sitio, manteniendo los umbrales de llegada e inicio establecidos y ajustando parámetros sólo cuando la experiencia de uso lo sugirió.

### **7.2.7. Fase 7 – Documentación y entrega**

Se generó un APK para pruebas en sitio, acompañada del código fuente y documentación técnica. Los artefactos de evaluación —cuestionarios, datos y guías— quedaron organizados para facilitar la reproducibilidad.

## 8.1. Fase 1: levantamiento de coordenadas geográficas

### 8.1.1. Definición de coordenadas para el recorrido en el parque arqueológico Kaminaljuyú

Cuadro 1. Puntos clave y coordenadas en el recorrido del parque arqueológico Kaminaljuyú

Punto	Descripción	Coordenadas (lat, lon)
<b>Inicio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entrada principal del parque arqueológico Kaminaljuyú.</li> <li>▪ Punto de referencia inicial para calibración del mapa y posicionamiento global.</li> </ul>	14.63128471 , -90.54847717
<b>Información del parque</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nodo de inicio del recorrido experimental.</li> <li>▪ Usado para establecer la primera ancla geoespacial en el entorno y proveer información introductoria sobre el parque.</li> </ul>	14.63131332 -90.54845428

Cuadro 1 (continuación)

Punto	Descripción	Coordenadas (lat, lon)
<b>Acrópolis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Utilizado para muestra de información histórica y cultural relevante.</li> </ul>	14.632549261303337, -90.54889359532447
<b>Montículo 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Punto de interés para superposición de modelos 3D de referencia histórica.</li> </ul>	14.633263117257021, -90.54812859260066
<b>Montículo 5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Utilizado para muestra de información histórica y cultural relevante.</li> </ul>	14.632555675181031, -90.54807733211727
<b>Montículo 7</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Punto de interés para superposición de modelos 3D de referencia histórica.</li> </ul>	14.632234919514932, -90.54800651965228
<b>Montículo 6</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Utilizado para muestra de información histórica y cultural relevante.</li> </ul>	14.631895407440561, -90.54859084940932
<b>Montículo 8</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Utilizado para muestra de información histórica y cultural relevante.</li> </ul>	14.631888413377396, -90.54808529662705
<b>Montículo 12</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>■ Punto de interés para superposición de modelos 3D de referencia histórica.</li> </ul>	14.631110755220972, -90.54816619269748

Cuadro 1 (continuación)

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coordenadas (lat, lon)</b>
<b>Montículo 13</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>▪ Punto de interés para superposición de modelos 3D de referencia histórica.</li> </ul>	14.630593990926299, -90.54696166473626
<b>Montículo 14</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>▪ Punto de interés para superposición de modelos 3D de referencia histórica.</li> </ul>	14.630711961676731, -90.54730060527463
<b>Palangana</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Depresión o zona baja dentro del parque.</li> <li>▪ Estructura central del conjunto arqueológico.</li> <li>▪ Punto de interés para superposición de modelos 3D de referencia histórica.</li> </ul>	14.630813964263574, -90.54760512338584
<b>Waypoint 1</b>		14.63141060, - 90.54846954
<b>Waypoint 2</b>		14.63158607, - 90.54853058
<b>Waypoint 3</b>		14.63171482, - 90.54850769
<b>Waypoint 4</b>		14.63184834, - 90.54848480
<b>Waypoint 5</b>		14.63199234, - 90.54843903
<b>Waypoint 6</b>		14.63208675, - 90.54845428
<b>Waypoint 7</b>		14.63213348, - 90.54851532
<b>Waypoint 8</b>		14.63215160, - 90.54857635
<b>Waypoint 9</b>		14.63217735, - 90.54860687
<b>Waypoint 10</b>		14.63232803, - 90.54868317

Cuadro 1 (continuación)

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coordenadas (lat, lon)</b>
Waypoint 11		14.63245583, - 90.54875183
Waypoint 12		14.63252068, - 90.54873657
Waypoint 13		14.63262844, - 90.54869843
Waypoint 14		14.63270664, - 90.54861450
Waypoint 15		14.63281822, - 90.54849243
Waypoint 16		14.63291645, - 90.54841614
Waypoint 17		14.63302231, - 90.54831696
Waypoint 18		14.63315487, - 90.54814911
Waypoint 19		14.63302803, - 90.54804230
Waypoint 20		14.63293839, - 90.54796600
Waypoint 21		14.63282394, - 90.54795837
Waypoint 22		14.63269615, - 90.54794312
Waypoint 23		14.63256359, - 90.54798889
Waypoint 24		14.63241768, - 90.54798126
Waypoint 25		14.63225842, - 90.54789734
Waypoint 26		14.63218307, - 90.54788971
Waypoint 27		14.63209438, - 90.54796600
Waypoint 28		14.63202286, - 90.54804993

Cuadro 1 (continuación)

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coordenadas (lat, lon)</b>
<b>Waypoint 29</b>		14.63189411, - 90.54812622
<b>Waypoint 30</b>		14.63174248, - 90.54814148
<b>Waypoint 31</b>		14.63163948, - 90.54816437
<b>Waypoint 32</b>		14.63151836, - 90.54818726
<b>Waypoint 33</b>		14.63139534, - 90.54819489
<b>Waypoint 34</b>		14.63113403, - 90.54820251
<b>Waypoint 35</b>		14.63098431, - 90.54824829
<b>Waypoint 36</b>		14.63087177, - 90.54821014
<b>Waypoint 37</b>		14.63079166, - 90.54817963
<b>Waypoint 38</b>		14.63071537, - 90.54816437
<b>Waypoint 39</b>		14.63071251, - 90.54811096
<b>Waypoint 40</b>		14.63066578, - 90.54807281
<b>Waypoint 41</b>		14.63062763, - 90.54802704
<b>Waypoint 42</b>		14.63066769, - 90.54792023
<b>Waypoint 43</b>		14.63069344, - 90.54781342
<b>Waypoint 44</b>		14.63075733, - 90.54759216
<b>Waypoint 45</b>		14.63063622, - 90.54764557
<b>Waypoint 46</b>		14.63058567, - 90.54766846

Cuadro 1 (continuación)

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coordenadas (lat, lon)</b>
Waypoint 47		14.63052845, - 90.54768372
Waypoint 48		14.63046169, - 90.54771423
Waypoint 49		14.63039017, - 90.54770660
Waypoint 50		14.63041973, - 90.54763794
Waypoint 51		14.63045216, - 90.54757690
Waypoint 52		14.63045502, - 90.54750824
Waypoint 53		14.63044548, - 90.54742432
Waypoint 54		14.63059425, - 90.54727173
Waypoint 55		14.63068390, - 90.54722595
Waypoint 56		14.63066864, - 90.54715729
Waypoint 57		14.63061810, - 90.54702759
Waypoint 58		14.63037395, - 90.54730988
Waypoint 59		14.63033676, - 90.54745483
Waypoint 60		14.63038635, - 90.54757690
Waypoint 61		14.63036823, - 90.54768372
Waypoint 62		14.63043118, - 90.54778290
Waypoint 63		14.63052559, - 90.54791260
Waypoint 64		14.63059330, - 90.54804230

Cuadro 1 (continuación)

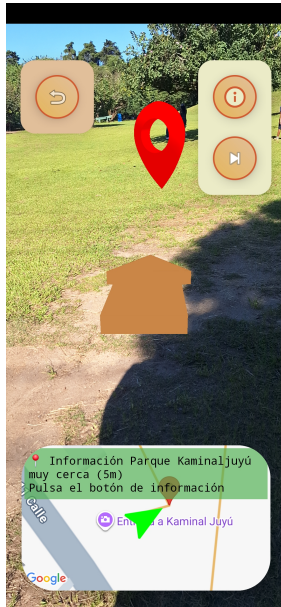
<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coordenadas (lat, lon)</b>
<b>Waypoint 65</b>		14.63059330, - 90.54804230
<b>Waypoint 66</b>		14.63072681, - 90.54820251
<b>Waypoint 67</b>		14.63078117, - 90.54824829
<b>Waypoint 68</b>		14.63089085, - 90.54828644
<b>Waypoint 69</b>		14.63104153, - 90.54838562
<b>Waypoint 70</b>		14.63119030, - 90.54845428

*Nota. Elaboración propia.*

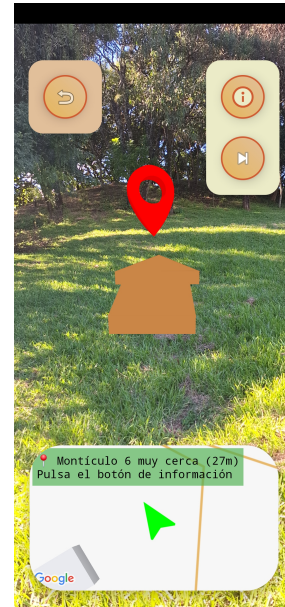
## 8.2. Fase 2, 3 y 4: desarrollo, implementación de anclajes y vinculación de activos 3D

### 8.2.1. Geolocalización de puntos clave en el parque arqueológico Kaminaljuyú

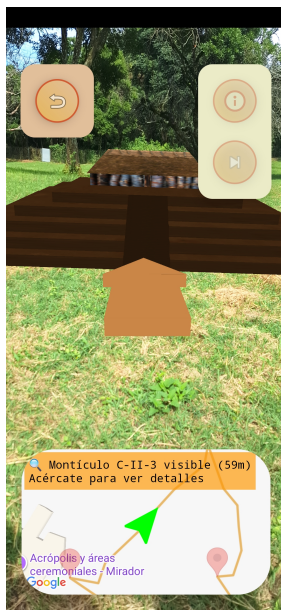
Figura 1. Geolocalización de puntos de información y montículos 3 y 7



(a) Punto de información del parque.



(b) Información sobre el montículo 6.



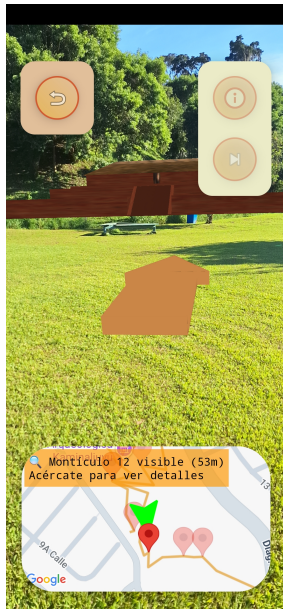
(c) Montículo 3.



(d) Montículo 7.

*Nota. Elaboración propia.*

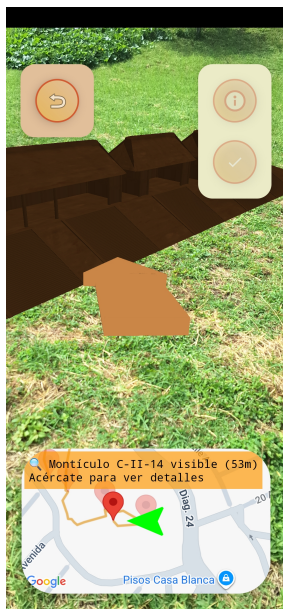
Figura 2. Geolocalización de montículos 12, 13, 14 y estructura E



(a) Montículo 12.



(b) Montículo 13.



(c) Montículo 14.



(d) Estructura E.

*Nota. Elaboración propia.*

### 8.3. Fase 5: diseño de la ruta guiada

#### 8.3.1. Puntos clave en el recorrido del parque arqueológico Kaminaljuyú



## 8.4. Fase 6: prueba piloto y validación

### 8.4.1. Definición de coordenadas para el recorrido de prueba en Universidad del Valle de Guatemala

Cuadro 2. Puntos de prueba y coordenadas utilizados en pruebas en la Universidad del Valle de Guatemala

Punto	Descripción	Coordenadas (lat, lon)
<b>Inicio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Punto inicial del recorrido; corresponde al acceso principal utilizado para la calibración inicial del mapa.</li><li>▪ Sirve como referencia de orientación y punto de partida para las rutas de prueba.</li></ul>	14.60480777105515, -90.48900944304138
<b>Waypoint 1</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Nodo intermedio cercano al punto de inicio.</li><li>▪ Utilizado para verificar transición y estabilidad del tracking en el eje este-oeste.</li></ul>	14.604810, -90.488920
<b>POI 1</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Primer punto de interés dentro del recorrido.</li><li>▪ Marca un montículo o elemento arqueológico visible desde el acceso principal.</li></ul>	14.604840, -90.488650
<b>Waypoint 2</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Posición intermedia asociada a POI 1 para validar precisión VPS.</li><li>▪ Permite ajuste fino del ángulo de orientación de los modelos 3D.</li></ul>	14.604934289866199, -90.48872195774246
<b>POI 2</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Segundo punto de interés; emplazado al noreste de POI 1.</li><li>▪ Utilizado para pruebas de distancia y sincronización de anclas geoespaciales.</li></ul>	14.605090, -90.488630

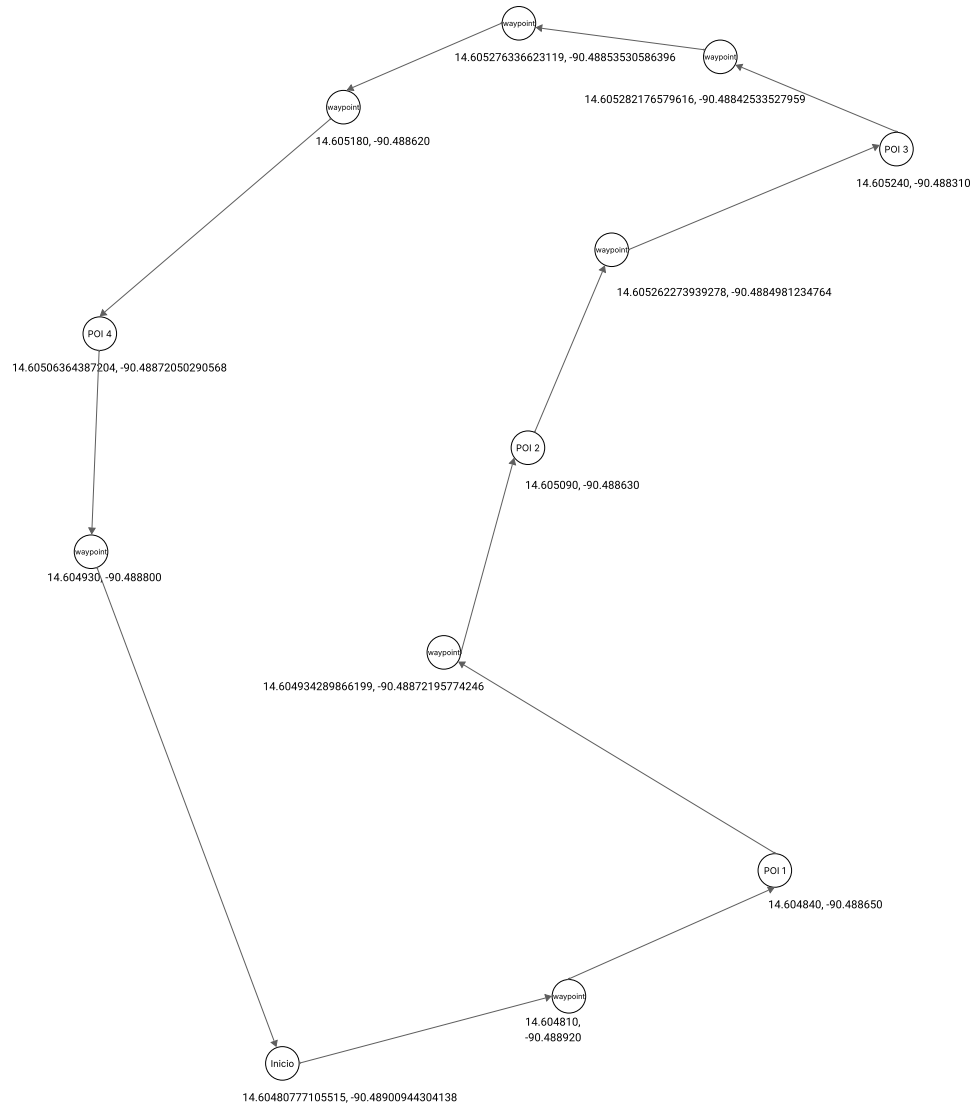
Cuadro 2 (continuación)

Punto	Descripción	Coordenadas (lat, lon)
<b>Waypoint 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nodo auxiliar entre POI 2 y POI 3.</li> <li>■ Permite transición suave del mapa y evita saltos de geolocalización.</li> </ul>	14.605262273939278, -90.4884981234764
<b>POI 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Tercer punto de interés con cobertura visual directa.</li> <li>■ Asociado a pruebas de renderizado de modelos de mayor escala.</li> </ul>	14.605240, - 90.488310
<b>Waypoint 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Posición auxiliar que enlaza segmentos entre POI 3 y POI 4.</li> </ul>	14.605282176579616, -90.48842533527959
<b>Waypoint 5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sirve de control visual y de estabilidad.</li> </ul>	14.605276336623119, -90.48853530586396
<b>Waypoint 6</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Presenta coordenadas muy próximas a otros puntos de la misma sección.</li> </ul>	14.605180, - 90.488620
<b>POI 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Quinto punto de interés en la ruta de pruebas.</li> <li>■ Utilizado para medición de tiempos de carga y cambio de textura.</li> </ul>	14.60506364387204, -90.48872050290568
<b>Waypoint 7</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Último waypoint del recorrido experimental.</li> <li>■ Marca la sección final utilizada para evaluar estabilidad del tracking y alineación geodésica.</li> </ul>	14.604930, - 90.488800

*Nota. Elaboración propia.*

#### 8.4.2. Puntos clave en el recorrido de prueba en Universidad del Valle de Guatemala

Figura 4. Grafo de puntos clave utilizados en pruebas en la Universidad del Valle de Guatemala



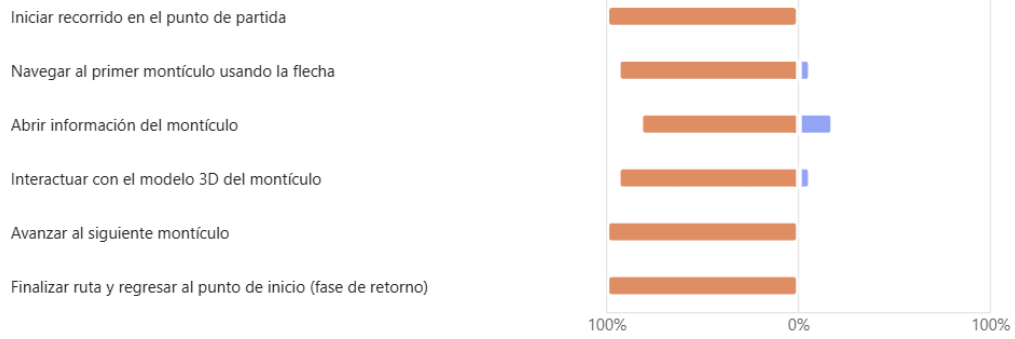
### 8.4.3. Resultados de formulario sobre pruebas de usabilidad

Figura 5. Resultados en general sobre tareas evaluadas

5. En general, ¿pudiste completar las siguientes tareas? (0 punto)

[Más detalles](#)

● Sí ● No



*Nota. Elaboración propia.*

Figura 6. Resultados sobre criterios de geolocalización

6. ¿Se cumplieron los siguientes criterios? (0 punto)

[Más detalles](#)

● Sí ● No

La ubicación de los montículos fue consistente con su posición real en el entorno.

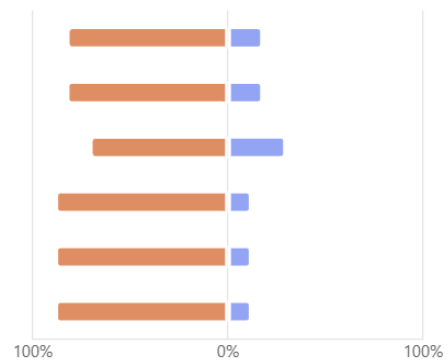
La distancia mostrada/proximidad percibida coincidió razonablemente con mi experiencia al acercarme.

La flecha de dirección apuntó de forma clara hacia el montículo objetivo.

El retorno al punto de inicio fue fácil de comprender y seguir.

No sentí saltos o inestabilidad notoria en la dirección indicada.

La app me ubicó con rapidez suficiente al comenzar.



*Nota. Elaboración propia.*

Cuadro 3. Resultados porcentuales de tareas generales del recorrido (N=17)

Tarea	Sí (n)	Sí (%)	No (n)	No (%)
Iniciar recorrido en el punto de partida	17	100	0	0
Navegar al primer montículo usando la flecha	16	94.1	1	5.9
Abrir información del montículo	14	82.4	3	17.6
Interactuar con el modelo 3D del montículo	16	94.1	1	5.9
Avanzar al siguiente montículo	17	100	0	0
Finalizar ruta y regresar al punto de inicio (retorno)	17	100	0	0

*Nota. Elaboración propia.*

Cuadro 4. Resultados porcentuales de criterios de geolocalización (N=17)

Criterio	Sí (n)	Sí (%)	No (n)	No (%)
La ubicación de los montículos fue consistente con su posición real	14	82.4	3	17.6
La distancia mostrada/proximidad percibida coincidió razonablemente	14	82.4	3	17.6
La flecha de dirección apuntó claramente al montículo objetivo	12	70.6	5	29.4
El retorno al punto de inicio fue fácil de comprender y seguir	15	88.2	2	11.8
No sentí saltos o inestabilidad notoria en la dirección indicada	15	88.2	2	11.8
La app me ubicó con rapidez suficiente al comenzar	15	88.2	2	11.8

*Nota. Elaboración propia.*

---

## Discusión de resultados

---

La definición de coordenadas en la Universidad del Valle de Guatemala opera como piloto controlado para validar el flujo de levantamiento, normalización WGS84 y uso de anclas geoespaciales. El recorrido integró un punto de inicio, puntos de interés y siete *waypoints* que conforman un trayecto compacto y seguro (véase el Cuadro 2), suficiente para evaluar continuidad de navegación y comprensión espacial por parte de la persona usuaria.

El patrón espacial observado en el grafo evidencia un camino conectado sin retrocesos innecesarios y con transiciones cortas a medias, favoreciendo cambios de orientación graduales y un indicador direccional estable (véase la Figura 4). La separación entre POI y *waypoints* desacopla el posicionamiento de contenidos de la lógica de la ruta, manteniendo la guía estable sin exigir que los modelos 3D coincidan con los nodos de paso. La proximidad entre *waypoints* cercanos al inicio permite calibrar radios de llegada y mensajes de estado, evitando activaciones múltiples en segmentos muy cortos. Estos casos confirman que umbrales de pocos metros equilibran receptividad y especificidad sin requerir precisión centimétrica, además de reducir cambios erráticos de orientación del indicador. La altitud requirió de pequeños *offsets* verticales para mejorar coherencia perceptual. En conjunto, la prueba piloto redujo riesgo para el despliegue en el sitio arqueológico al anticipar ajustes de orientación, radios de llegada y tratamientos ante condiciones de campo.

El trazado de coordenadas en Kaminaljuyú organiza un recorrido peatonal continuo que enlaza puntos de interés arqueológico con segmentos de tránsito cortos y medianos. El conjunto documentado en el Cuadro 1 prioriza accesos reconocibles como el inicio e información del parque, y conecta montículos principales mediante una malla densa de 70 *waypoints*. El grafo correspondiente (Figura 3) confirma una geometría sin retrocesos, con cambios de rumbo graduales que favorecen la orientación del usuario y la estabilidad del indicador direccional. La alta densidad de *waypoints* en el tramo inicial cumple dos fines: acelerar la estabilización tras el arranque y suavizar giros alrededor de intersecciones visibles desde la entrada.

A medida que el recorrido avanza hacia montículos centrales, el espaciado se incrementa y los segmentos se vuelven más largos, lo que permite evaluar continuidad de navegación y transición entre POI sin oscilaciones del rumbo.

La evidencia fotográfica confirma que la selección de puntos de referencia facilita la geolocalización estable en el sitio. En los accesos e inmediaciones del punto de información, la convergencia del posicionamiento resulta rápida gracias al cielo abierto y a la abundancia de texturas del entorno; las vistas de los montículos 3 y 7 muestran alineaciones consistentes entre la flecha direccional, el mapa y el posicionamiento de los contenidos, lo que refuerza la percepción de continuidad espacial (véase la Figura 1). En áreas con vegetación más densa o con fondos menos texturizados —como en los montículos 12, 13 y 14— la estabilización tarda un poco más y se observan pequeñas variaciones en la orientación inicial. Aun así, la navegabilidad se mantiene y el acercamiento progresivo al objetivo corrige las derivas locales (véase la Figura 2).

En términos generales, los resultados del formulario muestran que las tareas principales del recorrido se completan con altas tasas de éxito. De acuerdo con el Cuadro 3 y la Figura 5, iniciar el recorrido, avanzar entre montículos y finalizar con el retorno al punto de inicio alcanzan niveles cercanos al 100 % de cumplimiento, lo que sugiere que la estructura del flujo y la segmentación del trayecto resultan comprensibles. El desempeño se mantiene alto en navegación hacia el primer objetivo y en la interacción con el modelo 3D.

Los criterios de geolocalización confirman la estabilidad funcional del sistema con algunos márgenes de mejora. Tal como se observa en el Cuadro 4 y la Figura 6, la ubicación rápida al comenzar, la ausencia de saltos en la dirección indicada y la comprensión del retorno reportan porcentajes altos y consistentes con la experiencia observada en campo. La claridad de la flecha direccional aparece como el criterio más exigente para los usuarios; este comportamiento es coherente con tramos que combinan giros cortos, proximidad entre nodos y posibles interferencias, lo que puede introducir pequeñas oscilaciones en la orientación percibida.

La lectura conjunta de tareas y criterios sugiere ajustes puntuales antes de un despliegue con público general. Una reducción moderada del umbral de llegada en segmentos muy cortos, junto con mayor suavizado angular y reglas de actualización menos sensibles a cambios pequeños de rumbo, puede estabilizar la flecha sin comprometer la capacidad de respuesta. Estos hallazgos deben leerse considerando el tamaño muestral reportado ( $N=17$ ) y las condiciones de campo en las que se levantaron las respuestas. Aun con esas limitaciones, el patrón de resultados apunta a una experiencia de navegación robusta y a una geolocalización suficientemente estable para el propósito interpretativo, con oportunidades claras de afinamiento en la orientación visual y en la exposición de contenidos.

- El objetivo general de geolocalizar montículos con ARCore Geospatial API y definir una ruta clave se cumplió en dos escenarios complementarios. En UVG se valida el flujo de levantamiento y normalización WGS84 con un recorrido compacto de inicio, POI y siete *waypoints* (Cuadro 2), y en Kaminaljuyú se implementa el recorrido completo con doce puntos clave —inicio, información del parque, Acrópolis, Palangana y montículos 3, 5, 6, 7, 8, 12, 13 y 14— enlazados por 70 *waypoints* (Cuadro 1).
- Respecto al objetivo de identificar y registrar coordenadas para una alineación precisa de contenidos, la evidencia indica estabilidad suficiente para uso interpretativo. Por otra parte, los resultados de usabilidad muestran completitud alta de tareas dependientes de anclaje y orientación. Estos valores confirman que la lógica de anclaje y la continuidad del recorrido resultan operables en campo, por lo que se cumplió el objetivo de crear y gestionar anclajes geoespaciales.
- Para el objetivo de definir una ruta principal secuencial, la malla de 70 *waypoints* valida una estrategia de densidad variable. En consecuencia, se concluye que la ruta cumple su función de orientación.

En resumen, los objetivos planteados se alcanzaron con éxito, estableciendo una base sólida para futuras mejoras y aplicaciones en experiencias de Realidad Aumentada basadas en anclajes geoespaciales.

## Bibliografía

- [1] D. Tatić, R. Stanković y M. Goynov, «Usage of geospatial augmented reality for the representation of national heritage,» en *Digital Presentation and Preservation of Cultural and Scientific Heritage*, vol. 15, 2025, págs. 99-106.
- [2] E. Lai. «Discover Singapore through an immersive augmented reality tour.» Accedido: 2025-04-22. dirección: <https://blog.google/around-the-globe/google-asia/singapore-arcore-stb/>
- [3] R. Garrido Flores, «Aplicación de Realidad Aumentada con tecnología 3D para apoyar a la industria turística de Guatemala,» inf. téc., 2021, Informe técnico del Proyecto KAN, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT).
- [4] Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). «Xochicalco y su museo de sitio integran la realidad aumentada para fortalecer la experiencia de las y los visitantes [Boletín de prensa No. 735].» Accedido: 2025-03-12. dirección: <https://www.inah.gob.mx/images/boletines/2024/735/Boletin%20735.pdf>
- [5] M. M. Expósito-Barea, F. J. Gómez-Pérez y J. P. Pérez-Rufí, «El proyecto Scipio: Realidad aumentada en el conjunto arqueológico de Itálica,» *Hipertext.net*, n.º 25, págs. 137-149, 2022. DOI: 10.31009/hipertext.net.2022.i25.13 dirección: <https://doi.org/10.31009/hipertext.net.2022.i25.13>
- [6] Google. «ARCore geospatial API documentation.» Accedido: 2025-01-29. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/geospatial>
- [7] Google. «Creador geoespacial.» Accedido: 2025-06-02. dirección: <https://developers.google.com/ar/geospatialcreator?hl=es-419>
- [8] Google. «Check VPS availability at the device's current location.» Accedido: 2025-04-18. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/java/geospatial/overview#vps>
- [9] National Geospatial-Intelligence Agency. «World Geodetic System 1984 (WGS-84).» Accedido: 2025-06-14. dirección: <https://earth-info.nga.mil>

- [10] Google. «ARCore supported devices.» Accedido: 2025-02-03. dirección: <https://developers.google.com/ar/devices>
- [11] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, 2nd. Artech House, 2013.
- [12] Google. «ARCore Geospatial API: Developer Guide.» Accedido: 2025-04-27. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/geospatial>
- [13] Google. «ARCore Depth API Overview.» Accedido: 2025-02-03. dirección: <https://developers.google.com/ar/develop/depth>
- [14] Google. «ARCore requirements and APK (Google Play Services for AR).» Accedido: 2025-02-03. dirección: <https://developers.google.com/ar>
- [15] T. Vincenty, «Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations,» *Survey Review*, vol. 23, n.º 176, págs. 88-93, 1975. DOI: 10.1179/sre.1975.23.176.88
- [16] R. W. Sinnott, «Virtues of the Haversine,» *Sky and Telescope*, vol. 68, n.º 2, pág. 159, 1984.
- [17] J. P. Snyder, *Map Projections: A Working Manual* (Professional Paper 1395). Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1987.
- [18] C. F. F. Karney, «Algorithms for Geodesics,» *Journal of Geodesy*, vol. 87, n.º 1, págs. 43-55, 2013. DOI: 10.1007/s00190-012-0578-z
- [19] International Organization for Standardization, *ISO 9241-11:2018 Ergonomics of human-system interaction – Part 11: Usability: Definitions and concepts*, 2018.

## 12.1. Anexo A: plan de tareas

Cuadro 5. Listado de tareas y fechas

# Tarea	Descripción	Fecha
1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Revisión de literatura existente.</li> <li>■ Marcado preliminar de montículos en Google Earth/Maps.</li> </ul>	3 febrero – 14 febrero
1.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verificación de cobertura VPS (estados OK/LOCALIZING &lt; 2 m).</li> <li>■ Para cada montículo: captura de <i>screenshots</i> con lat/lon reportada y estado VPS; registro fotográfico de contexto y obstáculos.</li> </ul>	17 febrero – 28 febrero
1.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Visita <i>in situ</i> y carga del datos en el proyecto.</li> <li>■ Consolidación de puntos con cobertura aceptable.</li> <li>■ Normalización a WGS-84; añadido de metadatos (ID, nombre, <code>modelPath</code>, <code>texturePath</code>).</li> </ul>	3 marzo – 7 marzo

Cuadro 5 (continuación)

# Tarea	Descripción	Fecha
2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Creación de repositorio Git y proyecto Android Studio.</li> <li>■ Activación de ViewBinding y configuración Gradle (KTS).</li> </ul>	10 marzo – 14 marzo
2.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Alta de proyecto en Google Cloud y habilitación de ARCore/Maps.</li> <li>■ Generación de claves API (SHA-1 y <code>packageName</code>).</li> <li>■ Inserción en <code>google_maps_api.xml</code> y <code>AndroidManifest.xml</code>; validación de ARCore Services.</li> </ul>	17 marzo – 21 marzo
3.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gestión de anclas geoespaciales WGS84 con <i>EarthObjectManager</i>; colocación cuando TRACKING.</li> <li>■ Mapa: alta de marcadores por POI al confirmar anclas.</li> <li>■ Ajustes de orientación/escala por POI (offsets del modelo).</li> </ul>	24 marzo – 18 abril
3.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Calibración de altitud (offset local) y pruebas de estabilidad/deriva.</li> <li>■ Eliminación del enfoque <i>FallbackAnchorManager</i>; sustitución por mensajes de estado y reintentos controlados.</li> </ul>	21 abril – 9 mayo
4.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Incorporación de modelos 3D en <code>assets</code>; pruebas de render.</li> <li>■ Implementación de puntos de referencia en mapa y resaltado de marcadores activos.</li> </ul>	12 mayo – 4 julio
5.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Definición de ruta clave (<i>way-points</i>) y estados de proximidad.</li> <li>■ Minimapa con Google Maps; actualización de pose/heading y distancia.</li> </ul>	7 julio – 1 agosto

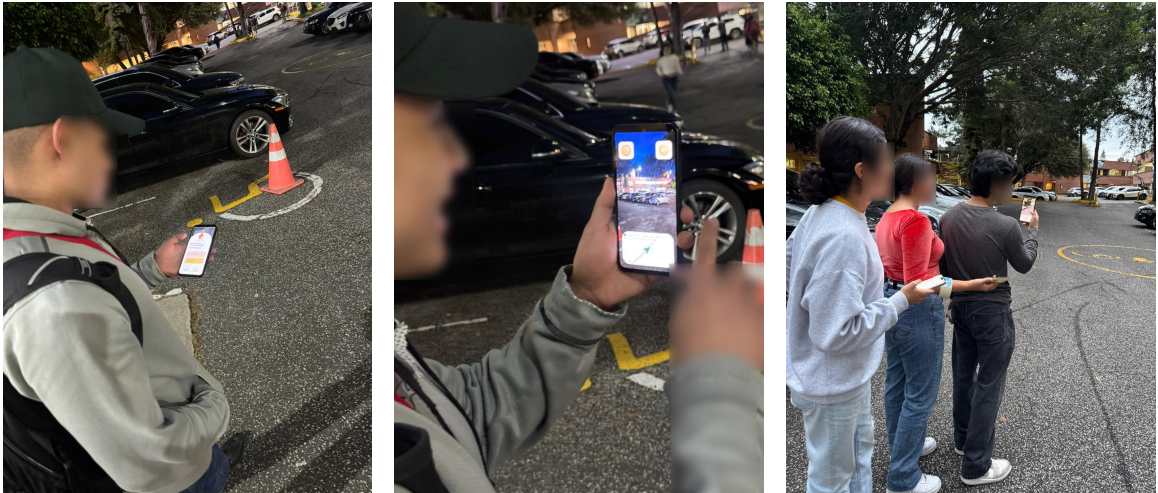
Cuadro 5 (continuación)

# Tarea	Descripción	Fecha
5.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flecha HUD 3D (<i>ArrowIndicator</i>) siempre visible frente a cámara.</li> <li>■ Orientación por bearing geodésico y normalización a <math>\pm 180^\circ</math>; suavizado con límite de giro y <i>deadzone</i>.</li> <li>■ Ajuste de parámetros (distancia HUD, offsets, textura).</li> </ul>	4 agosto – 12 septiembre
6.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Corrección de puntos críticos: latencia, legibilidad de textos, consistencia de orientación.</li> <li>■ Ajustes de umbrales de proximidad e interfaz.</li> </ul>	15 septiembre – 26 septiembre
6.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Definición de ruta de prueba en el campus de la Universidad del Valle de Guatemala.</li> <li>■ Reclutamiento de usuarios de prueba; aplicación de cuestionario.</li> <li>■ Registro de respuestas.</li> </ul>	29 septiembre – 17 octubre
7.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Redacción de documento técnica y capítulos de trabajo escrito.</li> <li>■ Elaboración de video demostrativo.</li> </ul>	20 octubre – 14 noviembre
7.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entrega de APK y repositorio con documentación.</li> </ul>	17 noviembre – 28 noviembre (planificado)

*Nota. Elaboración propia.*

## 12.2. Anexo B: fotografías de pruebas de usabilidad

Figura 7. Pruebas de campo del prototipo en campus universitario



(a) Uso de la app en campo.

(b) Detalle de la pantalla.

(c) Observación del flujo de uso.



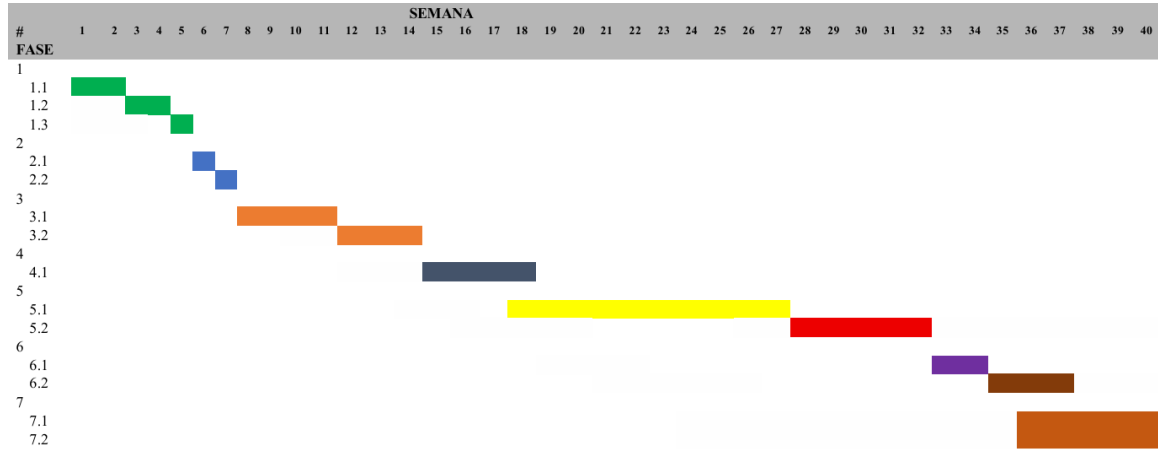
(d) Participantes mostrando resultados.

*Nota. Elaboración propia.*

## 12.3. Anexo C: cronograma de actividades

El cronograma resumió los hitos por fases, incluyendo levantamiento, desarrollo de anclajes, integración de activos, diseño de la navegación, validación y cierre. La Figura 8 presenta la distribución temporal.

Figura 8. Cronograma de actividades del proyecto por fases



*Nota. Elaboración propia.*

## 12.4. Anexo D: repositorio de código

El código fuente del proyecto, junto con la documentación técnica y las instrucciones de compilación, está disponible en el siguiente repositorio público de GitHub:

<https://github.com/mvrcentes/AR-Tour-Kaminaljuyu>

