

Integración de modelos BIM con realidad aumentada como estrategia de apoyo para la visualización de elementos constructivos en campo

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Integración de modelos BIM con realidad aumentada como estrategia de apoyo para la visualización de elementos constructivos en campo

Llevado a cabo por la estudiante:

Araya Ramírez Jazmín

Carné: 2020058998

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el martes 16 de diciembre de 2025 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

TEC

Tecnológico
de Costa Rica

Firmado digitalmente por
JOSE ANDRES ARAYA
OBANDO (FIRMA)
Fecha: 2025.12.19 12:23:18
-06'00'

Dr. Ing. José Andrés Araya Obando
Director de la Escuela

LEONARDO JOSUE
TORRES HERNANDEZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
LEONARDO JOSUE TORRES
HERNANDEZ (FIRMA)
Fecha: 2025.12.17 18:00:12
-06'00'

Ing. Leonardo Torres Hernández
Profesor Guía

MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2025.12.18
14:37:16 -06'00'

Ing. Mauricio Araya Rodríguez
Profesor Lector

MILTON ANTONIO
SANDOVAL QUIROS
(FIRMA)

Firmado digitalmente por MILTON
ANTONIO SANDOVAL QUIROS
(FIRMA)
Fecha: 2025.12.17 17:12:18 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Observador

Resumen

La investigación aborda la integración de la realidad aumentada (RA) con la metodología Building Information Modeling (BIM) como herramienta para optimizar la gestión visual y el control en proyectos constructivos. Surge ante la necesidad de fortalecer la vinculación entre los modelos digitales y el entorno físico durante la fase de ejecución, mejorando la interpretación espacial y la coordinación entre los distintos actores de obra. El objetivo principal fue integrar una herramienta de realidad aumentada con modelos BIM, desarrollada en Unity y Vuforia, para la visualización de elementos constructivos en campo. La metodología incluyó una revisión sistemática del estado del arte, la identificación de requerimientos técnicos y la validación del prototipo en un entorno real. Los resultados demostraron la viabilidad técnica y funcional del sistema, evidenciando una reducción de errores en la interpretación del diseño y en la ubicación de los elementos constructivos gracias a la proyección tridimensional del modelo sobre el espacio físico. No obstante, se identificaron limitaciones asociadas a la precisión del anclaje y a las condiciones lumínicas. En conclusión, la investigación confirma que la integración RA–BIM aplicada a sistemas constructivos representa un avance significativo en la mejora del entorno visual de supervisión.

Palabras clave: Realidad aumentada, construcción, BIM, gestión de proyectos, transformación digital

Abstract

The research deals with the integration of Augmented Reality (AR) with the methodology Building Information Modeling as a tool for optimizing visual management and controlling construction projects. Arise from the need to strengthen the link between digital models and the physical environment throughout the execution phase, improving spatial interpretation and coordination between the different participants on the construction site. The main objective was to integrate an augmented reality tool with BIM models, developed in Unity and Vuforia, for the visualization of constructive elements on site. The methodology included a systematic review of the state of the art, the identification of technical requirements, and the validation of the prototype in a real-life environment. The results demonstrated the technical viability and the system's functionality, proving a reduction of mistakes in the interpretation of the design and in locating constructive elements thanks to the three-dimensional projection of the model on the physical space. Nevertheless, limitations associated with the anchoring accuracy and lighting conditions were identified. In conclusion, the research confirms that the integration of RA-BIM applied to constructive systems represents a significant progress in the improvement of the visual monitoring environment.

Keywords: Augmented reality, construction, BIM, project management, digital transformation

Integración de modelos BIM con realidad aumentada como estrategia de apoyo para la visualización de elementos constructivos en campo

ARAYA RAMÍREZ JAZMÍN JULIANA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONTENIDO

Resumen	ii
Abstract.....	iii
Contenido.....	v
Glosario.....	viii
Resumen ejecutivo	8
Introducción	11
Capítulo 1: Marco teórico	13
1.1 TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LA CONSTRUCCIÓN	14
1.2 GESTIÓN DE PROYECTOS Y METODOLOGÍAS MODERNAS.....	16
1.3 VISUALIZACIÓN Y MODELOS DIGITALES.....	17
1.4 TECNOLOGÍAS INMERSIVAS APLICADAS A LA CONSTRUCCIÓN	18
1.4.1 Ejemplo de aplicación de la realidad aumentada en la construcción	22
1.4.2 Ejemplo de aplicación de la realidad virtual en la construcción	23
1.5 HERRAMIENTAS Y PLATAFORMAS PARA RA-BIM	24
1.6 INTEGRACIÓN RA-BIM EN PROYECOS CONSTRUCTIVOS	26
1.7 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	27
Capítulo 2: Metodología.....	28
Capítulo 3: Resultados	37
3.1 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES TÉCNICAS, OPERATIVAS Y FUNCIONALES	37
3.1.1 Limitaciones actuales de trabajar con planos tradicionales y barreras técnicas para la RA	38
3.1.2 Etapas y áreas estratégicas de aplicación de la RA	39
3.1.3 Elementos BIM prioritarios para la proyección en campo la RA	41
3.1.4 Beneficios esperados de la implementación de RA-BIM.....	42
3.1.5 Factores de éxito y disposición de los usuarios	43
3.1.6 Matriz de necesidades técnicas operativas y funcionales	46
3.1.7 Recomendaciones iniciales para el diseño de la herramienta RA-BIM	48

3.2 REVISIÓN SISTEMÁTICA DEL ESTADO DEL ARTE EN LA INTEGRACIÓN RA-BIM EN CONSTRUCCIÓN	50
3.2.1 Apartado de revisión técnica y bibliográfica clasificada por área temáticas	50
3.2.1.1 Visualización de modelos 3D y Modelado Digital	51
3.2.1.2 Control de Calidad, Inspección y Ejecución de Obra	52
3.2.1.3 Capacitación, Seguridad y Transferencia de Conocimiento	54
3.2.1.4 Planificación, Coordinación y Gestión de Proyectos	55
3.2.2 Fichas técnicas de casos de uso de RA aplicada a la construcción	56
3.2.3 Cuadro comparativo de herramientas tecnológicas RA-BIM	59
3.2.4 Lista priorizada de buenas prácticas y requisitos técnicos	62
3.3 DESARROLLO DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE HERRAMIENTA RA-BIM	65
3.3.1 Prototipo funcional de la herramienta de RA	68
3.3.2 Código fuente y repositorio organizado	79
3.3.2.1 Preparación del modelo BIM	79
3.3.2.2 Integración del modelo en Unity	80
3.3.2.3 Desarrollo funcional de la aplicación	81
3.3.2.4 Validación y pruebas del prototipo	81
3.3.3 Principales resultados y dificultades del proceso de desarrollo	83
3.3.4 Manual de usuario técnico	84
3.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA RA-BIM MEDIANTE UN CASO PILOTO EN ENTORNO REAL DE OBRA ..	86
3.4.1 Descripción general del caso piloto.....	86
3.4.2 Metodología de validación	89
3.4.2.1 Preparación del entorno de validación	89
3.4.2.2 Ejecución de la prueba en campo	89
3.4.2.3 Registro y análisis de resultados	90
3.4.3 Resultados de la validación.....	91
3.4.4 Ajustes al flujo RA-BIM según resultados y comparativa pre/post implementación.....	93

Capítulo 4: Análisis de resultados	97
4.1 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES TÉCNICAS, OPERATIVAS Y FUNCIONALES	97
4.2 REVISIÓN SISTEMÁTICA DEL ESTADO DEL ARTE EN LA INTEGRACIÓN RA-BIM EN CONSTRUCCIÓN	99
4.3 DESARROLLO DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE HERRAMIENTA RA-BIM	101
4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA RA-BIM MEDIANTE UN CASO PILOTO EN ENTORNO REAL DE OBRA	102
Conclusiones	106
Recomendaciones	108
Referencias	109
Apéndices	112
Anexos	128

Glosario

- **Anclaje (Anchoring):** Acción mediante la cual un modelo virtual queda fijado sobre una superficie o punto específico del entorno físico. Es esencial para garantizar que el elemento digital permanezca estable incluso cuando el usuario se desplaza o mueve el dispositivo.
- **AR Foundation:** Paquete de Unity que proporciona todos los GameObjects y clases que se necesita para desarrollar rápidamente experiencias interactivas de AR.
- **ARCore / ARKit:** Sistemas nativos de RA para Android (ARCore) y iOS (ARKit). Proveen la capacidad de detectar planos, estimar profundidad, reconocer superficies, rastrear movimiento y determinar la posición y orientación del dispositivo en tiempo real.
- **ARM64:** Arquitectura de 64 bits para procesadores móviles. Unity exige esta arquitectura en compilaciones modernas para Android, ya que mejora el rendimiento, reduce el consumo de energía y permite ejecutar aplicaciones más complejas, como las desarrolladas en RA.
- **C#:** Lenguaje de programación principal utilizado en Unity para implementar lógica, interacciones, controladores de interfaz y comportamiento dinámico de objetos en la escena.
- **Canvas:** Componente fundamental del sistema UI de Unity encargado de renderizar y organizar los elementos de interfaz gráfica en pantalla. Actúa como el contenedor principal de botones, textos, paneles y controles interactivos, adaptándose a la resolución del dispositivo y permitiendo interfaces escalables.
- **EventSystem:** Mecanismo de Unity que gestiona la interacción del usuario con la interfaz. Controla la detección de eventos táctiles, clics, selección de objetos UI y navegación.
- **Framework:** Conjunto estructurado de herramientas, bibliotecas y funcionalidades que permiten desarrollar software siguiendo una arquitectura o lógica común. En el contexto RA-BIM, AR Foundation es un framework que estandariza la forma de crear aplicaciones de RA multiplataforma.
- **Google ARCore XR Plugin:** Es el marco de realidad aumentada de Android. AR Foundation se comunica con ARCore para obtener funciones de AR en dispositivos Android.
- **Hierarchy:** Panel fundamental de Unity donde se organiza y visualiza la estructura de todos los objetos presentes en la escena. Permite gestionar relaciones padre-hijo, activar o desactivar objetos, agrupar elementos y controlar el orden lógico de la escena.
- **IA (Inteligencia Artificial):** Conjunto de técnicas que permiten que un sistema realice tareas que normalmente requieren inteligencia humana.
- **IL2CPP:** Backend de scripting utilizado por Unity para convertir el código C# en código nativo (C++), lo cual incrementa la velocidad de ejecución, mejora la seguridad y reduce la carga en dispositivos móviles.

- **MobileTemplateAssets:** Conjunto de recursos prediseñados incluidos en Unity para facilitar la construcción de interfaces adaptadas a dispositivos móviles. Incluye estilos, prefabs, sprites, layouts y configuraciones optimizadas para pantallas táctiles, permitiendo estandarizar la UI en aplicaciones Android e iOS.
- **Motor Gráfico:** Software base encargado de gestionar renderizado, físicas, iluminación, materiales y animaciones dentro de un entorno 3D. Unity es el motor gráfico utilizado en el desarrollo de la aplicación RA-BIM.
- **OpenGL ES3:** API gráfica utilizada para renderizar contenido 3D en dispositivos Android. Es estable y ampliamente compatible, por lo que suele seleccionarse para aplicaciones de RA al ofrecer buena performance y reducir errores en la inicialización del renderizado.
- **Pipeline:** Secuencia de pasos técnicos mediante la cual se transforman los modelos BIM desde su origen hacia un formato optimizado para su uso en RA (Blender → Unity). Incluye reducción de polígonos, depuración de geometrías, reasignación de materiales y creación de prefabs.
- **Prefab:** Objeto digital reutilizable dentro de Unity que encapsula mesh, materiales, componentes y comportamientos. Permite instanciar modelos múltiples veces, mantener consistencia y optimizar la carga de recursos durante la ejecución.
- **SDK (Software Development Kit):** Conjunto de herramientas, librerías, documentación y utilidades que permiten desarrollar aplicaciones sobre una plataforma o tecnología específica. En este contexto, Vuforia es un SDK especializado en RA basada en marcadores.
- **Tracking / Seguimiento:** Proceso mediante el cual el sistema calcula constantemente la posición, orientación y movimiento del dispositivo en relación con el entorno físico. La estabilidad del tracking es fundamental para mantener alineados los modelos virtuales con el mundo real.
- **UI Adaptativa:** Diseño de interfaz que se ajusta automáticamente al tamaño de pantalla, resolución, orientación y proporciones del dispositivo.
- **Unity:** Motor de desarrollo multiplataforma ampliamente utilizado para crear aplicaciones 2D, 3D y de RA. Permite gestionar escenas, materiales, físicas, animaciones y lógica mediante scripts en C#.
- **Vuforia:** SDK especializado en RA basado en marcadores. Permite detectar imágenes, códigos QR o patrones y superponer objetos digitales, textos o animaciones en tiempo real sobre ellos.
- **Vulkan:** API gráfica avanzada diseñada para ofrecer un rendimiento más eficiente. Fue deshabilitada en la configuración de compilación debido a incompatibilidades con ciertos dispositivos Android y errores en la inicialización de la cámara AR.
- **XR Interaction Toolkit:** Conjunto de herramientas de Unity para gestionar interacciones de usuario en entornos XR (AR y VR). Proporciona componentes listos para usar, como selección de objetos, manipulación, raycasting y controles gestuales, permitiendo agregar interactividad sin necesidad de implementar todo desde cero.

- XR Plugin Management: Este paquete es una herramienta de gestión sencilla para cualquier plugin XR específico de la plataforma, como ARKit y ARCore.

Resumen ejecutivo

El presente trabajo investiga la integración de la realidad aumentada (RA) con la metodología Building Information Modeling (BIM) como una solución tecnológica destinada en apoyar la visualización de elementos constructivos en campo. La investigación parte de la problemática habitual en el sector: la desconexión entre la información digital contenida en los modelos BIM y su aplicación efectiva en obra, situación que provoca interpretaciones erróneas, retrabajos y pérdidas de eficiencia. En el contexto académico y profesional de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, el proyecto adquiere relevancia por su aporte a la modernización de procesos y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente al ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y ODS 12 (producción y consumo responsables).

El objetivo general consistió en Integrar una herramienta de realidad aumentada con modelos BIM, desarrollada en Unity y Vuforia, para la visualización de elementos constructivos en campo.

A partir de este propósito se plantearon cuatro objetivos específicos: (1) identificar las necesidades técnicas, operativas y funcionales que la integración RA-BIM puede atender en la fase de ejecución; (2) analizar el estado del arte mediante una revisión sistemática que sirva de insumo para el diseño de la herramienta; (3) desarrollar un prototipo operativo en Unity y Vuforia que permita la visualización e interacción de modelos BIM en entornos reales; y (4) implementar y validar un caso piloto en obra real, para evaluar precisión y usabilidad.

La metodología combinó enfoques cualitativos y cuantitativos organizados en cuatro fases. Primero, se llevó a cabo un diagnóstico de necesidades mediante análisis documental y consultas técnicas, con el fin de identificar los principales requerimientos en obra. Segundo, se ejecutó una revisión sistemática del estado del arte sobre RA-BIM, recopilando tendencias, ventajas y limitaciones reportadas en la literatura. Tercero, se desarrolló el prototipo técnico: modelos BIM generados en Revit (o Archicad según flujo), optimizados en Blender y exportados a formato .fbx; el motor Unity se configuró con el template "AR Mobile" y los paquetes AR Foundation, ARCore/ARKit y XR Interaction Toolkit; la lógica de interacción se programó en C# mediante el apoyo en inteligencia artificial y se implementaron componentes para detección de planos, anclaje y manipulación táctil de los prefabs. Cuarto, se ejecutó un caso piloto experimental en un terreno habilitado,

proyectando un modelo constructivo de dos muros de mampostería sobre cimentación corrida para evaluar estabilidad, precisión geométrica y experiencia de usuario.

Los resultados obtenidos responden a cada objetivo específico y permiten establecer conclusiones con fundamento empírico. En relación con el primer objetivo, la identificación de necesidades reveló que las limitaciones críticas en obra provienen de la falta de herramientas que vinculen de manera inmediata y fiable el modelo digital con la realidad física. Se detectaron requerimientos concretos: modelos BIM optimizados (LOD adecuados), procedimientos de exportación normalizados, dispositivos móviles con capacidad gráfica suficiente, conectividad para sincronización y manuales/entrenamiento para usuarios. La RA aparece como alternativa para mejorar la interpretación espacial, la verificación de armado y la comunicación entre oficina y campo.

Respecto al segundo objetivo, la revisión sistemática mostró que la integración RA–BIM está en proceso de consolidación: existe una transición de aplicaciones experimentales hacia soluciones enfocadas en supervisión y control. La literatura destaca beneficios en la comprensión 3D, la detección temprana de interferencias, la capacitación y la coordinación interdisciplinaria. Sin embargo, se documentaron limitaciones recurrentes: precisión del anclaje espacial, dependencia del hardware y la conectividad, fragmentación de estándares y problemas de usabilidad en condiciones ambientales adversas. Estos hallazgos orientaron las decisiones tecnológicas del prototipo, priorizando AR Foundation para la detección de planos y la estabilidad multiplataforma.

En relación con el tercer objetivo, el desarrollo del prototipo logró la consecución de una aplicación móvil operativa que permite proyectar modelos BIM sobre superficies reales, manipularlos por rotación, traslación y escala, y ofrecer una interfaz accesible para personal técnico. Técnicamente, el pipeline (Revit → Blender → Unity) resultó efectivo para optimizar peso geométrico y rendimiento; la configuración de compilación (OpenGL ES3, IL2CPP, ARM64) y la exclusión de Vulkan mejoraron la compatibilidad y eliminaron errores de renderizado. El sistema mostró tiempos de carga inferiores a 5 segundos para modelos optimizados y una tasa de frames estable en dispositivos con soporte ARCore.

El cuarto objetivo, de validación en campo, arrojó resultados positivos y también áreas de mejora. En términos cuantitativos, la proyección mantuvo coherencia dimensional con desviaciones menores al 2% en condiciones controladas; la estabilidad del anclaje fue satisfactoria ante desplazamientos moderados del usuario y la recuperación tras pérdidas de tracking fue rápida. Cualitativamente, los usuarios valoraron la claridad visual y la facilidad de uso, señalando la utilidad para verificar continuidad de refuerzos y ubicación de elementos. Las limitaciones detectadas incluyeron pérdida temporal de tracking ante movimientos rápidos, sensibilidad a superficies de baja textura o muy reflectantes y disminución de estabilidad en iluminación extrema.

A partir de estos resultados se derivan conclusiones claras: la integración RA–BIM es viable técnica y operativamente para apoyar la fase de ejecución, aporta mejoras tangibles en comprensión espacial, control de calidad y comunicación; no obstante, su adopción masiva requiere abordar desafíos operativos como la estandarización de flujos de exportación BIM, la selección y provisión de hardware mínimo recomendado, y

la capacitación de los equipos. En términos prácticos, la experiencia de desarrollo confirmó que la iteración entre pruebas de campo y ajustes de software (optimización de raycasting, UI adaptativa, materiales Unlit) es crítica para consolidar un producto robusto.

Las recomendaciones derivadas son de tres tipos: técnicas, procedimentales y estratégicas. Técnicamente, se propone implementar mecanismos de re-anclaje y de indicadores de confianza del tracking, soporte para carga selectiva de capas (LOD dinámico), automatización del post-procesado de FBX y modos de alto contraste para ambientes luminosos. Procedimentalmente, se sugiere estandarizar el flujo BIM→RA (nomenclaturas, LOD por disciplina, metadatos), establecer protocolos de calibración y seguridad de uso en obra, y mantener una estructura de repositorio organizada. Estratégicamente, debe planificarse la integración de funcionalidades colaborativas multiusuario, la sincronización en la nube para versiones, y la realización de estudios cuantitativos antes/después con KPIs (tiempo de inspección, retrabajos, precisión de anclaje) para medir el impacto en productividad y costos. Además, se recomienda incorporar el uso de RA–BIM en la formación curricular y en pilotos institucionales para facilitar su adopción.

Por consiguiente, la investigación valida que una herramienta RA–BIM desarrollada con tecnologías accesibles y buenas prácticas de optimización puede convertirse en un insumo relevante para la transformación digital del sector construcción, apoyando la eficiencia, la trazabilidad y la calidad en la ejecución de obras. El trabajo establece una hoja de ruta técnica y metodológica para su evolución y escalado, contribuyendo al desarrollo de infraestructura más inteligente y sostenible.

Introducción

En los últimos años, la industria de la construcción ha atravesado una transformación significativa, impulsada por la incorporación de tecnologías digitales avanzadas que buscan mejorar la eficiencia, precisión y sostenibilidad de los procesos constructivos. Entre estas, destacan el modelado BIM (Building Information Modeling) y la realidad aumentada (RA), herramientas que han demostrado su capacidad para optimizar la coordinación entre disciplinas, reducir errores en obra y facilitar la toma de decisiones.

En este contexto, el objetivo general de este Trabajo Final de Graduación consistió en integrar una herramienta de realidad aumentada con modelos BIM, desarrollada en Unity y Vuforia, para la visualización de elementos constructivos en campo. A partir de este propósito se plantearon cuatro objetivos específicos: (1) identificar las necesidades técnicas, operativas y funcionales que la integración RA–BIM puede atender en la fase de ejecución; (2) analizar el estado del arte mediante una revisión sistemática que sirva de insumo para el diseño de la herramienta; (3) desarrollar un prototipo operativo en Unity y Vuforia que permita la visualización e interacción de modelos BIM en entornos reales; y (4) implementar y validar un caso piloto en obra real, para evaluar su precisión y usabilidad.

La Realidad Aumentada (RA) es una tecnología emergente que permite superponer información digital sobre el mundo físico en tiempo real, utilizando dispositivos como teléfonos inteligentes, tabletas o visores especializados. A diferencia de la realidad virtual, que sustituye completamente el entorno real, la RA lo complementa, creando experiencias mixtas en las que los usuarios pueden interactuar simultáneamente con elementos reales y virtuales. En el ámbito de la construcción, esta combinación mejora significativamente la comprensión espacial, la comunicación en entornos complejos y el acceso contextual a la información (Bello, C. R, 2017).

En el contexto de la ingeniería y la construcción, la RA ha cobrado relevancia como herramienta de apoyo en la planificación, supervisión y ejecución de obras. Su aplicación permite proyectar modelos tridimensionales sobre el sitio real de construcción, facilitando la verificación del montaje, el control de calidad y la identificación temprana de errores o interferencias. Además, posibilita recorridos virtuales en obra antes de ejecutar trabajos, lo que fortalece la coordinación entre equipos y reduce tiempos de ejecución y retrabajos. Según Mendoza Altez (2021), la RA mejora la manera en que los usuarios perciben y procesan la información técnica, ya que les permite visualizar en el entorno real los componentes virtuales que deben instalar o supervisar. En su estudio, se demostró que esta tecnología no solo impacta

positivamente en la educación en ingeniería, sino que también tiene gran potencial en campo gracias a su capacidad de presentar datos complejos de forma intuitiva y precisa.

Asimismo, Vargas Ríos (2009) plantea que la RA representa un nuevo paradigma de interacción entre los usuarios y los sistemas digitales, transformando la forma en que se accede y manipula la información en tiempo real. Esta capacidad la convierte en una tecnología idónea para sectores como la construcción, donde la precisión, la gestión del tiempo y la claridad en la comunicación técnica son aspectos críticos para el éxito de los proyectos.

En este escenario, surge la motivación principal de este Trabajo Final de Graduación: integrar una herramienta de RA vinculada con modelos BIM que pueda ser aplicada de manera práctica en proyectos constructivos. La propuesta busca aportar un flujo de trabajo que permita proyectar modelos en campo con precisión, mejorando la interpretación de planos, reduciendo errores y fortaleciendo el control y seguimiento en obra. Además de optimizar tiempos y recursos, esta iniciativa promueve una gestión más fluida, precisa y tecnológicamente avanzada en los proyectos de construcción, alineada con las tendencias de transformación digital del sector.

La pertinencia de este trabajo se sustenta en antecedentes académicos que han demostrado el impacto de la RA en la industria. López Ponce et al. (2024) evidencian cómo la RA mejora la gestión de proyectos mediante visualizaciones 3D en tiempo real, detección anticipada de errores y mayor colaboración entre equipos. De manera similar, De Coss Henning (2017), desde la Universidad Politécnica de Cataluña, desarrolló un flujo de trabajo BIM–RA orientado al seguimiento y control de obra, demostrando que dispositivos accesibles como celulares y tablets pueden facilitar la supervisión y validación en campo. Estos estudios confirman que la RA no solo es viable desde el punto de vista técnico, sino que constituye una oportunidad para transformar la práctica profesional de la ingeniería y la construcción en contextos reales.

Finalmente, el proyecto se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Contribuye al ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, al fortalecer la capacidad técnica del personal mediante herramientas digitales que promueven entornos más eficientes y seguros; se vincula con el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, al incentivar la adopción de tecnologías emergentes que modernicen el sector; y aporta al ODS 12: Producción y consumo responsables, al reducir errores y desperdicios mediante una ejecución más precisa de los procesos constructivos.

Capítulo 1: Marco teórico

El presente capítulo establece el marco teórico que sustenta la investigación, proporcionando las bases conceptuales y técnicas necesarias para comprender la integración de la Realidad Aumentada (RA) con la metodología Building Information Modeling (BIM) en el ámbito de la construcción. En una industria caracterizada por su complejidad y su constante búsqueda de eficiencia, la transformación digital ha impulsado la adopción de herramientas tecnológicas que permiten optimizar la gestión, el diseño y la ejecución de proyectos.

A lo largo de este capítulo se abordan los principales ejes que articulan la evolución tecnológica del sector. En primer lugar, se analiza la transformación digital en la construcción, destacando cómo la incorporación de tecnologías basadas en la información ha modificado la planificación, ejecución y control de los proyectos. Posteriormente, se revisan las metodologías modernas de gestión, con énfasis en la integración de BIM, Lean Construction e inteligencia artificial como estrategias complementarias para mejorar la productividad y la toma de decisiones.

Seguidamente, se desarrolla el apartado sobre visualización y modelos digitales, en el que se examina el papel de BIM como herramienta de coordinación interdisciplinaria y de representación tridimensional del proyecto. A partir de esta base, se introduce el análisis de las tecnologías inmersivas, explorando el potencial de la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA) en la planificación, capacitación y control de obra, apoyándose en ejemplos de aplicación en la industria.

Finalmente, se presentan las herramientas y plataformas tecnológicas que permiten materializar la integración RA-BIM, destacando el uso de motores como Unity y kits de desarrollo como Vuforia, y se expone la sección sobre integración RA-BIM en proyectos constructivos, donde se consolidan los fundamentos teóricos que respaldan la propuesta práctica de esta investigación. Asimismo, se incluye un apartado dedicado a la vinculación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas, en el cual se analiza cómo la aplicación de la realidad aumentada y la metodología BIM contribuyen a la eficiencia de los procesos constructivos, la innovación tecnológica y la promoción de prácticas más sostenibles dentro del sector de la construcción.

1.1 Transformación digital en la construcción

En los últimos años, la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) ha experimentado un proceso acelerado de transformación digital, impulsado por la incorporación de herramientas tecnológicas que optimizan la planificación, el diseño y la ejecución de los proyectos. Este proceso responde a la necesidad de aumentar la eficiencia, reducir costos y mejorar la sostenibilidad en todas las fases del ciclo de vida constructivo. Tecnologías como el modelado paramétrico, la automatización y la programación asistida han permitido integrar información de manera más efectiva y fomentar la colaboración entre los diferentes actores del proyecto (Herrera & Ospina, 2019).

Aunque la digitalización ha avanzado con rapidez en sectores como el médico o el industrial, la construcción ha mostrado un progreso más gradual debido a la complejidad de sus procesos, la alta fragmentación del sector y la necesidad de coordinar múltiples disciplinas bajo normativas diversas. Esta realidad ha hecho que la adopción tecnológica sea más lenta, pero también más estratégica, con un enfoque en herramientas que realmente aporten valor a la eficiencia operativa y la calidad del producto final (Herrera & Ospina, 2019).

Las tecnologías digitales, basadas en sistemas de Tecnologías de la Información (TI), buscan integrar y coordinar fuentes de información mediante plataformas colaborativas. Su implementación mejora la accesibilidad de los datos, facilita la gestión en tiempo real y promueve la comunicación transversal entre los equipos de trabajo. De esta manera, la digitalización no se limita a la incorporación de software, sino que implica un cambio estructural en la cultura organizacional y en la forma de planificar, diseñar y ejecutar proyectos constructivos (Arone Huallpa, 2022).

Para que la transformación digital sea efectiva, es fundamental la participación activa de todos los actores involucrados en el proceso constructivo. La sola adquisición de herramientas tecnológicas no garantiza resultados si los usuarios no están capacitados ni comprometidos con su implementación. Por ello, la digitalización debe concebirse como un esfuerzo colectivo que involucra tanto a la gestión estratégica como al personal operativo, con el fin de maximizar la eficiencia, reducir errores y mejorar el impacto de la industria sobre la sociedad (Herrera & Ospina, 2019).

La transformación digital en la construcción no se limita a la adopción de herramientas aisladas, sino que debe abarcar todas las etapas del ciclo de vida del proyecto. En este contexto, la metodología Building Information Modeling (BIM) ha surgido como un eje central que permite integrar diseño, construcción, control de calidad, operación y mantenimiento bajo un mismo modelo digital. Su aplicación garantiza la trazabilidad de la información, evita sobrecostos por errores de interpretación y mantiene la coherencia entre lo proyectado y lo ejecutado (Arone Huallpa, 2022).

Por otro lado, el ciclo de vida de los proyectos constructivos considera todas las actividades de gestión desde la planificación hasta la operación final. La integración de tecnologías digitales a lo largo de este ciclo proporciona una visión coherente del proyecto, favoreciendo la coordinación interdisciplinaria, la detección temprana de conflictos y la optimización de recursos. En este sentido, mantener altos estándares tecnológicos durante todo el ciclo garantiza que la información generada sea útil para la fase operativa y el mantenimiento posterior (Arone Huallpa, 2022).

En este escenario, la programación asistida y la inteligencia artificial (IA) representan la siguiente etapa en la evolución digital del sector. Estas herramientas permiten automatizar procesos repetitivos, concentrar los esfuerzos humanos en tareas de diseño y optimización, y fortalecer la integración de metodologías como BIM, la realidad aumentada (RA) y los sistemas de gestión digital de la construcción. De acuerdo con de-Camino-Beck (2025), la programación asistida permite mantener la coherencia y precisión en los procesos constructivos al traducir problemas complejos en soluciones automatizadas y verificables por la computadora.

Para obtener resultados confiables mediante la programación asistida, es esencial:

- Expresar con claridad la intención en los comandos o prompts;
- Descomponer los problemas en tareas simples con entradas y salidas definidas;
- Establecer sistemas de prueba y verificación del código; y
- Mantener rutinas de control que aseguren la calidad de los resultados (de-Camino-Beck, 2025).

Aplicados al ámbito constructivo, estos principios garantizan la continuidad tecnológica entre las etapas de diseño y ejecución, asegurando una comunicación más fluida entre los modelos digitales y las condiciones reales de obra.

En conclusión, la transformación digital, la aplicación integral del ciclo de vida de los proyectos y la programación asistida conforman un marco conjunto que impulsa la eficiencia, la precisión y la sostenibilidad en la construcción. Mientras la transformación digital establece la base tecnológica y cultural, el ciclo de vida asegura la trazabilidad y la calidad de los procesos, y la programación asistida optimiza la gestión de información y recursos, consolidando un entorno constructivo moderno, innovador y alineado con las tendencias globales (Herrera & Ospina, 2019; Arone Huallpa, 2022; de-Camino-Beck, 2025).

1.2 Gestión de proyectos y metodologías modernas

La gestión de proyectos en construcción ha evolucionado con la incorporación de metodologías modernas que permiten un mayor control sobre los recursos, el tiempo y la calidad de las obras. Actualmente, enfoques ágiles y apoyados en tecnología digital están transformando la manera en que los equipos coordinan sus actividades. En este contexto, la inteligencia artificial (IA) emerge como una herramienta clave, capaz de analizar grandes volúmenes de datos, anticipar riesgos y apoyar en la toma de decisiones, lo que incrementa la confiabilidad de la planificación y el control.

En la literatura reciente, se ha documentado que la metodología que mejora beneficios ha demostrado en la gestión de proyectos constructivos es la combinación de Building Information Modeling (BIM) con Lean Construction, pues juntas proporcionan una base sólida para recopilar y ajustar información de manera ágil, al mismo tiempo que potencian la reducción de pérdidas y optimizan los procesos constructivos. Esta integración no solo facilita la disponibilidad de datos actualizados, sino que también permite garantizar productividad y eficiencia durante la ejecución de las obras (Blanco Almeda, 2024).

En cuanto al mejoramiento de la productividad, los estudios coinciden en que la evaluación de estas metodologías requiere un proceso sistemático de medición, evaluación y comparación, que permita identificar su efectividad a través de los factores asociados a la implementación de planes. Este enfoque se convierte en una estrategia circular, en la que cada aplicación alimenta nuevos planes de mejora, corrigiendo fallas detectadas y ajustando procedimientos. Así, metodologías como BIM y Lean Construction, e incluso la combinación de varias de ellas, representan alternativas estratégicas para maximizar beneficios y potenciar la innovación en la gestión de proyectos constructivos (Blanco Almeda, 2024).

Cabe mencionar que, la implementación de la inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una de las herramientas tecnológicas con mayor potencial de impacto en la industria de la construcción. Su capacidad de procesar grandes volúmenes de información y generar patrones predictivos permite anticipar riesgos, optimizar el uso de recursos y mejorar la precisión en la toma de decisiones. Como señalan Mendoza, Quispe y Muñoz (2022), la IA representa una alternativa viable y necesaria para el sector, pues su integración en el uso de materiales, herramientas, máquinas y sistemas innovadores ha demostrado resultados positivos en términos de eficiencia y competitividad.

No obstante, la incorporación de estas tecnologías conlleva también desafíos asociados a la transformación del entorno laboral, ya que su implementación implica cambios en los procesos, la redefinición de tareas y, en algunos casos, el reemplazo o modificación de ciertos puestos de trabajo. Estas ventajas y desventajas resaltan la necesidad de gestionar de manera estratégica la introducción de la IA en construcción, no solo desde una perspectiva técnica, sino también considerando su impacto social y organizacional.

En el marco de metodologías digitales como BIM y Lean Construction, la IA aparece como un aliado para fortalecer la gestión de proyectos al facilitar análisis complejos, generar escenarios de simulación y aportar soluciones rápidas a problemas de diseño o ejecución. Esto crea un terreno fértil para su integración con tecnologías emergentes como la realidad aumentada (RA), donde la IA podría complementar la visualización con funciones avanzadas de predicción, control automático de calidad y asistencia en tiempo real para los equipos en obra.

1.3 Visualización y modelos digitales

La visualización constituye un componente esencial en la industria de la construcción, ya que facilita la interpretación de proyectos tanto para profesionales como para clientes y operarios. Con la transición de planos bidimensionales hacia modelos tridimensionales, el Building Information Modeling (BIM) se ha consolidado como una metodología que centraliza la información y mejora la coordinación entre disciplinas. Sin embargo, pese a su potencial, su aplicación suele concentrarse en la fase de diseño, generando una brecha en su uso directo en obra, donde aún prevalecen interpretaciones basadas en documentación en 2D.

En este sentido, Gámez, Severino y Márquez (2014) señalan que BIM permite ofrecer una “visualización real de lo construido”, lo que facilita la comprensión del proyecto de forma más clara e intuitiva para todos los involucrados. Una de sus principales ventajas es la posibilidad de realizar una “preconstrucción virtual”, es decir, la visualización del edificio de manera digital antes del inicio físico de la obra. Esta capacidad permite anticipar problemas, plantear soluciones en fases tempranas, validar sistemas constructivos y mejorar la planificación general.

No obstante, BIM no se limita a un software de modelado, sino que representa una metodología de trabajo colaborativa basada en modelos digitales paramétricos. Su propósito es integrar a los diferentes actores del proyecto en un entorno común de información, abarcando desde diseñadores y constructores hasta gestores de costos y administradores de instalaciones. Esto fomenta una ingeniería colaborativa, en la cual distintas especialidades pueden trabajar de manera centralizada sobre un mismo modelo o bien integrar modelos distribuidos (Trejo, 2018).

Pese a sus beneficios, la implementación de BIM enfrenta desafíos importantes. Entre ellos, la resistencia al cambio, ya que implica migrar de métodos tradicionales a un entorno digital y colaborativo, lo que puede generar desconfianza en algunos equipos. Asimismo, la curva de aprendizaje demanda tiempo de adaptación, con un impacto inicial en la productividad. Otro aspecto crítico es la necesidad de estandarización, pues para garantizar una colaboración efectiva resulta imprescindible definir desde el inicio del proyecto lineamientos sobre el intercambio de información, los niveles de desarrollo (LOD) y las reglas de interoperabilidad. En

países como Chile, la ausencia de un estándar nacional ha sido identificada como una limitante relevante para la implementación plena de esta metodología (Trejo, 2018).

En síntesis, la visualización digital mediante BIM ofrece ventajas significativas en la comprensión y coordinación de proyectos constructivos, facilitando tanto la detección temprana de errores como la validación de diseños y la colaboración entre disciplinas. Sin embargo, su adopción plena requiere superar barreras culturales, técnicas y normativas que aún limitan su uso extendido en la fase de ejecución en obra.

1.4 Tecnologías inmersivas aplicadas a la construcción

Las tecnologías inmersivas han abierto nuevas posibilidades en la industria de la construcción, especialmente a través de la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA). Mientras la RV genera entornos completamente digitales en los que el usuario interactúa de forma aislada del mundo real, la RA complementa el entorno físico con información digital superpuesta en tiempo real. Esta última ha demostrado un gran potencial en la planificación, supervisión y control de calidad, al facilitar la detección temprana de errores, la capacitación en obra y la mejora en la comunicación visual entre los actores del proyecto (Abrahamzon García, 2024; Villegas Hortal, 2012). Sin embargo, también se reconocen limitaciones vinculadas a los requerimientos técnicos, la curva de aprendizaje y los procesos de integración con plataformas digitales existentes.

La Realidad Virtual (RV) se entiende como la creación de un entorno artificial en el que los usuarios pueden interactuar con elementos digitales, sumergiéndose en un ambiente completamente virtual (Abrahamzon García, 2024). En el sector de la construcción, se utiliza principalmente para la visualización de ambientes edificados a través de modelos computacionales en tiempo real (Villegas Hortal, 2012).

Existen dos tipos principales de RV:

- RV no inmersiva: permite visualizar modelos 3D en pantallas convencionales como se visualiza en la figura 1, sin lograr la sensación de inmersión plena.
- RV inmersiva: ofrece experiencias envolventes mediante dispositivos como cascos HMD o sistemas CAVE® como se observa en la figura 2, que proporcionan visión estereoscópica y seguimiento preciso del observador, a menudo complementados con sonido envolvente.

Figura 1. Realidad virtual no inmersiva



Fuente: Obtenido de www.safelinktracking.com.mx

Figura 2. Realidad virtual inmersiva



Fuente: Obtenido de digiMODE

Estos sistemas permiten una escala real (1:1) y mayor interacción con los modelos, generando experiencias que resultan útiles tanto en la etapa de diseño como en la formación de profesionales (Villegas Hortal, 2012).

Por otro lado, Realidad Aumentada (RA), referenciado en la figura 3, en contraste con la RV, no sustituye la realidad física, sino que la enriquece superponiendo información digital sobre el entorno real en tiempo real. De esta forma, permite que el usuario interactúe simultáneamente con elementos virtuales y físicos, favoreciendo la comprensión de situaciones espaciales complejas (Abrahamzon García, 2024).

Figura 3. Representación de la realidad aumentada



Fuente: Obtenido de virtual.arena

Según su funcionamiento, puede clasificarse en:

- RA basada en marcadores: activa la visualización al reconocer imágenes específicas como códigos QR o logotipos.
- RA basada en geolocalización: utiliza datos GPS para ubicar al usuario y desplegar información contextual.
- RA basada en interacción con Internet: relaciona imágenes captadas con bases de datos en línea.

Para operar, requiere una plataforma informática, una pantalla (generalmente de dispositivos móviles), un sistema de registro que alinee lo real con lo virtual, y dispositivos de entrada como cámaras o sensores.

El uso de RV y RA en la construcción se ha extendido a múltiples ámbitos, como preventa inmobiliaria y marketing: la RV permite recorridos virtuales inmersivos donde los clientes exploran espacios y personalizan acabados; la RA facilita la visualización de modelos 3D a escala a partir de folletos o logos (Quispe Navarro & Retamozo Lassler, 2020).

También, lo encontramos en planificación y coordinación, la RV ayuda a detectar inconsistencias de diseño en fases tempranas, mientras que la RA permite proyectar modelos BIM en obra para verificación y control (BIM, realidad aumentada y técnicas holográficas aplicadas a la construcción, 2018).

Además, en formación y educación, ya que ambas tecnologías potencian el aprendizaje de conceptos constructivos complejos y desarrollan habilidades espaciales esenciales para estudiantes de ingeniería (Villegas Hortal, 2012).

En cuanto a ejecución y montaje en obra, dispositivos como HoloLens han permitido replanteos a escala real sin necesidad de planos impresos, aumentando la precisión y seguridad en obra (BIM, realidad aumentada y técnicas holográficas aplicadas a la construcción, 2018).

Para operación y mantenimiento la información BIM proyectada en entornos virtuales o aumentados facilita la gestión de instalaciones y remodelaciones futuras (Villegas Hortal, 2012).

Entre las principales ventajas destacan, por ejemplo:

- Visualización tridimensional clara y comprensible para profesionales y clientes (Piedecausa-García et al., 2016).
- Mayor interacción y experiencia del usuario, especialmente con la RV inmersiva (Villegas Hortal, 2012).
- Reducción de errores y costos al detectar conflictos antes de la construcción (BIM, realidad aumentada y técnicas holográficas aplicadas a la construcción, 2018).
- Facilita el trabajo colaborativo y remoto mediante dispositivos que comparten información en tiempo real (BIM, realidad aumentada y técnicas holográficas aplicadas a la construcción, 2018).
- Una herramienta docente eficaz para el desarrollo de habilidades espaciales (Villegas Hortal, 2012).

Por otro lado, las limitaciones y desafíos incluyen:

- Costos iniciales y requerimientos técnicos especializados (Villegas Hortal, 2012).
- Dependencia de las condiciones reales en la RA y limitaciones en el detalle de modelos para dispositivos móviles.
- Posibles efectos fisiológicos como mareo o fatiga visual en RV inmersiva.
- Problemas de interoperabilidad en la transferencia de modelos BIM a plataformas inmersivas (BIM, realidad aumentada y técnicas holográficas aplicadas a la construcción, 2018).
- Resistencia cultural y baja inversión en innovación dentro del sector (Piedecausa-García et al., 2016).

1.4.1 Ejemplo de aplicación de la realidad aumentada en la construcción

Un caso representativo de la aplicación de la realidad aumentada (RA) en el ámbito constructivo es el desarrollado por Skanska, empresa internacional que ha implementado la metodología reality capture como parte de sus procesos de innovación digital. Esta técnica combina herramientas de escaneo láser, fotogrametría y fotografías de 360° de alta definición con entornos de realidad aumentada y mixta, permitiendo capturar el estado real (as-built) de una obra y compararlo con el modelo proyectado (as-planned) (Skanska, s. f.).

La utilización de la RA en este contexto facilita la detección temprana de discrepancias entre el diseño y la ejecución, optimiza la planificación y reduce los tiempos de inspección al superponer los modelos BIM directamente sobre las condiciones reales del sitio. De esta manera, se mejora la precisión del control de calidad y se fortalece la toma de decisiones en campo, al proporcionar una visualización tridimensional inmediata del progreso constructivo, como se observa en la figura 4 (Skanska, s. f.).

Figura 4. *Reality Capture de la empresa Skanska*



Fuente: Obtenido de www.usa.skanska.com

La experiencia de Skanska demuestra el potencial de la RA para integrarse en los flujos de trabajo de la construcción, favoreciendo una gestión más eficiente, precisa y colaborativa. Este tipo de implementación constituye una referencia relevante para el desarrollo de herramientas RA-BIM orientadas al seguimiento y control de obra, al evidenciar cómo la tecnología puede servir como un puente entre el entorno digital y el entorno físico de los proyectos (Skanska, s. f.).

1.4.2 Ejemplo de aplicación de la realidad virtual en la construcción

La aplicación de la realidad virtual (RV) en la construcción ha demostrado ser una herramienta eficaz para el fortalecimiento de la seguridad laboral y la capacitación técnica. Un ejemplo destacado es el desarrollado por Skanska en colaboración con la agencia OutHere, en el que se implementaron entornos de simulación inmersiva mediante dispositivos HTC Vive para la formación de trabajadores en materia de seguridad en obra. En estos escenarios virtuales, los operarios enfrentan situaciones de riesgo simuladas que reproducen condiciones reales de trabajo, permitiendo experimentar y tomar decisiones sin exponerse a peligro físico alguno como se representa en la figura 6 (Unity, 2023).

Figura 6. OutHere y Skanska Un caso de Unity for AEC



Fuente: Obtenido de www.unity.com

Esta experiencia demostró que la RV puede potenciar los programas de entrenamiento tradicionales al ofrecer un aprendizaje experiencial, donde la interacción con el entorno favorece la comprensión práctica de protocolos y la retención del conocimiento. Asimismo, evidenció que la adopción de entornos virtuales controlados contribuye significativamente a la reducción de accidentes y al fortalecimiento de la cultura de seguridad en los equipos de obra. En conjunto, este tipo de iniciativas refuerza el papel de la RV como una herramienta complementaria dentro del ecosistema digital de la construcción, aportando valor tanto en la formación del personal como en la preparación previa a la ejecución real de los proyectos (Unity, 2023).

Concluyendo, las tecnologías inmersivas constituyen una vía estratégica para transformar los procesos constructivos, desde la concepción de un proyecto hasta su ejecución y operación. Si bien aún enfrentan barreras técnicas y culturales, sus beneficios en términos de precisión, comunicación y aprendizaje justifican su creciente adopción en la industria.

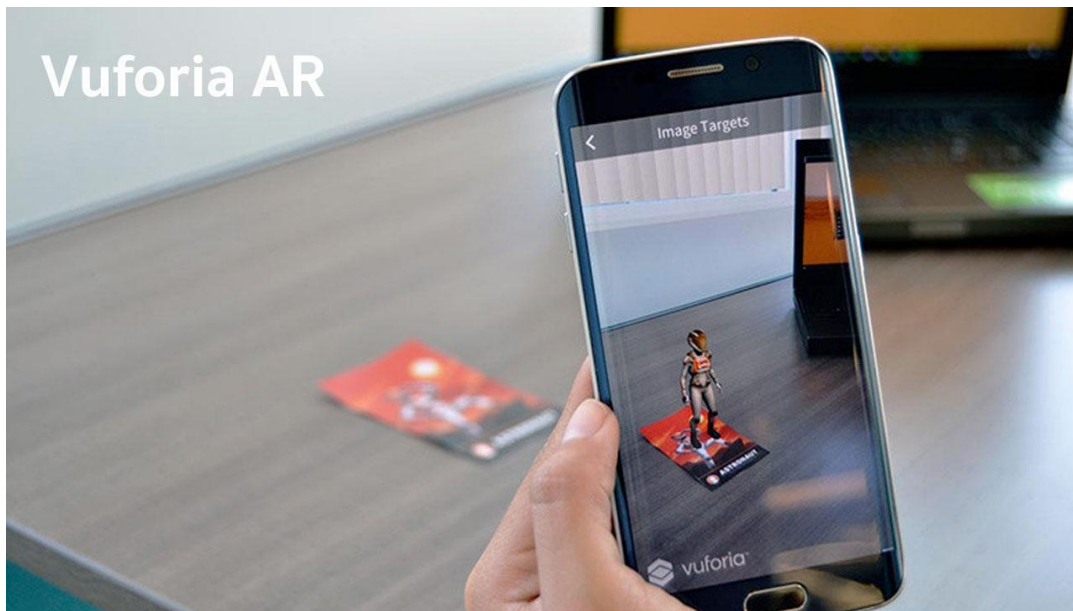
1.5 Herramientas y plataformas para RA–BIM

La implementación de la realidad aumentada (RA) en proyectos constructivos requiere de herramientas capaces de vincular modelos digitales con entornos interactivos accesibles en obra. En este sentido, motores gráficos como Unity y frameworks especializados como Vuforia se han consolidado como alternativas viables, ya que ofrecen la posibilidad de proyectar modelos tridimensionales sobre el mundo real con un alto nivel de realismo e interactividad. Estudios previos han demostrado la factibilidad de integrar plataformas de modelado BIM, como Revit, Archicad o SketchUp, con aplicaciones de RA orientadas a la planificación, la verificación y la capacitación en el sector de la construcción.

Unity se ha convertido en uno de los motores de desarrollo más utilizados a nivel mundial, inicialmente diseñado para videojuegos como mencionan Lombana, Ramírez y Rivero (2024), pero expandido a campos como la simulación, la educación y la construcción. Su principal fortaleza radica en la capacidad de desarrollar aplicaciones multiplataforma, compatibles con sistemas operativos como Windows, Android, iOS, macOS y Linux, lo que facilita el acceso a una amplia variedad de dispositivos. Además, su motor gráfico permite crear entornos tridimensionales, gestionar materiales y texturas, incorporar físicas y organizar escenas interactivas. La programación mediante C# brinda la posibilidad de personalizar las funcionalidades, mientras que su tienda digital (Asset Store) proporciona recursos adicionales que agilizan el desarrollo. Todo esto, sumado a una comunidad activa y extensa, ha posicionado a Unity como una herramienta versátil y eficaz para el desarrollo de prototipos de RA vinculados a modelos BIM (Folch, Vázquez & Julián, 2021).

Por su parte, Vuforia funciona como un kit de desarrollo de software (SDK) que se integra directamente con Unity y dota a los proyectos de capacidades específicas de RA. Su funcionamiento se centra en el reconocimiento de marcadores visuales, como imágenes, logotipos o códigos QR, que actúan como desencadenantes para la superposición de información digital en tiempo real. De esta manera, al apuntar la cámara de un dispositivo móvil hacia un marcador, la aplicación puede proyectar modelos tridimensionales, animaciones o datos adicionales asociados al objeto detectado como se muestra en la figura 7. Gracias a su integración con Unity, Vuforia facilita la construcción de aplicaciones accesibles en dispositivos móviles y tablets, lo que la convierte en una opción viable para entornos de obra donde se requieren soluciones prácticas y adaptables (Simon, 2023).

Figura 7. Marcador para la proyección de realidad aumentada con Vuforia



Fuente: Obtenido de APKPure

En los últimos años, han surgido alternativas más robustas para el desarrollo de experiencias de RA sin dependencia de marcadores, entre las que destaca AR Foundation, un framework desarrollado por Unity Technologies que permite crear aplicaciones de RA multiplataforma a partir de un mismo código base. Esta herramienta funciona como un puente unificado entre ARCore (de Google) y ARKit (de Apple), ofreciendo detección de planos, seguimiento espacial, estimación de iluminación y reconocimiento de superficies, todo dentro de un entorno de desarrollo integrado. Su enfoque en la portabilidad y compatibilidad lo convierte en una solución eficiente para proyectos que buscan estabilidad técnica y coherencia visual tanto en dispositivos Android como iOS (Unity Technologies, 2024; Google Developers, 2025).

La conexión entre motores gráficos y plataformas BIM se logra a través de un proceso de exportación e importación de modelos digitales. Un caso común consiste en partir de planos 2D elaborados en AutoCAD, modelar la geometría arquitectónica en SketchUp, refinar los archivos en Blender para mejorar su compatibilidad y finalmente importarlos a Unity. Dentro de este entorno, los modelos se ajustan mediante la corrección de materiales y texturas, la organización jerárquica de los elementos en objetos de escena, la asignación de propiedades físicas a través de colliders y la creación de prefabricados digitales (prefabs) que optimizan el rendimiento de la aplicación (Folch, Vázquez & Julián, 2021).

En síntesis, Unity, Vuforia y AR Foundation conforman un ecosistema tecnológico complementario que permite la visualización en tiempo real de modelos BIM en entornos reales, fomentando la interacción entre los distintos actores del proyecto. Estas herramientas, en conjunto, amplían las posibilidades de control, comunicación y comprensión dentro de los procesos constructivos, fortaleciendo la transición hacia una industria más digital, colaborativa y eficiente.

1.6 Integración RA-BIM en proyectos constructivos

La revisión de los conceptos anteriores permite comprender cómo la transformación digital, la gestión moderna de proyectos, la visualización avanzada y las tecnologías inmersivas convergen en la propuesta de este trabajo final de graduación. En este contexto, la integración de la realidad aumentada (RA) con los modelos de información de la construcción (BIM) se plantea como una oportunidad para fortalecer el vínculo entre la planeación digital y la ejecución física de las obras. Esta interacción busca reducir la brecha entre la representación virtual del proyecto y su materialización en campo, promoviendo una construcción más precisa, eficiente y coordinada.

La integración RA-BIM se sustenta en la posibilidad de combinar la información contenida en los modelos digitales con el entorno físico, mediante la proyección interactiva de elementos constructivos sobre la realidad observada. Esta relación favorece la comprensión tridimensional del proyecto, facilita la verificación visual de detalles técnicos y permite detectar posibles discrepancias entre lo planificado y lo ejecutado. Además, su uso contribuye a mejorar la comunicación entre equipos técnicos y operativos, al proporcionar una herramienta visual que traduce la información del modelo BIM en un lenguaje accesible y práctico en obra (Chi et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Desde una perspectiva tecnológica, la literatura especializada señala la existencia de herramientas que facilitan esta integración. Entre ellas se destaca el AR Mobile Template desarrollado por Unity Technologies, el cual constituye un entorno base para la creación de aplicaciones móviles de realidad aumentada. Este recurso ofrece una estructura modular preconfigurada que permite gestionar funciones esenciales como la detección de planos, el seguimiento espacial y la interacción del usuario con objetos digitales. Su diseño orientado a la compatibilidad multiplataforma lo convierte en una referencia técnica importante para el desarrollo de experiencias de RA aplicadas a modelos BIM, al proporcionar una base sólida sobre la cual se pueden construir aplicaciones personalizadas y adaptadas al contexto constructivo (Unity, 2023).

De igual forma, se consideró como referente metodológico la guía no publicada “Pasos para la realización de un modelo en realidad aumentada”, elaborada por el profesor Ing. Leonardo Torres Hernández del Tecnológico de Costa Rica (Torres, 2024). Este documento teórico propone una ruta estructurada para la implementación de prototipos de RA, desde la preparación de los modelos tridimensionales hasta su validación en entornos reales. Su enfoque académico y técnico aporta lineamientos que permiten comprender los pasos necesarios para el desarrollo de herramientas de RA orientadas a la construcción, consolidando una base conceptual adaptada al contexto local.

En conjunto, la revisión de estos recursos teóricos y tecnológicos refuerza la pertinencia de la integración RA–BIM dentro de los procesos constructivos contemporáneos. Al vincular la información digital con el espacio físico mediante herramientas accesibles y estandarizadas, se promueve una gestión más eficiente del proyecto, una mayor precisión en la ejecución y un soporte visual que potencia la toma de decisiones técnicas en obra. De esta manera, la integración RA–BIM se consolida como una de las expresiones más representativas de la transformación digital aplicada al sector de la construcción.

1.7 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El presente Trabajo Final de Graduación contribuye de manera directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas, al fomentar la innovación tecnológica, la eficiencia productiva y el uso responsable de recursos en la industria de la construcción. En particular, este proyecto se relaciona con los siguientes objetivos:

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico.

La implementación de una herramienta de realidad aumentada (RA) integrada con modelos BIM promueve la digitalización de los procesos constructivos y la modernización de las prácticas laborales. Esto contribuye a la meta 8.2, al fomentar la productividad mediante la diversificación tecnológica y la innovación, y a la meta 8.3, al impulsar la adopción de herramientas digitales que fortalecen las capacidades técnicas del personal y generan entornos laborales más eficientes y seguros.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

Este trabajo impulsa la innovación tecnológica aplicada al sector de la construcción, promoviendo la integración de metodologías digitales avanzadas que mejoran la planificación, supervisión y control de proyectos. La creación del prototipo RA–BIM contribuye a la meta 9.5, al fortalecer la investigación científica y la capacidad tecnológica en el ámbito de la ingeniería y la construcción, alineándose con la transformación digital de las infraestructuras.

ODS 12: Producción y consumo responsables.

La herramienta RA–BIM favorece un uso más racional de los materiales y recursos durante la ejecución de proyectos, al reducir errores, reprocesos y desperdicios asociados a la interpretación de planos. Con ello, se contribuye a la meta 12.2, que busca la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, y a la meta 12.5, orientada a disminuir la generación de desechos mediante la prevención y la optimización de procesos constructivos.

Capítulo 2: Metodología

La presente investigación se abordó desde un enfoque mixto, ya que integró componentes cualitativos y cuantitativos para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados. En primer lugar, se aplicó el enfoque cualitativo en la identificación de necesidades técnicas, operativas y funcionales en la fase de ejecución de proyectos constructivos, a través de entrevistas y encuestas que permitieron comprender las expectativas del personal técnico respecto a la integración de una herramienta de realidad aumentada (RA) con modelos BIM. Posteriormente, se incorporó un enfoque cuantitativo en la sistematización y análisis de datos bibliográficos provenientes del estado del arte, así como en la validación del caso piloto en obra, mediante la medición de aspectos como precisión de proyección, facilidad de uso y utilidad en el control de calidad. De esta manera, considerando que el proyecto es de carácter exploratorio y evaluativo, este enfoque resultó indispensable para lograr no solo el desarrollo del prototipo de RA, sino también para comprobar su aportación y funcionalidad en un contexto constructivo real.

Es importante mencionar, que en el planteamiento inicial de este trabajo se contempló el desarrollo de la investigación en colaboración con una empresa constructora nacional, con el propósito de aplicar la integración de modelos BIM con realidad aumentada (RA) en el contexto específico de su sistema constructivo modulado. No obstante, debido a factores externos a la investigación, fue necesario replantear el enfoque y desvincular la aplicación directa en dicha empresa. Como medida de ajuste metodológico, se optó por generalizar el estudio hacia el sector de la construcción en términos amplios, manteniendo la pertinencia del tema y los objetivos de investigación. Esta modificación permitió conservar la validez científica y técnica del proyecto, al mismo tiempo que amplió el alcance de los resultados, haciéndolos aplicables a diversos contextos constructivos y no únicamente al caso de una empresa en particular.

Luego de realizar estos ajustes en el planteamiento de la propuesta, se procedió a trabajar bajo los nuevos objetivos. Para cumplir con el primer objetivo específico, que consistió en identificar las necesidades técnicas, operativas y funcionales en la fase de ejecución de proyectos, se aplicó una encuesta estructurada al personal clave del sector construcción. La encuesta fue diseñada con preguntas estratégicas orientadas a identificar los requerimientos prioritarios de los profesionales respecto a la implementación de una herramienta de realidad aumentada (RA). Estas preguntas fueron de carácter tanto abierto como cerrado, con el fin de obtener un análisis mixto de tipo cuantitativo y cualitativo. El cuestionario fue revisado y validado

previamente por especialistas académicos y profesionales del área, con el fin de garantizar su pertinencia y completitud.

La recolección de información se realizó mediante dos vías: presencial y virtual. De forma presencial, se coordinó con profesionales en áreas relevantes para obtener sus respuestas de primera mano, lo que permitió captar detalles adicionales a través de la interacción directa. Paralelamente, se aplicó la encuesta en modalidad virtual mediante la plataforma Microsoft Forms, presentada en el apéndice 1, lo que facilitó la participación de colaboradores con disponibilidad limitada de tiempo y de aquellos ubicados en diferentes regiones del país.

La población de estudio estuvo conformada por 13 profesionales del sector construcción, seleccionados intencionalmente, dado su rol estratégico en las áreas técnicas, operativas y de gestión. La muestra se definió considerando aspectos como departamento o área de especialidad, años de experiencia profesional y su relación directa con los procesos constructivos, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Información trascendental para la selección de la muestra

Nombre del empleado	Área de especialidad	Años de experiencia	Relación en Fase Ejecución
Hugo Chaverri	Administración	20	Bajo
Carlos Picado	Supervisión	25	Alto
Steven Arias	Administración	10	Bajo
Jonathan Salazar	Modulación	13	Alto
Jéssica Hernández	Ventas	13	Medio
María del Mar Salazar	Marketing	4	Medio
Sebastián Corrales	Investigación y desarrollo	11	Medio
Christian Thomas	Inspección	5	Alto
Jairo Barquero Quesada	Supervisión	16	Alto
Ana Laura Jiménez	Supervisión	4	Alto
Georgina Barquero Quesada	Electromecánica	18	Medio
Luis Madrigal Chaves	Inspección	2	Alto
Sergio Campos	Supervisión	6	Alto

Los resultados fueron representados a través de gráficos estadísticos que facilitaron la interpretación de las respuestas y se complementaron con un análisis cualitativo detallado de cada respuesta. A partir de ello, se construyó una matriz de necesidades, con el fin de sistematizar las fortalezas, retos y necesidades percibidas en torno a la implementación de la herramienta.

Además, la información recopilada mediante las encuestas se complementó con documentación técnica utilizada habitualmente en proyectos constructivos, como manuales de modelado en software BIM,

modelos arquitectónicos y estructurales generados por los equipos de diseño, así como planos de taller. En esta sección entra la guía de pasos generada por el profesor Ing. Leonardo Torres Hernández, para la generación de modelos en Realidad Aumentada (RA). Este material permitió contrastar y aterrizar las ideas iniciales con los procesos y recursos comúnmente empleados en la práctica profesional, antes de plantear el desarrollo de la herramienta de realidad aumentada.

En términos metodológicos, se consideraron variables y categorías de análisis. La variable principal fue el grado de alineación de la herramienta de RA con los requerimientos técnicos y funcionales de la industria de la construcción actual. Las categorías de estudio se definieron de la siguiente forma:

- Técnica: Compatibilidad con Revit, dispositivos móviles y precisión en la visualización.
- Operativa: Facilidad de uso en campo, tiempo de aprendizaje del personal, adaptación a los procesos actuales.
- Funcional: Aporte al control de calidad, reducción de errores constructivos, utilidad en la supervisión de obra.
- Expectativas de posibles usuarios: Beneficios esperados, disposición del personal para adoptar la herramienta y áreas prioritarias de aplicación.

Finalmente, el producto esperado de este objetivo fue un documento de levantamiento de requerimientos técnicos y funcionales, que sistematizó las necesidades detectadas y fue evaluada con la matriz de necesidades presentada en la tabla 2, como base para orientar el desarrollo de la herramienta de RA en los siguientes objetivos de la investigación.

El segundo objetivo de esta investigación consistió en analizar el estado del arte sobre la aplicación de la realidad aumentada (RA) en entornos BIM dentro del sector de la construcción, mediante una revisión bibliográfica sistemática que sirvió como insumo base para la definición y justificación del proyecto. Este análisis se articuló directamente con los requerimientos identificados en el primer objetivo, permitiendo contrastar las necesidades técnicas, operativas y funcionales detectadas en campo con las experiencias y buenas prácticas documentadas en la literatura científica y técnica.

La información se obtuvo exclusivamente de fuentes documentales, tales como artículos científicos indexados en Scopus y Web of Science, tesis de maestría y doctorado, y reportes de universidades y organismos internacionales sobre innovación tecnológica en construcción, garantizando evidencia robusta y actualizada acerca de la aplicación práctica de RA integrada con BIM. Por otro lado, se verificó que estas fuentes sean de los últimos 10 años, teniendo en cuenta que el desarrollo más relevante de estas herramientas se ha dado recientemente.

El análisis realizado se enfocó en variables clave que permiten caracterizar la implementación de la realidad aumentada en entornos BIM. En primer lugar, se consideraron las áreas de aplicación, que incluyen el control de calidad, la planificación de actividades, la supervisión en obra, la capacitación del personal y la coordinación de subcontratos. Asimismo, se examinaron las herramientas y plataformas utilizadas, tales

como software de modelado BIM como Revit, motores de realidad aumentada como Unity y Vuforia, así como los dispositivos asociados necesarios para su funcionamiento, incluyendo tablets, smartphones y computadoras. Otro aspecto relevante fueron los resultados reportados por la literatura, que evidenciaron mejoras en productividad, reducción de errores y retrabajos, mayor eficiencia en las inspecciones y optimización de los procesos de capacitación del personal. Finalmente, se analizaron las limitaciones encontradas, que abarcan barreras tecnológicas, resistencia del personal a la adopción de nuevas herramientas, problemas de compatibilidad entre plataformas, costos asociados y la disponibilidad de hardware adecuado para su correcta implementación. Estas variables se organizaron bajo las siguientes categorías:

- Integración RA–BIM: Cómo se combinan las herramientas y modelos digitales con la RA.
- Aplicaciones en obra: Casos de uso prácticos en fases de ejecución.
- Impacto en procesos constructivos: Efectos sobre productividad, calidad y eficiencia operativa.

El procedimiento seguido para la revisión bibliográfica incluyó la búsqueda sistemática en bases de datos mediante palabras clave específicas, la selección de documentos aplicando criterios de inclusión y exclusión, y la organización de la información mediante fichas bibliográficas y matrices de análisis documental. Con el fin de mantener un rumbo claro durante la revisión bibliográfica, y evitar perder el horizonte en medio de la cantidad de fuentes disponibles, se elaboró el checklist que se encuentra en el apéndice 2. Este instrumento funcionó como una guía práctica que permite evaluar de manera sistemática la relevancia, calidad y pertinencia de cada documento consultado, asegurando que los hallazgos contribuyan directamente al desarrollo del marco teórico y del estado del arte de esta investigación.

La información obtenida a partir de la revisión bibliográfica fue presentada de manera clara y estructurada, con el fin de facilitar la comprensión de los hallazgos y permitir una comparación efectiva entre las investigaciones consultadas. Para ello, se elaboraron cuadros comparativos de los estudios seleccionados, en los cuales se detallaron los autores, el año de publicación, el área de aplicación de la RA en entornos BIM, las herramientas utilizadas, los resultados reportados y las limitaciones identificadas. A modo de ejemplo, se mostraron la tabla 4 y tabla 5, de carácter comparativa que sintetizó esta información, permitiendo visualizar de forma inmediata las principales tendencias y aportes de cada investigación.

Adicionalmente, se elaboró una síntesis narrativa que permitió identificar los principales patrones de uso de la realidad aumentada (RA) integrada con la metodología BIM, así como las tendencias emergentes en su aplicación dentro de la industria de la construcción. Esta revisión facilitó el reconocimiento de los ámbitos con mayor potencial de impacto, los desafíos tecnológicos más frecuentes y las oportunidades de integración en los flujos de trabajo constructivos. Finalmente, se desarrolló una lista priorizada de buenas prácticas y requisitos técnicos derivados de la literatura especializada, que sirvió como guía de referencia

para orientar el diseño del prototipo RA–BIM propuesto y garantizar su coherencia con las experiencias y estándares internacionales reportados en el estado del arte.

Al finalizar esta fase se obtuvo un capítulo de estado del arte con análisis crítico, una síntesis de hallazgos que evidenció la pertinencia y viabilidad de implementar la herramienta RA en el contexto constructivo moderno. Este análisis constituyó un insumo sólido para el desarrollo del prototipo, al permitir alinear las mejores prácticas internacionales con los requerimientos específicos identificados en el primer objetivo de la investigación.

El tercer objetivo de esta investigación consistió en desarrollar una herramienta de realidad aumentada (RA) que permitiera la integración de los procesos durante la fase de ejecución de obra en proyectos constructivos. Para alcanzar este propósito, se contó con la participación de un equipo de desarrollo y de personal técnico que brindó retroalimentación constante sobre los avances del prototipo. Asimismo, se contó con la orientación académica del profesor guía, quien acompañó la validación de los resultados y orientó el cumplimiento de los requerimientos planteados desde el inicio.

Los especímenes utilizados en este proceso correspondieron a prototipos digitales, es decir, modelos BIM generados en software especializado de diseño. Dichos modelos sirvieron como insumo fundamental para la implementación de la RA, ya que contenían la información estructural y constructiva necesaria. La información complementaria se obtuvo de diversas fuentes: documentación técnica de los softwares empleados, manuales de desarrollo con Unity y AR Foundation, así como experiencias documentadas en la literatura académica, que aportaron criterios y buenas prácticas consolidadas para la creación de aplicaciones de RA en el ámbito de la construcción.

El desarrollo del prototipo se estructuró en tres categorías principales: desarrollo de software RA, integración con BIM y validación funcional. Inicialmente, se consideró el uso de la plataforma Vuforia; sin embargo, durante la fase de pruebas se identificaron limitaciones en la generación del archivo ejecutable (APK) y dependencias del sistema basadas en el uso de image targets, lo que restringía la libre visualización de los modelos en el entorno real. Como respuesta a estas dificultades, se optó por implementar AR Foundation, un marco de desarrollo nativo de Unity que permite la detección automática de superficies planas mediante ARCore (Android) y ARKit (iOS), eliminando la necesidad de marcadores físicos.

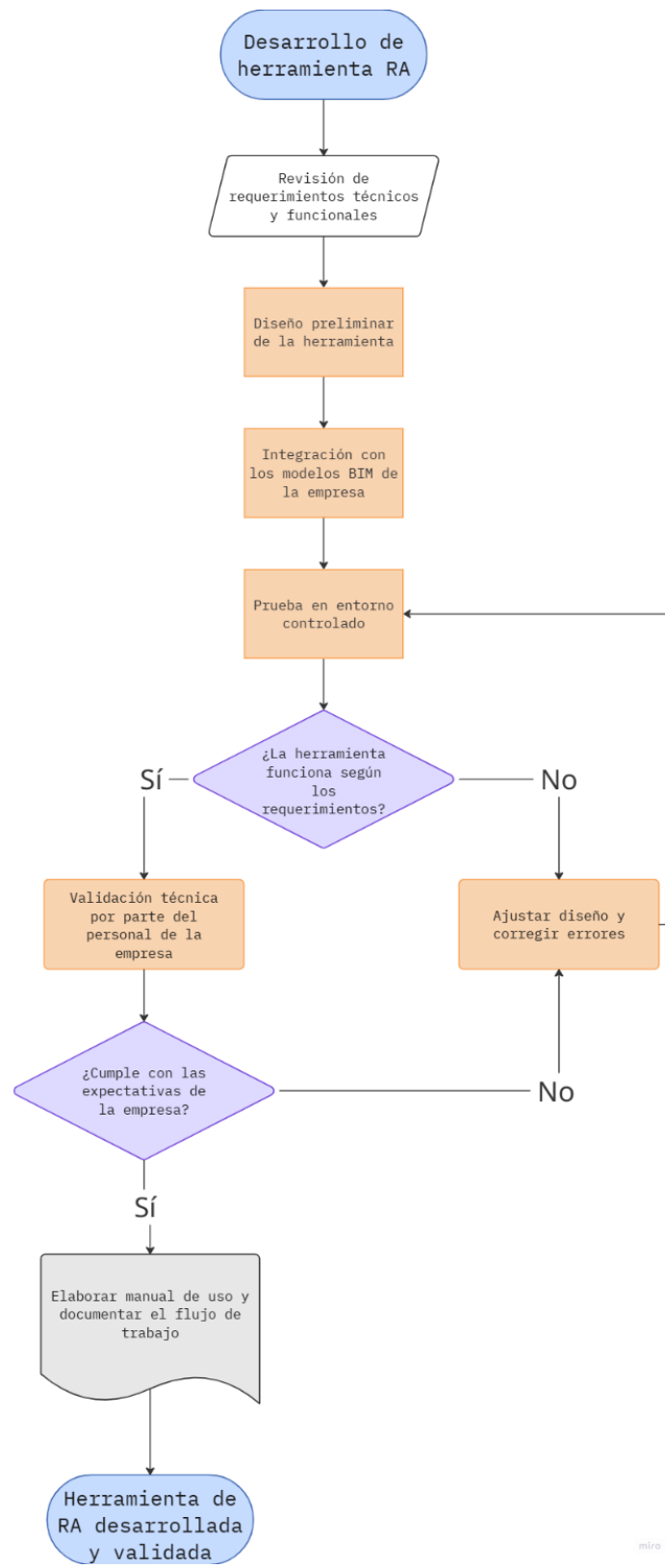
El desarrollo de la aplicación se basó en el template “AR Mobile” de Unity, el cual sirvió como punto de partida para la configuración del entorno de realidad aumentada. Este template facilitó la creación de un flujo de trabajo estructurado con componentes preconfigurados, tales como el AR Session, el AR Session Origin y la AR Camera, que permitieron gestionar la sesión de RA, la detección de planos y el seguimiento espacial del dispositivo. A partir de esta base, se incorporaron scripts personalizados en C# para la gestión del menú principal, el despliegue y reposicionamiento de modelos BIM, así como la interacción del usuario con los elementos en pantalla.

Esta configuración permitió unificar los procesos de detección, anclaje y visualización del modelo, optimizando el rendimiento de la aplicación y garantizando una experiencia fluida en dispositivos móviles. En conjunto, estas decisiones técnicas no solo resolvieron los problemas de compatibilidad iniciales, sino que también aportaron mayor flexibilidad, estabilidad y realismo, al permitir que los modelos BIM se proyectaran directamente sobre el entorno físico con precisión espacial, libertad de movimiento y una interfaz intuitiva adaptada a las necesidades de obra.

Durante el proceso de desarrollo se aplicó un enfoque iterativo de mejora continua, en el cual se realizaron pruebas experimentales enfocadas en el posicionamiento, la visualización y la interacción con los modelos digitales. Cada iteración permitió identificar y corregir errores relacionados con la escala, el anclaje espacial y la optimización de rendimiento en dispositivos móviles.

Para garantizar la pertinencia del proceso, los instrumentos empleados incluyeron los softwares de modelado y RA, así como dispositivos móviles y tabletas con soporte para ARCore, que permitieron la evaluación en condiciones similares a las que se presentan en obra real. Además, se diseñó y aplicó un diagrama de flujo metodológico visualizado en la figura 05, el cual guió de manera sistemática la validación de la herramienta, estableciendo entradas, procesos, decisiones y salidas esperadas en cada iteración.

Figura 5. Flujograma para la validación de la herramienta de RA



La información generada durante las pruebas fue registrada en diferentes formatos como capturas de pantalla del prototipo y reportes técnicos de validación. Este registro permitió evaluar indicadores específicos, entre ellos: precisión en el posicionamiento del modelo, estabilidad de la visualización, tiempos de respuesta del sistema y nivel de desempeño general en dispositivos de diferente capacidad. El análisis se orientó a verificar la correcta operación de la herramienta, aplicando ajustes técnicos hasta alcanzar un prototipo estable, fluido y alineado con los requerimientos planteados en los objetivos previos.

Como productos obtenidos en esta fase, se desarrolló un prototipo funcional de la herramienta RA–BIM, capaz de proyectar modelos digitales de construcción en el entorno físico con precisión y facilidad de uso. A este se sumó un manual preliminar de usuario técnico, concebido como guía de referencia para la configuración y operación de la aplicación en campo, junto con una documentación técnica del flujo de trabajo, que sistematizó el proceso completo desde la exportación de modelos BIM hasta su visualización mediante realidad aumentada. Esta documentación se consolidó como un insumo clave para asegurar la correcta implementación y operatividad de la herramienta, además de servir como base para futuras mejoras e implementaciones a mayor escala dentro del sector constructivo.

El cuarto objetivo de esta investigación consistió en implementar un caso piloto en un entorno real de obra utilizando la herramienta de realidad aumentada (RA) desarrollada, con el propósito de validar su funcionalidad, precisión y aplicabilidad en procesos constructivos reales. Para ello, se realizó una prueba práctica en condiciones controladas de campo, que permitió observar el desempeño del prototipo en situaciones similares a las de una obra en ejecución.

La validación contó con la participación de un grupo técnico reducido, conformado por la investigadora y un colaborador del ámbito profesional del sector construcción, quienes brindaron retroalimentación sobre la usabilidad, la claridad de la proyección y la utilidad de la herramienta en labores de supervisión y control. Esta dinámica permitió evaluar la respuesta del sistema frente a los desafíos propios del entorno constructivo, al tiempo que fomentó la formación y familiarización de los participantes con el uso de tecnologías inmersivas.

Los especímenes utilizados correspondieron a elementos constructivos del proyecto en ejecución, proyectados mediante la aplicación RA–BIM, sirviendo como base para la evaluación de la herramienta en condiciones auténticas de trabajo. La información necesaria para el piloto se obtuvo a través de la observación directa en campo, retroalimentación mediante encuestas de validación y entrevistas con el personal técnico, complementando la documentación técnica del prototipo desarrollada previamente.

La implementación del caso piloto se estructuró en tres categorías principales: impacto técnico, impacto operativo y percepción de usuarios. En la fase inicial, se realizó una capacitación previa con la cuadrilla piloto para familiarizar al personal con la herramienta y su funcionamiento. Posteriormente, se ejecutó el piloto en obra, donde se proyectaron los modelos digitales sobre el entorno físico mediante dispositivos móviles y tablets. Durante esta etapa, se realizaron observaciones estructuradas para registrar

la claridad de la visualización, la detección de inconsistencias en campo, la reducción de errores de interpretación y la aceptación del personal sobre la utilidad de la herramienta.

Los instrumentos utilizados incluyeron la encuesta de validación y la guía de observación, que permitieron sistematizar la recolección de datos. La información obtenida se documentó mediante fotografías del piloto, tablas comparativas pre/post uso de la herramienta, registros de observación y gráficos estadísticos. En particular, se elaboró un gráfico de satisfacción del personal que permitió medir de manera visual y directa la aceptación de la herramienta en relación con dimensiones técnicas, operativas y de utilidad percibida en obra.

El análisis se realizó mediante un enfoque descriptivo de las encuestas, triangulación con observaciones y entrevistas, y síntesis de hallazgos para evaluar la efectividad de la herramienta en términos de visualización, control de calidad, eficiencia y aceptación. Este procedimiento permitió aterrizar el trabajo realizado desde los primeros objetivos de la investigación hasta su validación en campo.

Como productos obtenidos, se elaboró un informe de validación del caso piloto, que incluyó los resultados técnicos y operativos de la herramienta RA-BIM, así como un gráfico de satisfacción del personal que evidenció la aceptación del uso de la herramienta en la cuadrilla piloto. Además, se generó un documento ajustado del flujo de trabajo, incorporando las recomendaciones derivadas de la experiencia en obra, sirviendo como guía para futuras mejoras a mayor escala dentro del sector construcción.

Capítulo 3: Resultados

En este apartado se presentan los principales hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación, derivados de la aplicación de encuestas, revisión bibliográfica, desarrollo del prototipo y la implementación del caso piloto. Los resultados se organizan en función de los objetivos específicos planteados, con el propósito de mostrar de manera clara y estructurada el cumplimiento de cada uno de ellos.

Se exponen tanto los datos cuantitativos, representados mediante gráficos y tablas que facilitan su interpretación, como los cualitativos que permiten profundizar en la percepción del personal participante y en la validación práctica de la herramienta de realidad aumentada (RA). Asimismo, se incluyen las matrices de necesidades, los análisis comparativos con estudios previos y la documentación del proceso de prueba del prototipo, todo con el fin de ofrecer una visión integral del impacto que puede tener la integración RA–BIM en los procesos constructivos.

3.1 Identificación de necesidades técnicas, operativas y funcionales

Con el fin de identificar las necesidades, expectativas y condiciones técnicas relacionadas con la implementación de una herramienta de realidad aumentada (RA) integrada con modelos BIM, se aplicó una encuesta al personal vinculado con procesos constructivos. A continuación, se presentan los principales resultados organizados según el tipo de pregunta planteada.

3.1.1 Limitaciones actuales de trabajar con planos tradicionales y barreras técnicas para la RA

Los encuestados coincidieron en que una de las principales dificultades en la fase de ejecución proviene del uso de planos 2D o de taller. Estos materiales limitan la visualización tridimensional del proyecto, dificultan la ubicación espacial de los elementos y generan errores de interpretación que se traducen en retrabajos. A esto se suman problemas prácticos, como el deterioro de planos impresos por las condiciones ambientales de obra, la pérdida de láminas físicas, o la dificultad para manipular archivos digitales pesados en dispositivos móviles. Estos resultados se visualizan en la figura 8.

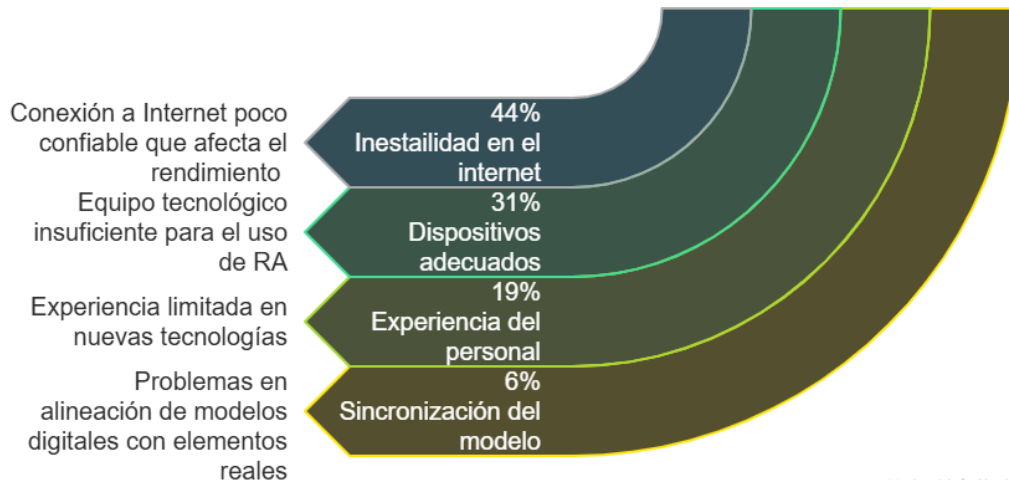
Figura 8. Principales dificultades identificadas en la ejecución de obra al trabajar con planos 2D.



Estas limitaciones explican por qué los equipos de trabajo dependen en gran medida del conocimiento del inspector o del maestro de obras para aclarar dudas, lo que introduce un componente subjetivo y de riesgo en la ejecución. Al relacionar estas dificultades con la implementación de RA, como se observa en la figura 9, se identificaron barreras adicionales: la inestabilidad en la señal de internet (44%), la falta de dispositivos tecnológicos adecuados (31%), la escasa experiencia del personal en nuevas tecnologías (19%), y los fallos en la sincronización de modelos (6%). En conjunto, estos hallazgos destacan la necesidad de diseñar una

herramienta que sea robusta frente a entornos de obra, ligera en el manejo de modelos y lo más intuitiva posible para garantizar su adopción.

Figura 9. Principales limitaciones técnicas identificadas para la implementación de herramientas RA-BIM en obra.



3.1.2 Etapas y áreas estratégicas de aplicación de la RA

En relación con las etapas del proceso constructivo, según lo que se visualiza en la figura 10, la RA fue considerada especialmente útil en la supervisión y seguimiento en obra, identificada como la fase de mayor impacto. En este punto, la herramienta podría convertirse en un medio directo para verificar que los elementos ejecutados se ajusten a los modelos BIM, detectar inconsistencias en tiempo real y reducir la dependencia de inspecciones tradicionales basadas únicamente en planos.

La capacitación en campo apareció como la segunda etapa prioritaria, ya que la RA se visualiza como una herramienta que permitiría a operarios y técnicos aprender mediante la interacción directa con modelos proyectados, reduciendo el tiempo de instrucción y minimizando la dependencia de materiales estáticos o sesiones exclusivamente teóricas. Otras etapas destacadas fueron el control de calidad, la planificación inicial del proyecto y la presentación de avances a clientes o inversionistas, lo que confirma que la RA puede trascender el ámbito técnico y convertirse en un recurso de apoyo a la gestión y la comunicación.

Figura 10. Etapas del proceso constructivo con mayor potencial de aplicación de la RA.



En cuanto a las áreas de un proyecto constructivo donde la RA tendría mayor impacto, según lo representado en la figura 11, los encuestados ubicaron en primer lugar el diseño y modelado BIM, seguido de la planificación y control de proyectos y la supervisión en obra. También se mencionaron como relevantes, aunque en menor medida, la capacitación del personal, las ventas y mercadeo de proyectos, la logística y gestión de materiales y la coordinación interdisciplinaria. Este orden refleja que la RA no solo es vista como un recurso de apoyo en la ejecución, sino también como un factor que podría potenciar la productividad y competitividad de los proyectos desde sus fases iniciales.

Figura 11. Áreas del proyecto constructivo con mayor impacto potencial de la realidad aumentada.

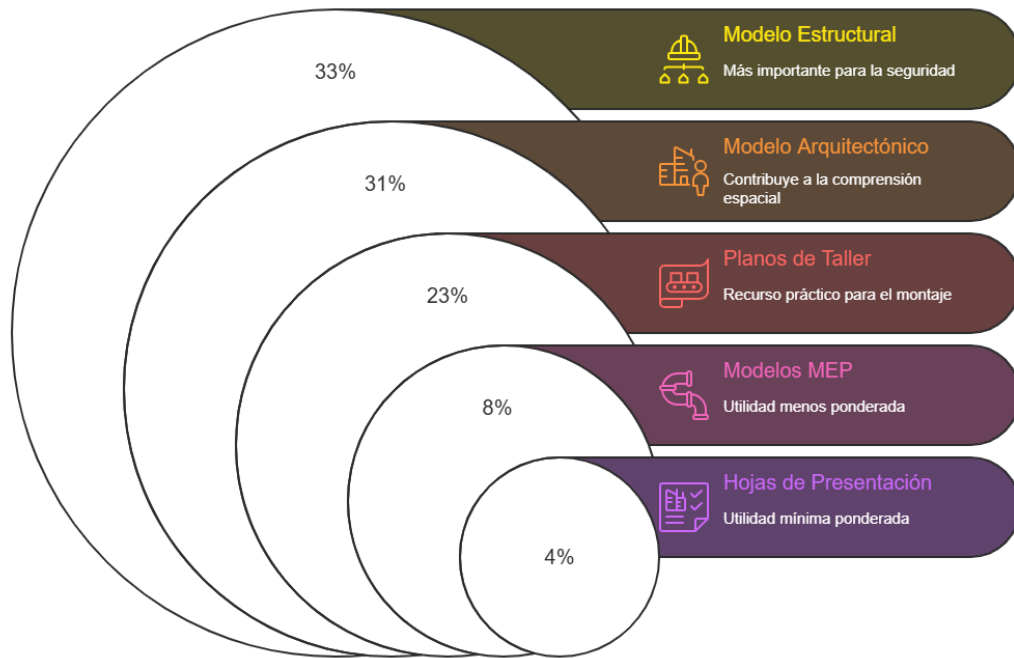


3.1.3 Elementos BIM prioritarios para la proyección en campo

Otro hallazgo relevante fue la identificación de los componentes BIM considerados indispensables para la proyección en campo, que se detalla en la figura 12. El modelo estructural (33%) fue valorado como el más importante, al ser el que permite verificar la ubicación y disposición de elementos críticos como columnas, vigas y refuerzos, cuya correcta ejecución impacta directamente en la seguridad del proyecto.

El modelo arquitectónico (31%) ocupó el segundo lugar, principalmente por su aporte a la comprensión espacial y la revisión de acabados y distribuciones. En tercer lugar, los planos de taller (23%) fueron reconocidos como un recurso práctico de apoyo al montaje, aunque se percibe que podrían ser reemplazados o complementados por la proyección directa del modelo 3D. Finalmente, los modelos MEP (8%) y las láminas de presentación (4%) recibieron menor ponderación, lo que refleja que su utilidad es más complementaria.

Figura 12. Componentes prioritarios del modelo BIM para visualización en realidad aumentada.



Esta priorización, permite orientar el diseño de la herramienta hacia la arquitectura y la estructura como ejes centrales, dejando la integración de otros elementos como un proceso gradual de expansión.

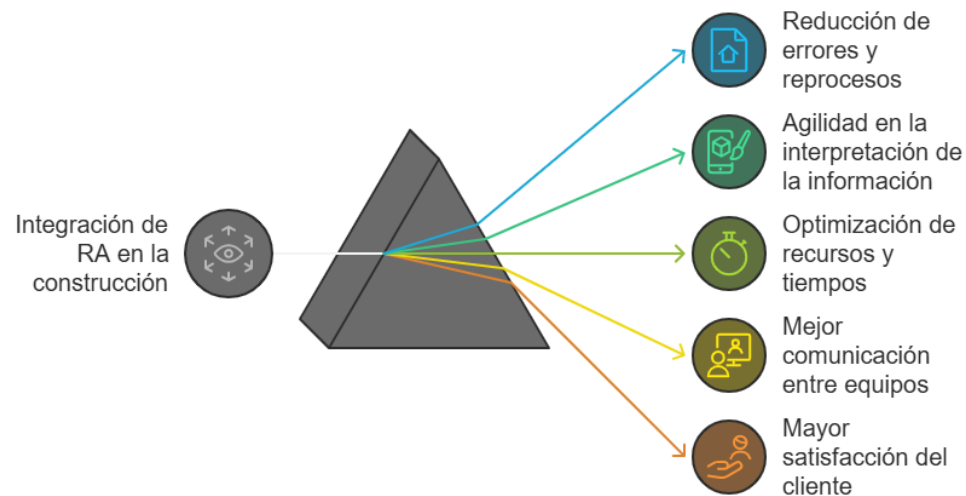
3.1.4 Beneficios esperados de la implementación de RA-BIM

En cuanto a los beneficios que se observan en la figura 13, los encuestados proyectaron un espectro amplio de aportes que van desde lo técnico hasta lo estratégico. Entre los más destacados se encuentran:

- Reducción de errores en obra y de reprocesos costosos, al disponer de modelos precisos que guíen a las cuadrillas.
- Agilidad en la interpretación de la información, ya que el personal podría acceder a los modelos directamente desde dispositivos móviles, sin depender de planos impresos.
- Optimización de recursos y tiempos, mediante la disminución de desperdicios de materiales y la reducción de retrasos asociados a malas interpretaciones.

- Mejor comunicación entre equipos técnicos y operativos, al compartir una visualización unificada y clara del proyecto.
- Mayor satisfacción del cliente, al contar con una herramienta que facilite mostrar avances, validar decisiones y anticipar resultados de forma realista.

Figura 13. Posibles beneficios identificados de la integración de una herramienta RA–BIM en proyectos constructivos.

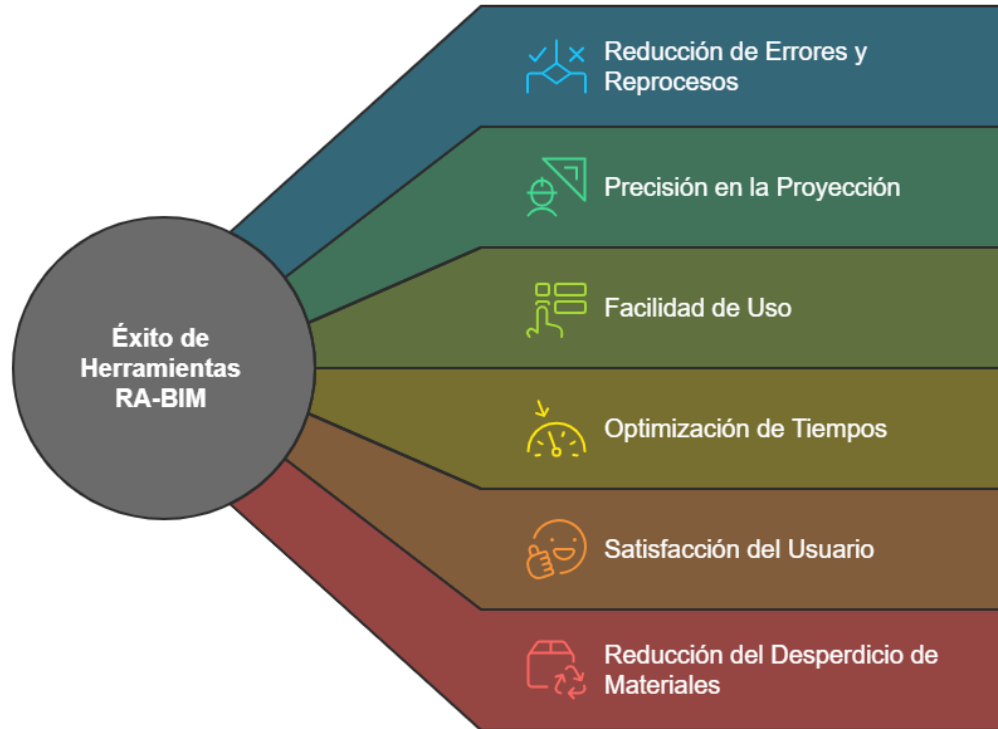


De manera transversal, se percibe que la RA se convertiría en un puente entre el diseño digital y la obra física, mejorando tanto la precisión de la ejecución como la percepción de valor por parte de los usuarios finales.

3.1.5 Factores de éxito y disposición de los usuarios

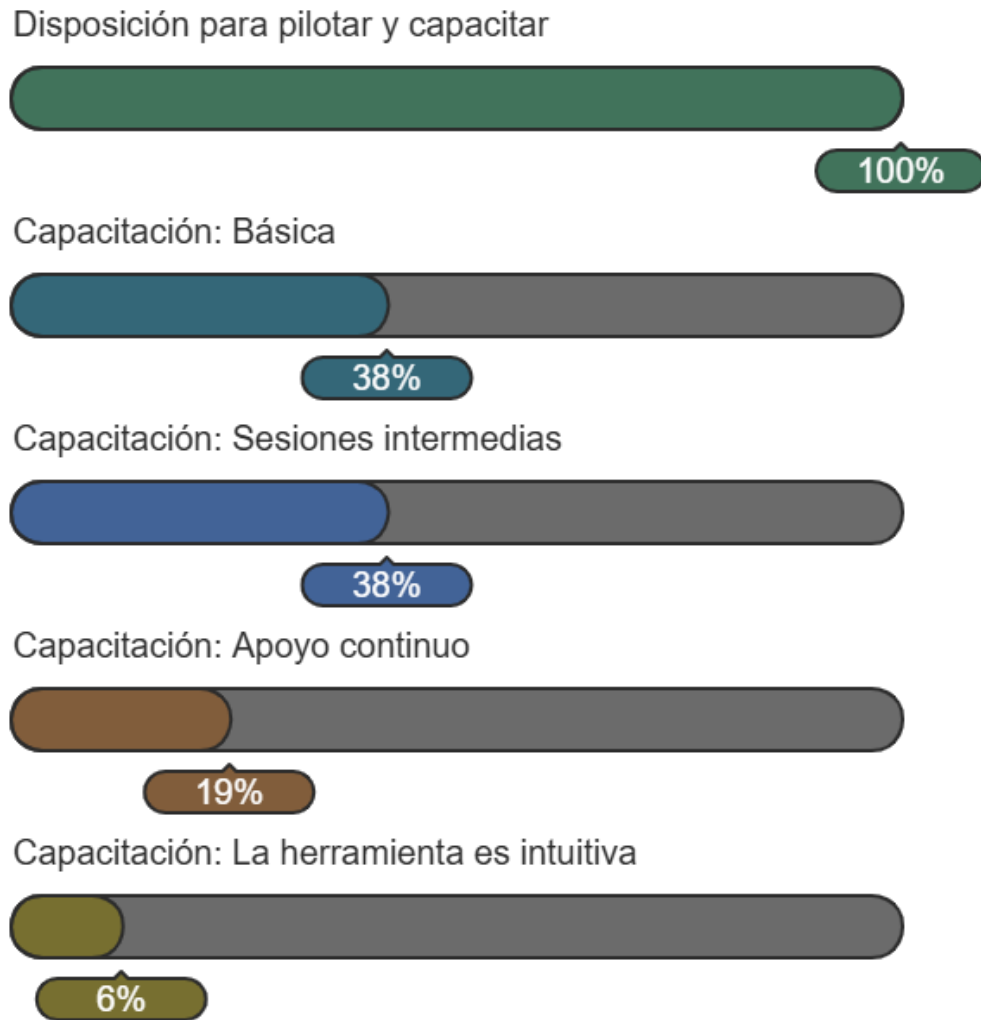
Finalmente, como se ve en la figura 14, los encuestados señalaron los criterios que consideran más importantes para evaluar el éxito de una herramienta RA–BIM. La reducción de errores y reprocesos ocupó el primer lugar, seguida de la precisión en la proyección, la facilidad de uso, la optimización de tiempos, la satisfacción del usuario y, en menor medida, la reducción del desperdicio de materiales. Esta jerarquía evidencia que los aspectos técnicos y operativos son prioritarios frente a criterios de sostenibilidad, aunque estos últimos también forman parte de la expectativa general.

Figura 14. Principales criterios de evaluación del éxito de una herramienta RA-BIM según los encuestados.



La disposición hacia la adopción de la herramienta fue unánime: el 100% de los participantes expresó estar dispuesto a participar en pruebas piloto y capacitaciones. Sobre el nivel de formación requerido, según la figura 15, un 38% señaló que una capacitación básica sería suficiente, otro 38% indicó que se necesitarían varias sesiones intermedias, un 19% sugirió la necesidad de acompañamiento continuo, y un 6% opinó que la herramienta sería intuitiva.

Figura 15. Disposición del personal y nivel de capacitación estimado para el uso de la herramienta RA-BIM.



Este resultado confirma que la RA es percibida como una innovación aceptada positivamente, aunque su éxito dependerá en gran medida de la estrategia de capacitación y acompañamiento durante la implementación.

3.1.6 Matriz de necesidades técnicas operativas y funcionales

Por otro lado, con el propósito de sistematizar la información obtenida en las encuestas, se elaboró una matriz de necesidades técnicas, operativas y funcionales que recoge los principales aportes señalados por los participantes. Esta matriz permite organizar los hallazgos en categorías clave como visualización, control de calidad, capacitación y eficiencia operativa, facilitando la identificación de los aspectos críticos que deben ser considerados en el diseño de la herramienta RA-BIM, tomando como referencia los aspectos más importantes. De esta forma, se logra una representación clara y estructurada de las prioridades detectadas en el sector, constituyendo un insumo fundamental para orientar el desarrollo y validación del prototipo.

Tabla 2. Matriz de necesidades para la evaluación de la información recolectada

Categoría	Necesidades identificadas	Hallazgos de la encuesta	Implicaciones para la herramienta RA-BIM
Visualización y comprensión del proyecto	Superar limitaciones de planos 2D y mejorar la interpretación espacial de los modelos.	Dificultades actuales: errores de interpretación, falta de perspectiva 3D, planos deteriorados o perdidos, detalles poco claros.	La RA debe proyectar modelos estructurales y arquitectónicos directamente en obra, facilitando la ubicación espacial y la comprensión integral de los sistemas.
Control de calidad y supervisión	Contar con herramientas que permitan verificar montaje, detectar inconsistencias y reducir errores en obra.	Áreas prioritarias: supervisión/inspección de obra y planificación. Criterios de éxito: reducción de errores y precisión en la proyección.	La herramienta debe incluir funciones de comparación en tiempo real entre el modelo BIM y la ejecución física, reforzando la precisión y reduciendo reprocesos.
Capacitación y adopción del personal	Asegurar que el personal en obra entienda y utilice la herramienta sin generar resistencia al cambio.	Disposición positiva del 100%. Capacitación básica/intermedia (76%). Comentarios: necesidad de manuales, guías y facilidad de uso.	Se recomienda un plan de capacitación progresiva, acompañado de materiales accesibles y un diseño intuitivo que minimice la curva de aprendizaje.
Eficiencia operativa y recursos	Mejorar tiempos de ejecución, evitar desperdicios y optimizar el uso de materiales.	Beneficios esperados: reducción de errores, eficiencia en ejecución, optimización de recursos, mayor satisfacción del cliente. Limitaciones: señal de internet inestable (44%), equipos insuficientes (31%).	La herramienta debe ser ligera, multiplataforma y con modo offline, además de contribuir a la planificación de recursos y reducción de desperdicios.
Colaboración y comunicación	Facilitar la coordinación interdisciplinaria y la comunicación con clientes e inversionistas.	Áreas de impacto secundarias: coordinación, logística y mercadeo. Etapas útiles: presentación de avances a clientes, planificación inicial.	La RA debe ofrecer opciones de visualización compartida y presentaciones interactivas, mejorando tanto la comunicación interna como la externa.

3.1.7 Recomendaciones iniciales para el diseño de la herramienta RA-BIM

A partir de los hallazgos obtenidos en las encuestas y la sistematización realizada en la matriz de necesidades, se derivaron una serie de recomendaciones iniciales orientadas al diseño de la herramienta de realidad aumentada integrada con modelos BIM. Estas recomendaciones permiten definir lineamientos prácticos que guiarán el desarrollo del prototipo, asegurando que responda a las limitaciones técnicas detectadas, a las necesidades operativas en obra y a las expectativas de los usuarios.

En particular, los resultados sugieren:

1. Priorización de funciones esenciales

La herramienta debe enfocarse en la proyección clara y precisa de modelos arquitectónicos y estructurales, que fueron identificados como los elementos BIM más críticos en obra. Se recomienda incluir planos de taller de forma complementaria, sin sobrecargar la interfaz.

2. Optimización para condiciones técnicas de obra

Dado que las principales limitaciones señaladas fueron la conectividad a internet y la capacidad de los dispositivos móviles, la aplicación deberá estar diseñada para funcionar de manera fluida en equipos de gama media y con posibilidad de operar parcialmente en modo offline.

3. Enfoque en visualización y control de calidad

Las etapas de supervisión, control de calidad y capacitación en campo fueron consideradas como las de mayor impacto para la RA. Por ello, la herramienta debe integrar funcionalidades que faciliten la ubicación espacial de los elementos, la detección de inconsistencias y la verificación de dimensiones y detalles constructivos.

4. Facilidad de uso y curva de aprendizaje baja

Los participantes indicaron la necesidad de una interfaz intuitiva que requiera como máximo una capacitación básica o intermedia. Se recomienda un diseño amigable, con menús simples y botones de acceso directo a las funciones principales.

5. Soporte para procesos colaborativos

La RA no debe concebirse únicamente como un recurso visual, sino como una herramienta de apoyo a la comunicación en obra. Por ello, se recomienda incorporar funciones que permitan registrar observaciones, realizar anotaciones sobre el modelo y compartir información en tiempo real con otros miembros del equipo.

6. Integración progresiva en obra

Para garantizar la aceptación del personal, se sugiere un plan de implementación gradual, acompañado de sesiones de capacitación prácticas, manuales de usuario y pruebas piloto que refuercen la confianza en el uso de la herramienta.

Los resultados obtenidos muestran que las principales limitaciones en los procesos constructivos están relacionadas con el uso de planos 2D, la dificultad para interpretar modelos tridimensionales y los problemas en la manipulación de información en obra. Se identificaron barreras técnicas para la implementación de RA, como conectividad limitada, falta de dispositivos adecuados y escasa experiencia en tecnologías digitales.

Se determinaron las etapas y áreas donde la RA tendría mayor impacto, destacando supervisión de obra, control de calidad y capacitación del personal. Los elementos BIM prioritarios para la proyección en campo fueron los modelos estructurales y arquitectónicos, seguidos de los planos de taller, mientras que los modelos MEP y las láminas de presentación tuvieron menor relevancia.

Entre los beneficios esperados se incluyen la reducción de errores y reprocesos, mayor agilidad en la interpretación de información, optimización de recursos y tiempos, mejor comunicación entre equipos y mayor satisfacción de los usuarios. Finalmente, se constató una disposición positiva hacia la adopción de la herramienta, con la mayoría del personal requiriendo capacitación básica o intermedia para su uso efectivo.

Concluyendo, se elaboró una matriz de necesidades técnicas, operativas y funcionales y se definieron recomendaciones iniciales para el diseño de la herramienta RA-BIM, priorizando funciones esenciales, optimización para condiciones de obra, facilidad de uso, soporte para procesos colaborativos e integración progresiva.

3.2 Revisión sistemática del estado del arte en la integración RA–BIM en construcción

En este apartado se presentan los principales hallazgos derivados de la revisión bibliográfica sobre la aplicación de la realidad aumentada (RA) en entornos BIM dentro del sector construcción. La revisión permitió identificar tendencias, herramientas, casos de uso y limitaciones documentadas en la literatura reciente, organizando la información en función de los criterios definidos en la metodología.

Los resultados se exponen a través de un apartado de revisión técnica clasificado por áreas temáticas, fichas técnicas que sintetizan experiencias relevantes de implementación, un cuadro comparativo de las herramientas tecnológicas más utilizadas en la integración RA–BIM y, finalmente, una lista priorizada de buenas prácticas y requisitos técnicos extraídos de los estudios consultados. Esta estructura busca no solo facilitar la comprensión de la evolución y el estado actual de la tecnología, sino también proporcionar insumos concretos y aplicables para orientar el diseño del prototipo propuesto en esta investigación.

3.2.1 Apartado de revisión técnica y bibliográfica clasificada por áreas temáticas

La revisión técnica y bibliográfica realizada permitió organizar la información recopilada en áreas temáticas que agrupan los principales aportes de la literatura sobre la aplicación de la realidad aumentada (RA) en entornos BIM dentro del sector de la construcción. Esta clasificación responde a la necesidad de estructurar de manera clara los hallazgos, de modo que cada área temática refleje un aspecto particular de la integración RA–BIM, ya sea desde el punto de vista tecnológico, metodológico o de aplicación práctica.

La organización de la información en temáticas específicas como visualización y modelado digital, control de calidad, capacitación y transferencia de conocimiento, planificación y coordinación de proyectos, entre otras, permite no solo identificar los enfoques más investigados, sino también reconocer vacíos de conocimiento y oportunidades de innovación. Asimismo, este documento funciona como una base sólida para orientar el diseño de la herramienta propuesta, al brindar un panorama ordenado y crítico de los avances alcanzados a nivel internacional.

3.2.1.1. Visualización de Modelos 3D y Modelado Digital

A continuación, se procede a analizar las principales aplicaciones de la Realidad Aumentada (RA) en la visualización de modelos tridimensionales y el modelado digital dentro del ámbito constructivo. Se abordan los aspectos que explican cómo esta tecnología mejora la comprensión espacial y del diseño, fortalece la comunicación y colaboración entre los actores del proyecto, y aprovecha diversas herramientas digitales para su implementación práctica. A lo largo del desarrollo, se examinan las plataformas, dispositivos y softwares que permiten integrar la RA con la metodología BIM, destacando su aporte en la eficiencia y precisión de los procesos constructivos.

Esta área temática se centra en la capacidad de la RA para superponer modelos digitales tridimensionales (3D) sobre el entorno físico, mejorando la comprensión de los diseños y proyectos de construcción (Ponce et al., 2024). La integración con la metodología BIM es fundamental, ya que permite visualizar e interactuar con el modelo informado directamente en la obra (Martínez & Domínguez, 2018).

Comprensión Espacial y de Diseño: La RA facilita una comprensión superior del diseño, especialmente para aquellos sin formación técnica, al superar las barreras asociadas a la interpretación de planos 2D (La Rivera et al., 2025). Permite a arquitectos, ingenieros y clientes "caminar" dentro de una representación a escala real del proyecto antes de que comience la construcción, como se visualiza en la figura 16, mejorando la percepción del espacio, la escala y las proporciones (Ponce et al., 2024). Si bien BIM se basa en la generación de un modelo 3D, su visualización en dispositivos bidimensionales limita la experiencia, algo que la RA resuelve al reproducir elementos digitales sobre el entorno físico real (Martínez & Domínguez, 2018).

Figura 16. *Uso de herramienta RA-BIM para mejorar la comprensión espacial*



Fuente: Obtenido de Gamma AR

Mejora de la Comunicación y Colaboración: La visualización en tiempo real de modelos 3D superpuestos al entorno físico mejora significativamente la comunicación entre arquitectos, ingenieros, contratistas y clientes, creando un entorno de colaboración más eficiente y comprensible (Ponce et al., 2024). La plataforma GAMMA AR, por ejemplo, permite que los equipos discutan los diseños en un entorno inmersivo, lo que facilita la toma de decisiones conjunta y una colaboración interdisciplinaria más efectiva (Ponce et al., 2024). Dispositivos como las HoloLens de Microsoft también facilitan el trabajo colaborativo remoto, permitiendo que un operario en obra muestre en tiempo real la realidad física y el holograma a un equipo técnico en la oficina (Martínez & Domínguez, 2018).

Herramientas y Tecnologías Clave: Para lograr esta visualización, se utilizan herramientas de software como Unity y Vuforia (Guzmán Paredes, 2022). Unity es un motor de videojuegos multiplataforma que permite crear experiencias 3D envolventes, mientras que Vuforia es un kit de desarrollo de software (SDK) que facilita el reconocimiento de imágenes y objetos para superponer los elementos virtuales (Guzmán Paredes, 2022). La interoperabilidad entre softwares BIM (como Tekla o Revit) y plataformas en la nube (como Trimble Connect) es crucial para transformar los modelos en archivos legibles por dispositivos de RA como las HoloLens (Martínez & Domínguez, 2018).

3.2.1.2. Control de Calidad, Inspección y Ejecución de Obra

En este apartado se examina la aplicación de la Realidad Aumentada (RA) en los procesos de control de calidad, inspección y ejecución dentro del entorno constructivo. Se presentan las formas en que esta

tecnología contribuye a optimizar la verificación del cumplimiento de diseño, la detección temprana de errores y el seguimiento preciso de las actividades en obra. Además, se abordan los principales desafíos técnicos asociados a su implementación en campo, considerando los requerimientos de precisión y calibración necesarios para asegurar resultados confiables.

El uso de la RA en el control de calidad e inspección es una de las aplicaciones más investigadas y con mayor potencial de impacto en la eficiencia de los proyectos constructivos (La Rivera et al., 2025). Permite comparar el diseño proyectado con las condiciones reales del sitio, facilitando la detección temprana de discrepancias.

Detección de Errores y Discrepancias: La RA permite una comparación constante entre el modelo BIM y el desarrollo físico de la obra, ayudando a detectar y corregir errores antes de que se conviertan en problemas costosos (Ponce et al., 2024). Plataformas como GAMMA AR han demostrado reducir los errores de construcción hasta en un 30% (Ponce et al., 2024). Esta capacidad es fundamental para verificar especificaciones y detectar desviaciones en el posicionamiento de elementos, como cajas eléctricas, o en la ejecución de estructuras, como ejemplificación se puede consultar la figura 17 (La Rivera et al., 2025).

Figura 17. *Uso de herramienta RA-BIM control de errores y labores de mantenimiento*



Fuente: Obtenido de INGENIEUR.de

Seguimiento de Obra y Control de Ejecución: La tecnología permite a los supervisores de obra visualizar elementos pendientes de ejecución, como instalaciones o armados estructurales, directamente en el entorno real (Gomis Álvarez, 2017). Proyectos como Sicura Edificación permiten realizar un control integral de la evolución de la construcción con precisión milimétrica, asegurando que las piezas encajen conforme a

lo previsto y reduciendo la diferencia entre la oficina técnica y la obra (Gomis Álvarez, 2017). Esto agiliza el ciclo de diseño con datos de mayor calidad compartidos por más usuarios (Gomis Álvarez, 2017).

Desafíos Técnicos en Terreno: A pesar de su potencial, la implementación de RA para el control de calidad enfrenta desafíos significativos. La precisión en la localización espacial y la alineación entre el modelo digital y el entorno físico es uno de los retos más relevantes (La Rivera et al., 2025). Errores de posicionamiento pueden ocurrir debido a condiciones de iluminación deficientes, superficies irregulares, interferencias en la señal GPS o descalibraciones del sistema (La Rivera et al., 2025). Se requiere que los modelos BIM tengan una alta precisión geométrica y dimensional, ya que diferencias mínimas pueden provocar errores de visualización (La Rivera et al., 2025).

3.2.1.3. Capacitación, Seguridad y Transferencia de Conocimiento

Seguidamente, se analizan las aplicaciones de la Realidad Aumentada (RA) orientadas a la formación del personal, la mejora de la seguridad laboral y la transferencia de conocimiento en el sector de la construcción. Se aborda cómo el uso de entornos inmersivos facilita el aprendizaje de procedimientos técnicos, promueve una mayor conciencia sobre los riesgos en obra y contribuye a la difusión del conocimiento constructivo tanto en contextos académicos como profesionales.

A continuación, se presentan las principales líneas de aplicación relacionadas con la capacitación y entrenamiento, la educación en construcción arquitectónica y el fortalecimiento de la seguridad en el trabajo, es decir, como la RA se ha posicionado como una herramienta eficaz para la formación y mejora de la seguridad laboral en la construcción, ofreciendo un enfoque práctico e inmersivo para la transferencia de conocimiento.

Formación y Entrenamiento: Las simulaciones interactivas en entornos de RA permiten a los trabajadores familiarizarse con procedimientos de seguridad y tareas complejas antes de enfrentarse a situaciones reales, lo que reduce el riesgo de accidentes (Ponce et al., 2024). Esto minimiza el tiempo de capacitación y aumenta la retención de información clave (Alamillo, García & Magdalena, 2014). Históricamente, el conocimiento en construcción se transmitía de maestro a aprendiz en un entorno práctico (Alamillo, García & Magdalena, 2014). La RA puede replicar, aunque con limitaciones, algunas de estas condiciones al permitir que los estudiantes interactúen con ejemplos reales de manera virtual y tutelada (Alamillo, García & Magdalena, 2014).

Educación en Construcción Arquitectónica: En el ámbito universitario, la RA puede complementar la enseñanza práctica aliviando la desconexión entre la teoría y el ejercicio profesional (Alamillo, García & Magdalena, 2014). Se pueden crear catálogos de información sobre edificios, donde los estudiantes, usando sus dispositivos móviles, accedan a detalles constructivos y fichas informativas geolocalizadas, convirtiendo

la realidad constructiva en un "museo guiado" (Alamillo, García & Magdalena, 2014). Esto fomenta una "observación activa" de la realidad constructiva, atrayendo a los alumnos, que a menudo se desenvuelven mejor en el mundo virtual, hacia el mundo real (Alamillo, García & Magdalena, 2014).

Mejora de la Seguridad Laboral: La RA ha sido utilizada para mejorar la seguridad laboral al permitir la identificación de riesgos y la visualización de elementos de protección en el entorno de trabajo (La Rivera et al., 2025).

3.2.1.4. Planificación, Coordinación y Gestión de Proyectos

La incorporación de la Realidad Aumentada (RA) en los procesos de planificación, coordinación y gestión de proyectos constructivos debe ser analizada desde cómo su aplicación contribuye a mejorar la eficiencia operativa, a facilitar la coordinación entre los diferentes equipos y a optimizar la toma de decisiones en obra. Asimismo, a continuación, se presentan las condiciones necesarias para una integración exitosa de la RA dentro de los flujos de trabajo existentes y su impacto en la reducción de costos y tiempos de ejecución. De esta manera, se evidencia su papel como herramienta de apoyo estratégico en la gestión integral de proyectos.

Mejora de la Eficiencia Operativa: El uso de RA en la planificación ha demostrado mejoras de hasta el 25% en la eficiencia de proyectos. Al permitir la visualización del progreso en tiempo real durante reuniones de obra, los equipos pueden ajustar sus estrategias de trabajo de manera más precisa (Ponce et al., 2024). La metodología BIM, al agregar dimensiones como el tiempo (4D) y el coste (5D), permite simular fases de construcción y controlar la dinámica del proyecto (Martínez & Domínguez, 2018). La RA potencia esta capacidad al llevar estas simulaciones directamente al sitio de construcción (La Rivera et al., 2025).

Condiciones para la Integración Exitosa: Para una integración efectiva, es necesario planificar el uso de la RA dentro de los flujos de trabajo existentes, definiendo quiénes la usarán, en qué momentos y con qué propósitos (La Rivera et al., 2025). Se requiere una cultura organizacional abierta a la innovación, así como personal capacitado para operar la tecnología y comprender sus limitaciones (La Rivera et al., 2025). La preparación del entorno físico (áreas despejadas, buena iluminación) es también un requisito crucial, aunque difícil de cumplir en un entorno de obra tradicional (La Rivera et al., 2025).

Reducción de Costos y Tiempos: La detección temprana de errores y la optimización de la planificación gracias a la RA conducen a una reducción significativa de costos y tiempos de entrega (Ponce et al., 2024). En proyectos donde se ha implementado, se ha logrado reducir los costos de construcción hasta en un 20% al corregir problemas antes de que generen gastos adicionales (Ponce et al., 2024).

3.2.2 Fichas técnicas de casos de uso de RA aplicada a la construcción

Con el fin de sistematizar la información obtenida a través de la revisión bibliográfica, se elaboraron fichas técnicas que resumen de manera estructurada los principales casos de aplicación de la realidad aumentada (RA) en entornos BIM dentro del sector construcción. Estas fichas permiten organizar y comparar de forma homogénea los hallazgos de cada estudio, facilitando la identificación de buenas prácticas, tecnologías empleadas, resultados alcanzados y limitaciones reportadas en la literatura.

El formato empleado incluye campos como el título del caso, autores, fuente, contexto de aplicación, tecnologías utilizadas, resultados principales, limitaciones y aportes relevantes para el desarrollo de la herramienta RA–BIM propuesta en esta investigación. A modo de ejemplo, en este apartado se presenta la primera ficha técnica desarrollada, que se observa en la tabla 3, mientras que el resto se incluye de forma completa en el Anexo 1, con el fin de mantener la claridad del documento y permitir su consulta detallada según sea necesario.

De esta forma, las fichas constituyen un insumo clave para orientar el diseño de la solución tecnológica, garantizando que esté fundamentada en experiencias documentadas y adaptada a las necesidades detectadas en los procesos constructivos.

Tabla 3. Ficha Técnica de Caso de Aplicación RA–BIM N°1: RA BIM Integration in Augmented Reality Model

Título del caso / Estudio:		
BIM Integration in Augmented Reality Model		
Autores y año:	Chai, C., Mustafa, K., Kuppusamy, S., Yusof, A., Lim, C. S., & Wai, S. H.	2019
Fuente: International Journal of Technology 10(7): 1266-1275 ISSN 2086-9614		
Objetivo del estudio:	Examinar la viabilidad de la integración de BIM en RA (AR–BIM) en la industria de la construcción. Se adopta un estudio de caso, implementando el sistema AR–BIM mediante Structure Sensor, Unity 3D y C#.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Integración práctica de modelos BIM estructurales en una aplicación AR para tablet/móvil con el objetivo de mejorar la visualización y verificación en obra (caso aplicado a modelos estructurales).	
Tecnologías empleadas:	Structure Sensor	BIM
	C#	Unity
Resultados principales:	Sistema funcional que permite visualizar y superponer modelos estructurales en obra; mejora de la interacción técnica entre equipo de oficina y supervisión de obra; evidencia de beneficio en la comprensión de elementos estructurales.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:		
Deriva por tracking visual, limitaciones al operar en grandes volúmenes espaciales sin referencias; necesidad de preparar modelos (LOD, reducción polígonos) para rendimiento en móviles.		
Aportes relevantes al proyecto RA-BIM:		
Flujo técnico probado: exportar BIM - convertir a FBX/asset - importar a Unity - usar Vuforia/imagen/marker para anclaje en obra. Útil como referencia de pipeline.		

El análisis de los casos de estudio recopilados permitió identificar diversas tendencias en la aplicación de la realidad aumentada (RA) en entornos BIM dentro del sector construcción y la educación en ingeniería. Los estudios más recientes, como el de Soong et al. (2023), destacan el uso combinado de Unity, AR Foundation y ARCore para la implementación de *Digital Twins* durante las fases de diseño, construcción y operación, evidenciando mejoras en la compatibilidad de datos BIM y en la precisión del anclaje espacial. Este enfoque resalta la ventaja de emplear sistemas sin marcadores físicos, lo que se traduce en una visualización más libre y adaptable al entorno real.

Por su parte, investigaciones como la de Chai Chang Saar et al. (2019) y Ashour et al. (2022) abordan la integración de modelos BIM con plataformas de RA orientadas a la educación y la gestión de proyectos, utilizando Unity 3D, ARKit y AR Foundation. Estos trabajos demostraron que la RA puede mejorar la comprensión espacial, la interacción con los modelos tridimensionales y la capacitación técnica, aunque aún presentan desafíos relacionados con la precisión del registro y la estabilidad de los modelos.

En el ámbito de la conservación y documentación del patrimonio construido, Ma (2022) propone una metodología de interacción entre Revit y Unity mediante una interfaz basada en la nube, lo que facilita la transmisión de datos en tiempo real entre ambos entornos. Este tipo de soluciones evidencia el potencial de la RA para la gestión de información compleja y la coordinación interdisciplinaria.

Por otro lado, los estudios previos que utilizaron Vuforia, como los de Gómez-Vargas et al. (2018), de Coss Henning (2017), Quisaguano Collaguazo et al. (2024) y Guzmán-Paredes (2022), muestran aplicaciones enfocadas en la educación, el entrenamiento y la visualización de modelos mediante el uso de *image targets*. Aunque estos proyectos validan el potencial didáctico de la RA y su accesibilidad en dispositivos móviles, también reportan limitaciones importantes, como la dependencia de marcadores físicos, problemas de desfase o *lag*, y restricciones de compatibilidad entre plataformas.

En conjunto, la revisión evidencia una evolución progresiva hacia sistemas de RA más robustos y precisos, con una clara tendencia a migrar de herramientas basadas en marcadores (como Vuforia) hacia marcos integrados como AR Foundation, que ofrecen mayor realismo, estabilidad y escalabilidad para entornos BIM. Los hallazgos de estas fichas sirvieron de referencia directa para definir las decisiones técnicas adoptadas en el desarrollo del prototipo RA–BIM propuesto en esta investigación.

3.2.3 Cuadro comparativo de herramientas tecnológicas RA–BIM

Para sintetizar los hallazgos de la revisión bibliográfica y proporcionar una visión clara sobre el panorama actual de la integración entre la realidad aumentada (RA) y el modelado de información para la construcción (BIM), se elaboró un cuadro comparativo que clasifica las principales experiencias documentadas en la literatura. Este cuadro organiza los estudios seleccionados en función de la herramienta tecnológica utilizada, el área de aplicación en el sector construcción, el grado de integración con modelos BIM, los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas en cada caso.

La comparación permite observar no solo la diversidad de enfoques y recursos empleados, desde dispositivos inmersivos como HoloLens, hasta aplicaciones móviles desarrolladas en motores gráficos como Unity y Vuforia, sino también las oportunidades y desafíos recurrentes reportados por los distintos autores. De esta manera, el cuadro se convierte en un insumo clave para orientar el diseño de la herramienta RA–BIM propuesta en este proyecto, al poner en evidencia cuáles prácticas y configuraciones han demostrado mayor efectividad y cuáles obstáculos deben considerarse para su implementación en contextos constructivos reales.

Tabla 4. Comparación de información obtenida mediante revisión bibliográfica con fuentes en inglés

Autor / Año	Título	Herramienta utilizada	Área de aplicación	Integración con BIM	Resultados reportados	Limitaciones identificadas
Song, J. et al. 2023	Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation	Unity, AR Foundation, ARCore SDK y Visionlib SDK (probados para el seguimiento de objetos). Samsung Galaxy Tab S8 (hardware).	Implementación de Digital Twin en plantas de fabricación de semiconductores (FAB). Verificación de la compatibilidad de datos BIM en tiempo real durante las etapas de diseño, construcción y operación.	Propone un método de verificación de compatibilidad de datos BIM basado en el modelo AR y el objeto real. Se utilizó el formato FBX para convertir los datos BIM a contenidos AR. Utiliza tecnologías de seguimiento (tracking) y anclaje (anchoring) de AR, considerando las características específicas del sitio FAB.	El sistema permite el ajuste preciso del modelo AR y el objeto real. Se logró mantener la compatibilidad a incluso cuando la cámara se movió y el marcador desapareció de la pantalla. El error inicial de carga y ajuste del modelo AR fue muy favorable (dentro de 10 mm).	Problemas de precisión, alcance y consistencia de compatibilidad debido a las características del sitio FAB (entorno regular/repetitivo, reflexión difusa severa). Las pruebas con Wiktitude SDK resultaron en la descarga del modelo AR cuando no se reconocía el marcador y generaron errores de anclaje. Visionlib SDK no fue adecuado para espacios grandes. Existe una necesidad de mejorar la aplicabilidad futura en el mundo real y la experiencia del usuario.
Chai Chang Saar et al. 2019	BIM integration in augmented reality model	Structure Sensor (para escaneo 3D de la realidad), Unity 3D, C#.	Aplicación en la industria de la construcción. Usos potenciales: herramienta de inspección de proyectos, gestión de instalaciones (Facility Management) y capacitación.	El estudio examinó la credibilidad de la integración de BIM en AR (AR-BIM). El modelo BIM se exporta a Unity 3D. Structure Sensor ayuda a coordinar el relación con el edificio real. El costo de inversión inicial para el sistema aunque esto puede ser mejorado. Los sistemas propuestos es "mucho más aún no son lo suficientemente potentes para ser utilizados fácilmente en la industria comercializados.	BIM es compatible para la integración con la plataforma AR. El sistema preliminar AR-BIM no es perfecto en comparación con los productos comercializados. El prototipo inicial se presenta en forma "semi AR", ya que el modelo de la realidad no se presenta en los dispositivos, pero puede ser mejorado.	
Ashour, Z. et al. 2022	BIMxAR: BIM-Empowered Augmented Reality for Learning Architectural Representations	Unity, AR Foundation, ARCore, ARKit, C#. Hardware móvil (iPhone 7 Plus, iPhone 12 Pro, iPad 8th Gen). Herramientas de sección y registro).	Educación arquitectónica, enfocándose en la mejora de la comprensión de las vistas en sección y el entrenamiento de habilidades espaciales.	Propone un prototipo que integra AR, BIM y edificios físicos. Los metadatos BIM se extraen de Revit usando Dynamo y se exportan a CSV/JSON para ser almacenados en una base de datos en tiempo real (Firebase) y consultados en AR. Se utiliza un flujo de trabajo que convierte la geometría BIM a formato FBX. (52.26%), que mide la comprensión de representaciones arquitectónicas.	El método de registro DL-3S-BIM demostró ser la mejor solución en términos de precisión y robustez. Los métodos de registro anteriores (GPS/IMU y Vuforia Area Target con escaneo) presentaban problemas de desalineación (deriva de +/- 0.9m de alineación de a +/- 2.0m). Los resultados de las puntuaciones brutas de las pruebas SBST y ART no fueron significativos, posiblemente debido al pequeño tamaño de la muestra y al corto período de capacitación.	
Ma, Y.-P 2022	Improved Interaction of BIM Models for Historic Buildings with a Game Engine Platform	Unity (motor de juego/plataforma de integración). Revit (software BIM). Visual Studio (para desarrollo del plug-in API). Dynamo (usado para restauración de edificios históricos, experimentos preliminares de recolección de información). WebAPI (marco de servicio en la nube). iData+ (interfaz de aplicación plug-in de Revit desarrollada).	Conservación, gestión y restauración de edificios históricos, estructuras de madera complejas (ejemplo: Huji Palace en Tainan).	El modelo BIM se importa al motor de juego para mejorar la interactividad. Se desarrolla una interfaz de aplicación plug-in (iData+) en Revit que, junto con un marco de servicio en la nube (WebAPI), permite la transmisión bidireccional y en tiempo real de información (geométrica y no geométrica/semántica) entre Revit y Unity. Se convierte el modelo a formato .FBX y la información no geométrica a .CSV.	El sistema mejoró la visibilidad y la aplicación visual de la información de restauración. La función de Revit 2017. Hay un límite de 1 GB para el tamaño del archivo del modelo importado a Unity. El sistema requiere una computadora o un proceso de integración sea más portátil en el sitio para su operación, lo cual es lógico y fácil de operar. El sistema de Unity no permite hacer clic directamente en el modelo físico para obtener información, obligando al usuario a usar una lista (no intuitivo).	La plataforma solo es compatible con la versión de Revit 2017. Hay un límite de 1 GB para el tamaño del archivo del modelo importado a Unity. El sistema requiere una computadora o un proceso de integración sea más portátil en el sitio para su operación, lo cual es lógico y fácil de operar. El sistema de Unity no permite hacer clic directamente en el modelo físico para obtener información, obligando al usuario a usar una lista (no intuitivo).

Tabla 5. Comparación de información obtenida mediante revisión bibliográfica con fuentes en español

Autor / Año	Título	Herramienta utilizada	Área de aplicación	Integración con BIM	Resultados reportados	Limitaciones identificadas
Gómez-Vargas, I. et al. 2018	Realidad Aumentada como herramienta didáctica en geometría 3D	Unity-3D y Vuforia (ambas herramientas libres). Se utilizaron <i>scripts</i> en C#. La aplicación se diseñó para generación de sólidos de dispositivos móviles con revolución. Dirigida a cursos de sistema operativo Android.	Educación, enfocada en 3D, integración con BIM en este trabajo, ya que se centra en una aplicación didáctica de geometría.	No se aborda la integración con BIM en este trabajo, ya que se centra en una aplicación didáctica de geometría.	Se desarrolló un prototipo de aplicación móvil. El sistema despliega animaciones de RA para generar sólidos de revolución y es interactivo, actualizando la animación mediante <i>taps</i> (presión del dedo) en la pantalla. Se concluye que las herramientas utilizadas son gratuitas, evitando la necesidad de equipos costosos para el desarrollo.	El sistema requiere el uso de marcadores bidimensionales. Existe la necesidad de que la plataforma sea utilizada en grupos de estudiantes para evaluar su evaluación (validación del impacto educativo). Si se utilizan animaciones o modelos 3D de terceros, la manipulación de los objetos podría no ser la adecuada.
de Coss Henning, O. 2017	Realidad aumentada aplicada a la construcción	Revit (herramienta BIM), Unity (motor de realidad virtual), Vuforia (SDK de RA). Equipos: Portátil, Cardboard, HTC Vive, Tablet, Microsoft HoloLens. Lenguaje C#. El formato de intercambio usado es .FBX.	Sector de la construcción (AEC), con foco en repaso de obras, reformas y supervisión en obra. Se usó el edificio BO como caso de estudio.	El proyecto se basa en BIM (Revit) con la tecnología BIM. Los modelos BIM se exportan a .FBX para su uso en Unity y Vuforia.	La aplicación ARBUILD se creó para el seguimiento extendido la mejor opción, ofreciendo mayor estabilidad y buena precisión para fines de reformas o repasos restringido, y la exactitud del marcador de medición fue alta, con un desfase de aproximadamente 2 centímetros. La RA permite conciliar el mundo físico y digital.	Problemas de LAG (retraso) causados por la gran cantidad de datos y el uso de dispositivos con bajas especificaciones (procesador, RAM, tarjeta gráfica). Para las Microsoft HoloLens, el rango visual es limitado, y la documentación existente proviene de fuentes personales (blogs). La combinación de Vuforia con HoloLens presentó problemas de profundidad (el modelo se aleja al acercarse).
Quisaguano Collaguazo, L. R. et al. 2024	Realidad aumentada con Unity y Vuforia para mejorar la experiencia educativa	Unity (motor de juego) y Vuforia (SDK). Se utilizó la metodología Kanban para prototipo se enfocó en temas de ingeniería automatizada desarrollo se realizó para dispositivos Android.	Educación, dirigido a estudiantes de 6to año de educación básica. El propósito de ingeniería automatizada (identificación de partes de un motor, como el árbol de levas, block y bujía).	No se menciona la integración con BIM, ya que el enfoque es en la mejora de la experiencia educativa mediante tecnología móvil.	La RA mejora significativamente el interés, preferencia, motivación y entendimiento de los estudiantes. El prototipo utiliza modelos 3D interactivos. La aplicación móvil funciona en equipos Android. La metodología Kanban facilitó la fluidez y la visión del avance en el desarrollo del prototipo.	La aplicación funciona exclusivamente en equipos Android a pesar de la existencia de usuarios de iOS. Es necesario manejar la tecnología con cautela para evitar que cause distracción en lugar de aportar positivamente en el aprendizaje. La tecnología de RA se aplica mayormente para fines de entretenimiento que para fines productivos.
Guzman-Paredes, Y. 2022	Realidad aumentada utilizando Unity	Unity (motor de juegos multiplataforma) y Vuforia. La aplicación está enfocada en el entretenimiento, AR/MR). Se utilizan marcadores tipo imagen baraja española. El propósito es desarrollar competencias complementario: Impresora 3D Da Vinci 1.0 AiO para crear un modelo escalado.	Educación, enfocada en el entretenimiento, utilizando el juego de la baraja española. El propósito es desarrollar competencias en el uso y aplicación de RA en diversos escenarios.	No se menciona la integración con BIM en esta guía práctica.	La guía práctica describe el procedimiento paso a paso para crear un proyecto básico de RA en Unity utilizando marcadores de Vuforia. Se busca que el estudiante adquiera la capacidad de desarrollar proyectos básicos con RA. Se utiliza la impresión 3D para generar un modelo a escala que pueda funcionar como prototipo y marcador.	Se debe validar las versiones actualizadas de software (Unity/Vuforia) y contar con las herramientas tecnológicas mínimas requeridas.

3.2.4 Lista priorizada de buenas prácticas y requisitos técnicos

A partir del análisis de la revisión bibliográfica, las encuestas aplicadas y los hallazgos derivados del desarrollo metodológico, se identificaron una serie de buenas prácticas y requisitos técnicos que resultan fundamentales para la integración efectiva de una herramienta de realidad aumentada (RA) vinculada con modelos BIM en proyectos constructivos. Estas prácticas permiten orientar el diseño y la implementación de la herramienta, asegurando no solo su viabilidad técnica, sino también su pertinencia operativa en los procesos de planificación, supervisión y control en obra.

El listado que se presenta a continuación se organiza de manera priorizada, atendiendo a los factores críticos que determinan el éxito de este tipo de soluciones: la calidad y preparación del modelo BIM, la infraestructura tecnológica disponible en campo, el desarrollo y características de la herramienta RA, los procesos de capacitación de usuarios, las aplicaciones prácticas en obra, la seguridad y el rendimiento del sistema, así como las estrategias de implementación progresiva. Este conjunto de lineamientos constituye un insumo clave para orientar la construcción del prototipo y garantizar que su aplicación responda de manera efectiva a las necesidades detectadas en el sector construcción.

1. Calidad y preparación del modelo BIM

- Modelos BIM de alta precisión geométrica y dimensional, ya que errores mínimos generan inconsistencias en la proyección en RA.
- Estandarización de niveles de desarrollo (LOD) según la etapa del proyecto (ej. LOD 200 en planificación, LOD 400 en ejecución).
- Optimización de los modelos para dispositivos móviles, reduciendo el peso y la complejidad de geometrías, texturas y capas.
- Uso de formatos interoperables (IFC, FBX, OBJ) que faciliten la exportación desde plataformas como Archicad, Revit o Tekla hacia motores gráficos como Unity.

2. Infraestructura tecnológica en obra

- Disponibilidad de dispositivos adecuados (tabletas, smartphones de gama media/alta o visores como HoloLens) con suficiente capacidad gráfica y de procesamiento.
- Conectividad estable en obra, garantizando señal Wi-Fi o datos móviles para sincronizar modelos y actualizaciones en tiempo real.
- Sistemas de sincronización en la nube para compartir versiones actualizadas de modelos y evitar inconsistencias entre equipos.

3. Desarrollo de la herramienta RA

- Integración con motores gráficos robustos (Unity) y frameworks de RA confiables (Vuforia, ARCore, ARKit).
- Implementación de sistemas de registro espacial precisos (basados en marcadores, geolocalización o superficies planas) para asegurar estabilidad en la proyección.
- Interfaces intuitivas y simplificadas, diseñadas para usuarios no expertos, priorizando comandos básicos y navegación clara.
- Inclusión de funciones de interacción con el modelo: ocultar capas, hacer zoom, rotar o resaltar elementos clave.

4. Capacitación y adopción por parte de usuarios

- Desarrollo de programas de capacitación gradual, con sesiones iniciales básicas y refuerzos periódicos.
- Elaboración de un manual de usuario y guías visuales, que expliquen paso a paso la operación en obra.
- Estrategias para minimizar la resistencia al cambio, fomentando la participación temprana de inspectores, operarios y jefaturas en pruebas piloto.
- Vinculación de la herramienta con procesos reales de supervisión y control, de modo que los usuarios perciban valor inmediato en su aplicación.

5. Aplicaciones prácticas en obra

- Uso de RA para la visualización espacial en campo, facilitando la interpretación de planos y modelos tridimensionales.
- Aplicación en control de calidad, comparando el modelo BIM con lo ejecutado para detectar errores tempranos.
- Apoyo en capacitaciones en sitio, transmitiendo procedimientos constructivos y de seguridad en entornos inmersivos.
- Presentación de avances de obra a clientes o inversionistas, mejorando la comunicación y confianza en el proyecto.

6. Seguridad y rendimiento

- Considerar efectos fisiológicos en el usuario (mareo, fatiga visual) y establecer tiempos máximos de uso.
- Establecer protocolos para el uso seguro en obra, evitando distracciones en zonas de riesgo.
- Asegurar un desempeño fluido en dispositivos de capacidad media, garantizando tiempos de respuesta cortos y estabilidad en la visualización.

7. Estrategias de implementación progresiva

- Pilotos iniciales en proyectos controlados, antes de su aplicación masiva en obras complejas.
- Evaluación sistemática con indicadores clave: precisión de proyección, reducción de errores, tiempos de ejecución, satisfacción de usuarios.
- Documentación de resultados y retroalimentación continua, para ajustar el flujo de trabajo y mejorar la herramienta antes de una implementación a gran escala.

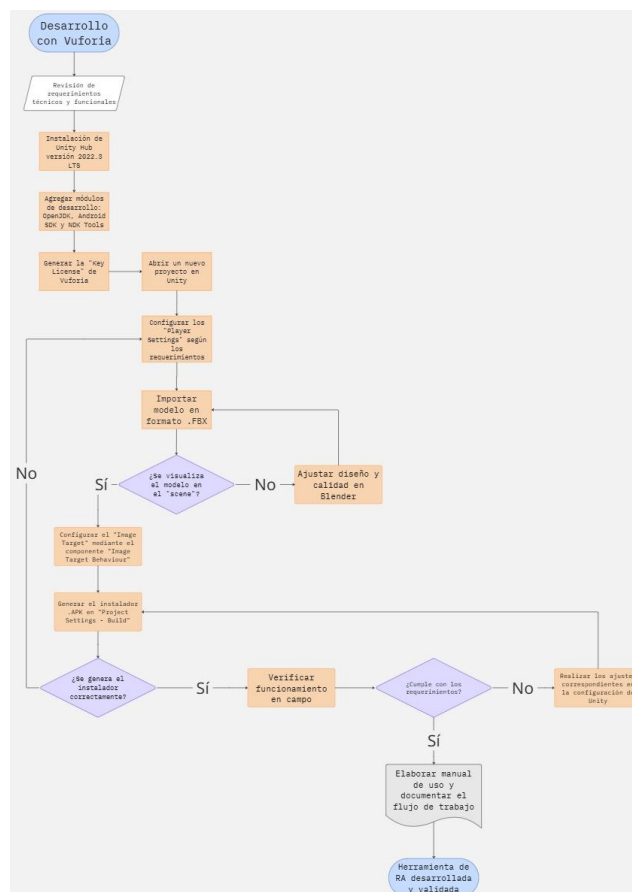
Por tanto, los resultados presentados en este capítulo han permitido identificar las principales limitaciones y necesidades del sector, así como los factores clave que orientan el diseño de una herramienta de realidad aumentada vinculada con modelos BIM. La sistematización de hallazgos en torno a las barreras actuales, las áreas estratégicas de aplicación, los elementos BIM prioritarios y los beneficios esperados, junto con la definición de una lista priorizada de buenas prácticas y requisitos técnicos, constituye una base sólida para avanzar hacia el desarrollo del prototipo. De esta manera, se asegura que la propuesta de integración RA–BIM responda de manera efectiva a los retos presentes en obra, sentando las bases para su validación práctica y su futura implementación en proyectos constructivos.

3.3 Desarrollo de un prototipo funcional de herramienta RA–BIM

El desarrollo del prototipo de la herramienta RA–BIM representó la fase práctica y aplicada de esta investigación, en la cual se materializaron los insumos teóricos, metodológicos y tecnológicos recopilados en los objetivos previos. El propósito central fue construir una aplicación móvil funcional de realidad aumentada (RA) que permitiera proyectar modelos BIM en entornos reales, brindando soporte en la visualización, el control y la supervisión de obra bajo condiciones operativas.

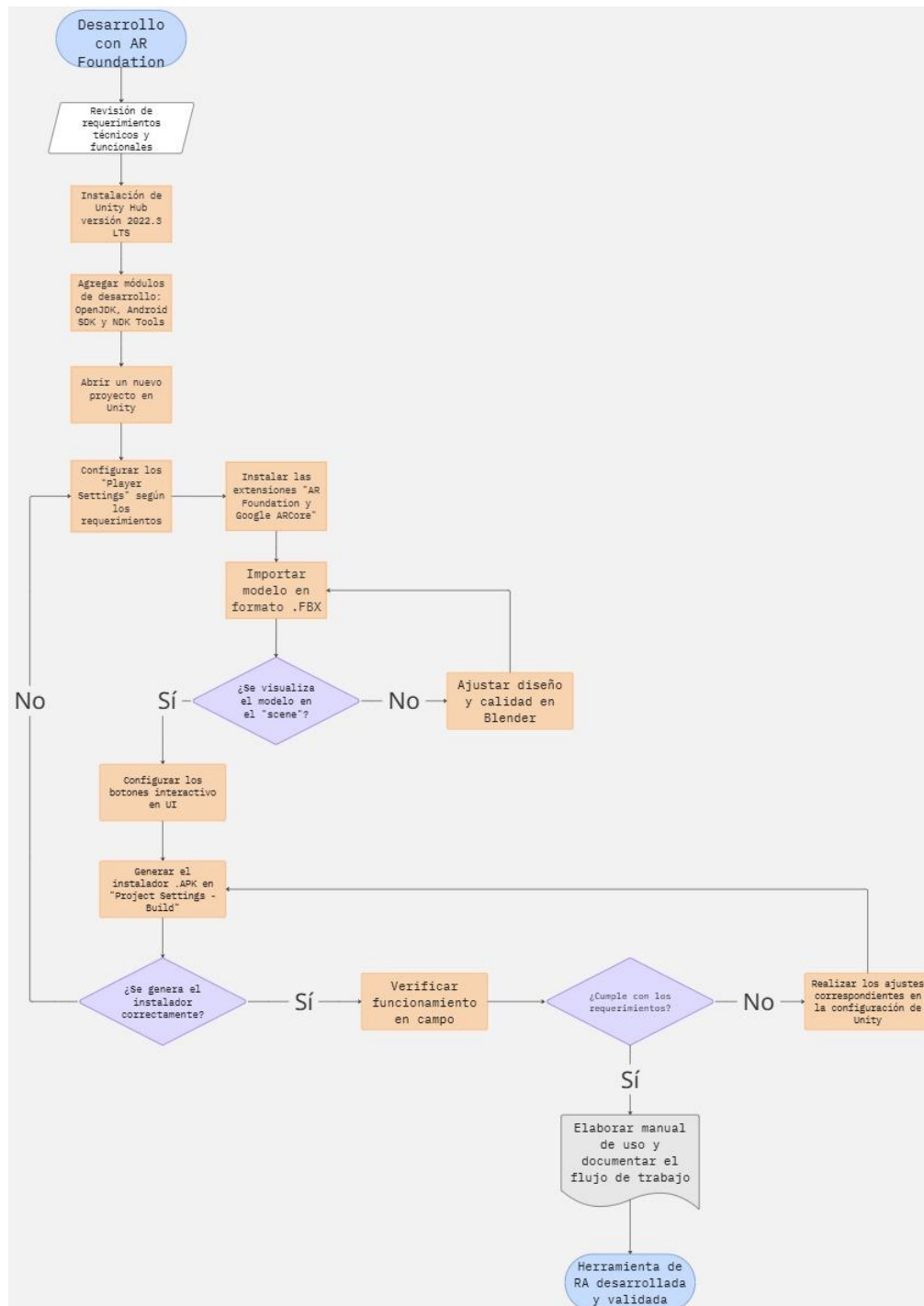
Durante el proceso de desarrollo se exploraron distintas alternativas tecnológicas con el fin de seleccionar la configuración más estable, compatible y flexible para la proyección de modelos BIM. Inicialmente siguiendo el flujograma que se ubica en la figura 18, se utilizó el motor Unity junto con el kit de desarrollo Vuforia, el cual permite generar experiencias RA mediante el uso de image targets. Sin embargo, esta solución presentó limitaciones significativas, entre ellas la dependencia de marcadores físicos, que restringía la maniobrabilidad del modelo sobre el entorno real, así como dificultades en la generación del archivo ejecutable (APK), lo cual impedía su implementación práctica en dispositivos móviles.

Figura 18. Flujograma para la validación de herramienta RA-BIM en Unity + Vuforia



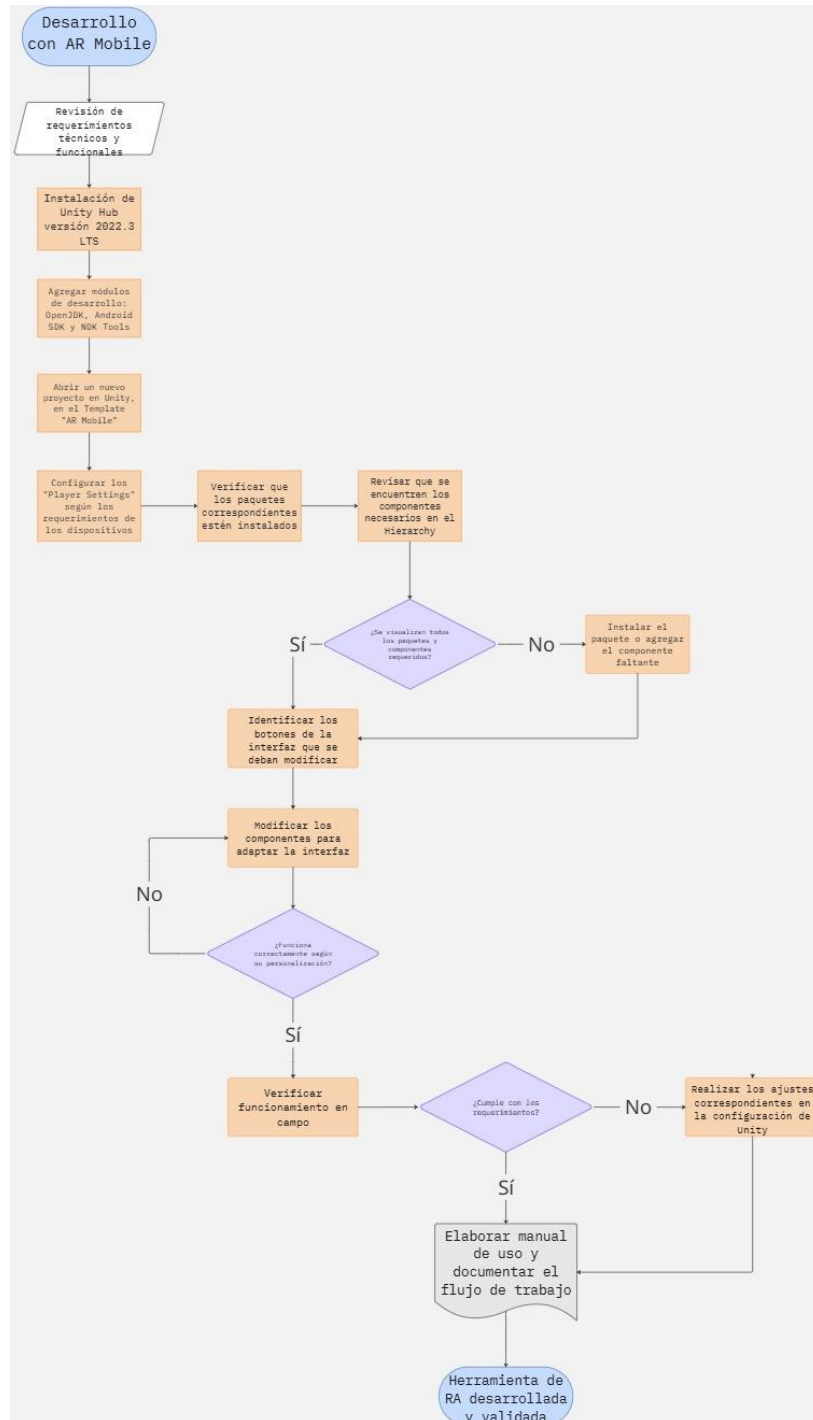
Posteriormente, se evaluó el uso del marco AR Foundation siguiendo el flujograma que se encuentra en la figura 19, que integra de forma nativa los sistemas ARCore (Android) y ARKit (iOS). Aunque esta alternativa ofrecía ventajas en la detección automática de superficies y eliminación de marcadores, se identificaron problemas de proyección y anclaje del modelo BIM, que afectaban la estabilidad visual y la precisión del posicionamiento espacial.

Figura 19. Flujograma para la validación de herramienta RA-BIM en Unity + AR Foundation



Finalmente, mediante el seguimiento del flujograma representado en la figura 20, se optó por desarrollar el prototipo con base en el template “AR Mobile” de Unity, el cual proporcionó una estructura funcional inicial para la gestión de sesiones RA y la detección de planos. A partir de este modelo base, se realizaron modificaciones personalizadas en la interfaz y en la lógica de interacción mediante scripts en C#, adaptando la aplicación a los requerimientos específicos del proyecto.

Figura 20. Flujograma para la validación de herramienta RA-BIM en Unity + AR Mobile



Entre estas adaptaciones se incluyeron la configuración del menú principal, la selección y posicionamiento de modelos BIM, la gestión de la cámara RA y la optimización de la experiencia de usuario en campo.

El resultado de esta fase se consolidó en cuatro productos principales:

- Un prototipo funcional operativo en dispositivos Android, capaz de proyectar modelos BIM con detección de superficies planas.
- El código fuente documentado y organizado en un repositorio estructurado por módulos.
- La identificación de las principales resultados y dificultades en el proceso de desarrollo.
- Un manual técnico de usuario, que detalla el proceso de instalación, uso y configuración de la aplicación.

Estos productos conforman una base sólida para la validación y mejora futura del sistema RA–BIM, permitiendo su aplicación en entornos constructivos reales y su eventual integración en los procesos de control y seguimiento de obra.

3.3.1 Prototipo funcional de la herramienta de RA

El prototipo desarrollado corresponde a una aplicación móvil de realidad aumentada (RA) orientada a la visualización e interacción con modelos BIM en entornos reales, con el propósito de fortalecer los procesos de supervisión, revisión y comunicación técnica durante la fase de ejecución de obra. La herramienta se concretó como un medio de integración entre el entorno digital del modelado y el espacio físico de construcción, permitiendo que los usuarios puedan inspeccionar, comprender y validar la información contenida en los modelos de forma directa sobre el sitio de trabajo.

Mediante el uso de la cámara del dispositivo móvil y las capacidades de detección espacial proporcionadas por AR Foundation, la aplicación es capaz de reconocer superficies físicas y generar anclajes virtuales estables, sobre los cuales se proyectan los modelos tridimensionales previamente exportados desde software BIM. Esta integración posibilita una visualización precisa y coherente en escala, orientación y posición, permitiendo comparar el modelo digital con las condiciones reales del terreno o de la estructura en desarrollo.

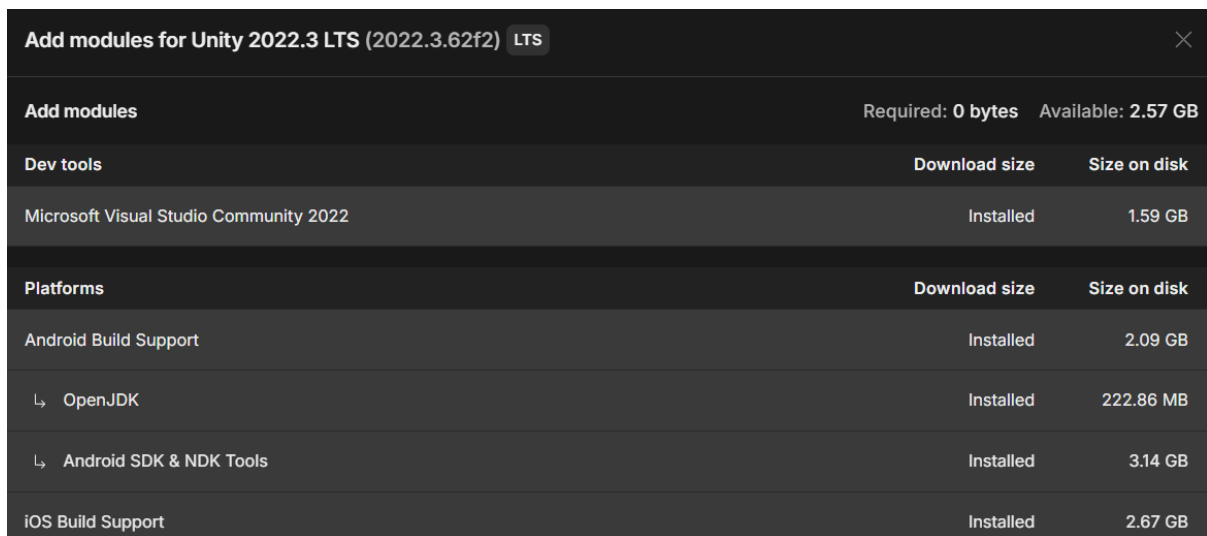
La interfaz de usuario fue diseñada bajo criterios de usabilidad y accesibilidad, de manera que pueda ser utilizada por personal técnico sin experiencia previa en programación o en el manejo de entornos de RA. A través de un panel intuitivo de botones interactivos los cuales se observan en la figura 21, el usuario puede seleccionar el modelo deseado, colocarlo sobre la superficie detectada según las necesidades del proceso

constructivo. Este enfoque interactivo permite realizar simulaciones rápidas en campo, apoyar la verificación visual de elementos estructurales y facilitar la comunicación entre equipos de diseño, supervisión y ejecución.

El primer enfoque para el desarrollo del prototipo de la herramienta RA-BIM se basó en la utilización del motor de desarrollo Unity junto con el Software Development Kit (SDK) de Vuforia Engine, uno de los entornos más consolidados para la implementación de experiencias de realidad aumentada basadas en reconocimiento de imágenes, complementado con el programa Visual Studio para la generación de los códigos de programación. El propósito inicial consistió en vincular los modelos BIM generados en REVIT con un entorno interactivo capaz de proyectarlos en el espacio físico mediante un dispositivo móvil.

El proceso se inició con la instalación del entorno Unity Hub, desde el cual se descargó la versión Unity 2022.3 LTS como se detalla en la figura 21, compatible con la plataforma de realidad aumentada requerida y con una estabilidad operativa mayor a las versiones más recientes del software. Posteriormente, se incorporaron los módulos necesarios para el desarrollo en Android y la compatibilidad con RA, lo que permitió habilitar las dependencias necesarias para la integración con Vuforia.

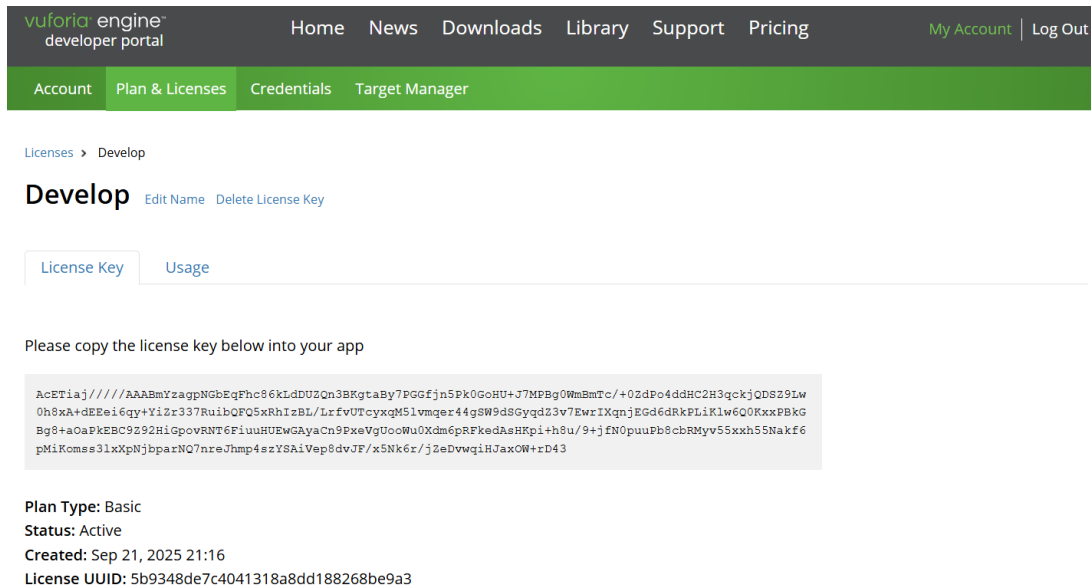
Figura 21. Herramientas y módulos requeridos para el uso de Unity



Add modules for Unity 2022.3 LTS (2022.3.62f2) LTS			
Add modules		Required: 0 bytes	Available: 2.57 GB
Dev tools		Download size	Size on disk
Microsoft Visual Studio Community 2022		Installed	1.59 GB
Platforms		Download size	Size on disk
Android Build Support		Installed	2.09 GB
↳ OpenJDK		Installed	222.86 MB
↳ Android SDK & NDK Tools		Installed	3.14 GB
iOS Build Support		Installed	2.67 GB

Una vez configurado Unity, se procedió a activar el motor de *Vuforia Engine* a través del menú *Edit* → *Project Settings* → *XR Plug-in Management* → *Vuforia AR Support*, lo que habilitó las funciones de reconocimiento de marcadores e interacción con modelos tridimensionales. Para poder ejecutar la herramienta en un dispositivo móvil, fue necesario registrar el proyecto en la plataforma *Vuforia Developer Portal*, donde se generó una licencia o “license key” exclusiva, representado en la figura 22. Esta clave fue posteriormente incorporada en el panel *Vuforia Configuration* dentro de Unity, garantizando la autenticación del proyecto con el SDK.

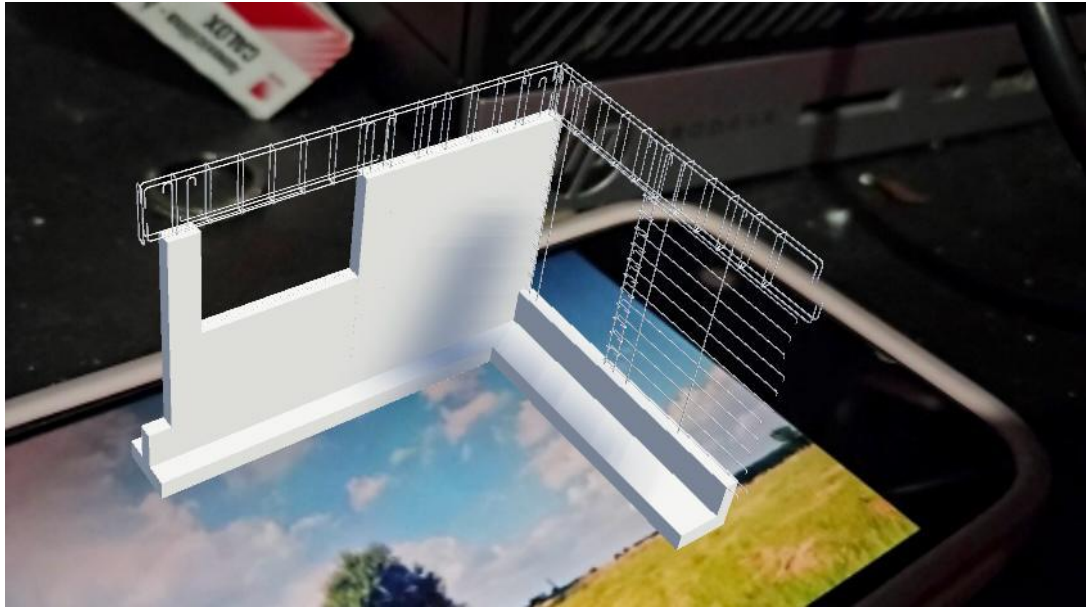
Figura 22. Herramientas y módulos requeridos para el uso de Unity



El siguiente paso consistió en la definición del marcador o “*image target*”, que corresponde a la imagen física que el sistema reconoce para proyectar el modelo en el entorno real. En el portal de Vuforia se cargó la imagen seleccionada, por ejemplo, un plano impreso la cual fue procesada por el sistema para generar una base de datos de reconocimiento. Esta base fue exportada y vinculada en Unity mediante el componente *Image Target Behaviour*, configurando los parámetros de escala, distancia de detección y estabilidad del modelo sobre la superficie reconocida.

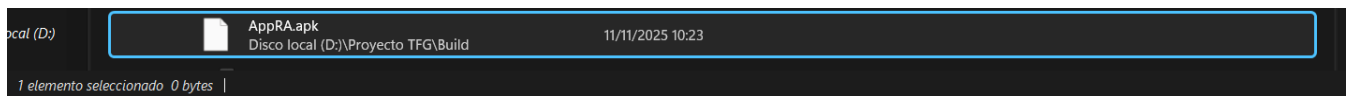
Con la base de datos de Vuforia activa, se importó el modelo BIM optimizado en formato .FBX desde REVIT. Este modelo fue asignado como objeto hijo del *Image Target*, de modo que, al ser reconocida la imagen física, el sistema desplegara el modelo tridimensional sobre el marcador con las dimensiones y orientación definidas como se referencia en la figura 23.

Figura 23. Modelo 3D proyectado sobre el marcador asignado



Durante la etapa de prueba se verificó el correcto anclaje y estabilidad del modelo sobre el marcador, así como la calidad del renderizado y la capacidad de reconocimiento bajo distintas condiciones de iluminación. No obstante, se identificaron limitaciones significativas en el uso de Vuforia, especialmente asociadas a la necesidad constante del marcador físico para mantener el modelo anclado, lo cual restringía la libertad de movimiento y la visualización del entorno real. Adicionalmente, se presentó un inconveniente técnico con la generación del archivo ejecutable (.APK) como se demuestra en la figura 24, pues el archivo se generaba vacío, lo que impidió su instalación directa en dispositivos Android, restringiendo el alcance de las pruebas en campo.

Figura 24. Archivo .APK vacío, 0 bytes



A pesar de estas limitaciones, la experiencia obtenida con Vuforia permitió comprender el flujo de trabajo de integración entre modelos BIM y entornos AR, sentando las bases conceptuales para el desarrollo posterior del prototipo mediante AR Foundation.

Al optar por el desarrollo de una segunda versión del prototipo utilizando el framework AR Foundation 5.2.0, desarrollado por Unity Technologies, se identifica que este actúa como una capa de abstracción que permite crear experiencias de realidad aumentada multiplataforma, es decir, Android e iOS, mediante un mismo conjunto de componentes. Este entorno permitió un control más amplio sobre la interacción entre el modelo tridimensional y el espacio físico, eliminando la dependencia de marcadores o imágenes impresas.

El framework AR Foundation fue complementado con el Google ARCore XR Plugin, responsable de gestionar la detección de planos, el seguimiento del entorno físico y la estimación de la posición y orientación del dispositivo en tiempo real. La integración de estas herramientas permitió una proyección precisa, estable y coherente de los modelos BIM sobre el entorno real, garantizando una experiencia fluida y confiable en las pruebas realizadas en condiciones de obra.

Durante la configuración del entorno de desarrollo, se habilitaron los módulos de compilación necesarios para Android, incluyendo OpenJDK, Android SDK y NDK Tools, siguiendo las recomendaciones técnicas de Unity Technologies (2024). Estos componentes fueron esenciales para generar los archivos ejecutables (.apk) y establecer la comunicación con los dispositivos físicos mediante depuración USB. Asimismo, se configuraron las dependencias de ARCore, necesarias para el soporte nativo de RA en sistemas Android, asegurando la correcta lectura de la cámara y la sincronización con los sensores de movimiento del dispositivo.

Los principales parámetros técnicos de compilación se definieron de la siguiente forma:

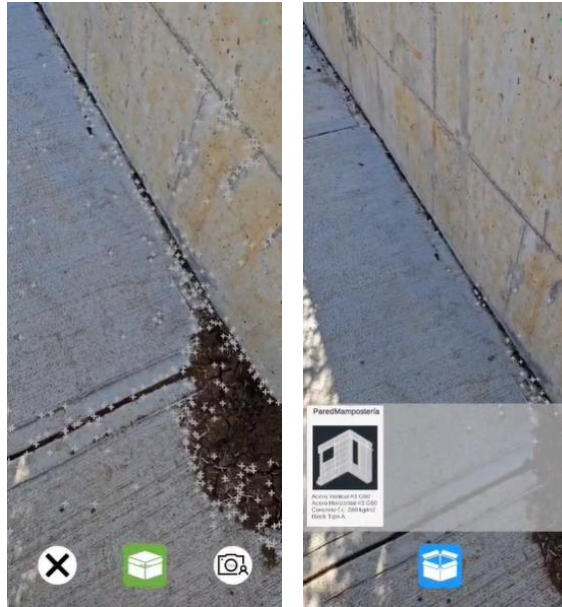
- Minimum API Level: Android 7.0 'Nougat' (API Level 24)
- Scripting Backend: IL2CPP
- API Compatibility Level: .NET 4.X
- Target Architectures: ARM64
- Auto Graphics API: Deshabilitado
- Graphics API: OpenGL ES3 (Vulkan eliminado)
- Active Input Handling: Old

Estas configuraciones son seleccionadas con el propósito de optimizar el rendimiento del prototipo en dispositivos móviles de gama media, priorizando la estabilidad del renderizado, la detección de planos y el comportamiento del modelo tridimensional en tiempo real. La desactivación de Vulkan y el uso de OpenGL ES3 respondieron a la necesidad de maximizar la compatibilidad con distintas versiones de Android y evitar fallos recurrentes en la inicialización de la cámara AR. Por su parte, el backend IL2CPP permitió convertir el código C# en código nativo, los cuales se muestran en el apéndice 3, mejorando la velocidad de ejecución y reduciendo el consumo de recursos del dispositivo durante las pruebas.

A nivel de interfaz, esta etapa resultó particularmente enriquecedora, ya que permitió definir la estructura base de la experiencia de usuario (UI). Se diseñaron botones interactivos, paneles de desplazamiento y comandos de acción que facilitaron la selección de los modelos BIM en el entorno físico, como se visualiza

en la figura 25. Además, se implementaron nubes de puntos (cruces blancas) y sistemas de detección de superficie, que posibilitaron el anclaje de los modelos 3D directamente sobre el terreno o sobre superficies reales, eliminando la dependencia de marcadores predefinidos.

Figura 25. *Interfaz e identificación de puntos desarrollado con AR Foundation*



Para el desarrollo de esta interfaz fue de gran utilidad la consulta a la base de datos de Unity Adventure, un repositorio que reúne ejemplos y recursos de implementación de RA en Unity. Gracias a este material se comprendió de forma más práctica el funcionamiento de los componentes AR Session Origin, AR Camera y AR Plane Manager, los cuales fueron fundamentales para controlar la posición del modelo, la detección del entorno y la proyección espacial en tiempo real.

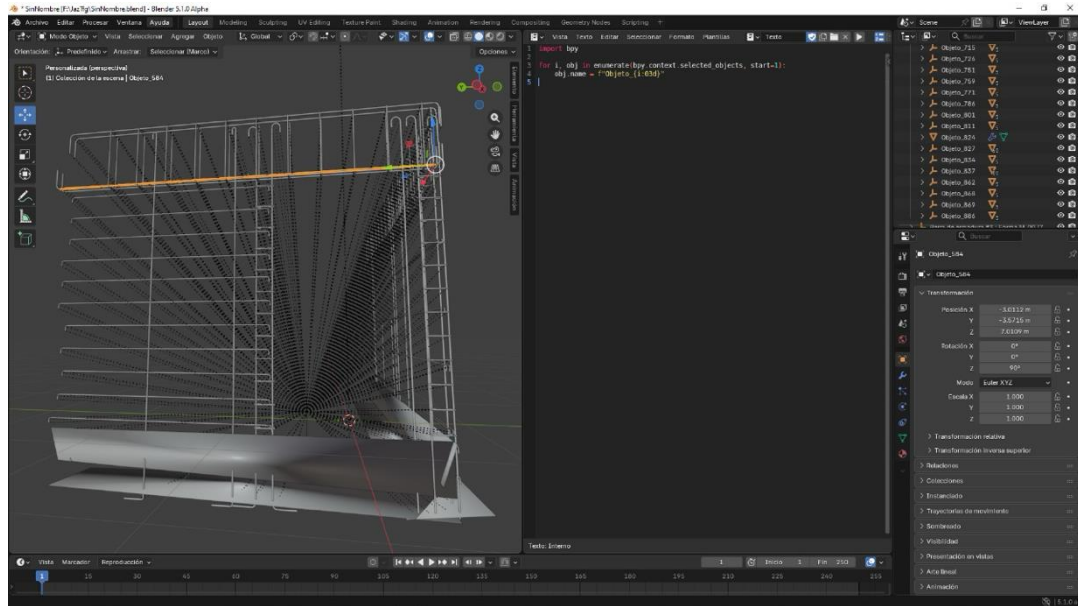
En esta fase se lograron resultados satisfactorios, obteniendo un entorno funcional que permitía proyectar los modelos BIM con estabilidad y precisión espacial, además de contar con una interfaz adaptable al usuario. No obstante, se detectaron dificultades técnicas relacionadas con la compatibilidad entre versiones de AR Foundation y ARCore, que ocasionaban errores en la visualización del modelo durante la compilación del proyecto.

Estas observaciones y oportunidades de mejora motivaron la exploración de una tercera alternativa basada en “AR Mobile” de Unity, la cual retomó los avances logrados con AR Foundation y los integró dentro de un entorno más estable, simplificado y orientado a la generación del producto final.

El desarrollo del prototipo funcional final se llevó a cabo utilizando el template “AR Mobile” de Unity, el cual sirvió como base estructural para la creación de la aplicación de realidad aumentada. Antes de iniciar la integración en Unity, se realizó un tratamiento previo de los modelos BIM en Blender como se muestra en la

figura 26, con el fin de optimizar su geometría, materiales y jerarquía de objetos. Este paso resultó esencial para asegurar la correcta lectura y rendimiento del modelo dentro del entorno de realidad aumentada.

Figura 26. Procesamiento del modelo en el software Blender



En Blender se efectuaron tareas de reducción de polígonos, ajuste de escalas, unificación de mallas y asignación de materiales PBR básicos, además de la exportación en formato FBX, compatible con los motores de RA utilizados por Unity. Gracias a este proceso, se garantizó que el modelo mantuviera su fidelidad visual sin comprometer la eficiencia del renderizado en tiempo real sobre dispositivos móviles.

Posteriormente, el modelo optimizado fue integrado en Unity mediante el template AR Mobile, que proporcionó una arquitectura inicial optimizada para experiencias inmersivas, integrando los paquetes AR Foundation, Google ARCore XR Plugin, Apple ARKit XR Plugin y el XR Interaction Toolkit, permitiendo una compatibilidad multiplataforma en Android e iOS, y una gestión eficiente de la interacción entre el entorno físico y los modelos digitales.

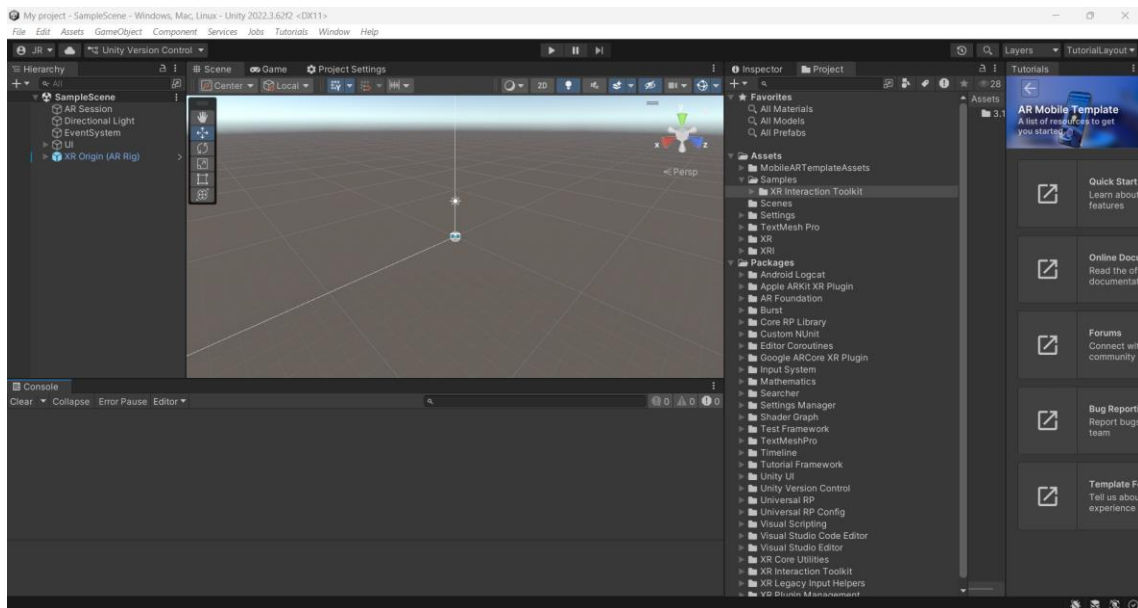
El AR Mobile Template se caracteriza por ofrecer una configuración predeterminada del entorno de RA como se visualiza en la figura 27, incluyendo los elementos esenciales para la ejecución de experiencias interactivas. En su estructura base se incluyen los siguientes componentes principales:

- AR Session y AR Session Origin: Encargados de inicializar y gestionar el ciclo de vida de la sesión de realidad aumentada, así como de controlar la relación espacial entre la cámara del dispositivo y los objetos virtuales.
- XR Origin (AR Rig): Actúa como el nodo central de la escena, enlazando la cámara del usuario con el sistema de seguimiento del entorno físico. Este objeto contiene los scripts y componentes

necesarios para la detección de planos, la estimación de profundidad y la proyección de los modelos 3D sobre superficies reales.

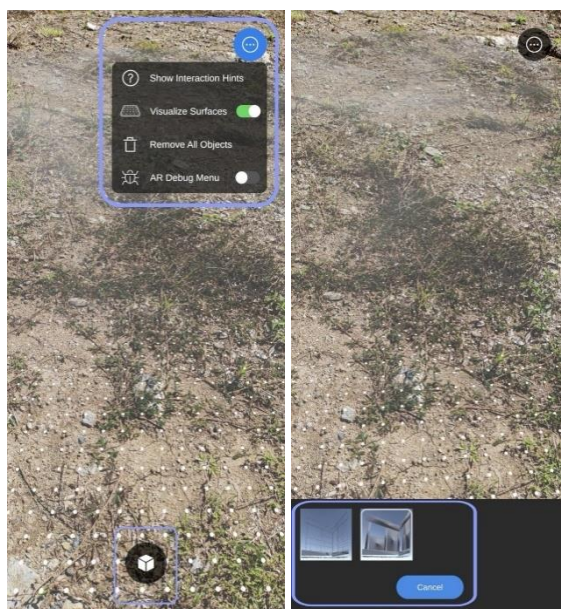
- AR Plane Manager y AR Raycast Manager: Responsables de la identificación de superficies planas mediante el sensor de profundidad del dispositivo y del cálculo de los puntos de impacto (“raycasts”) para determinar las posiciones válidas de anclaje de los objetos digitales.
- UI (User Interface): Conformada por los elementos de interacción implementados en el canvas principal, incluyendo botones, menús y controladores visuales para la selección y visualización de los modelos BIM. Esta interfaz fue ampliamente personalizada para adaptarse a las necesidades del proyecto, tanto en diseño como en funcionalidad.
- Scripts de control (ARFeatheredPlaneMeshVisualizerCompanion, ARTemplateMenuManager, GoalManager): Permiten administrar dinámicamente la visualización de los planos detectados, gestionar los eventos de interacción del usuario y coordinar la ejecución de las distintas escenas dentro de la aplicación, se pueden consultar en el anexo 2.

Figura 27. Configuración base del AR Mobile



Durante el proceso de desarrollo, la plantilla fue adaptada para incorporar las funcionalidades específicas del sistema RA-BIM propuesto. Se modificó la interfaz inicial del template, reemplazando los menús genéricos por un panel interactivo con botones de selección y control, configurados mediante Canvas y EventSystem. De igual forma, se ajustaron los prefabs y materiales incluidos en los MobileARTemplateAssets para asegurar la correcta visualización de los modelos estructurales provenientes de los archivos BIM procesados en Blender como se observa en la figura 28.

Figura 28. Botones interactivos para la selección de modelos



La configuración inicial del proyecto requirió una serie de ajustes sobre el template base de Unity con el objetivo de adaptarlo a las necesidades específicas de la aplicación RA-BIM. Para ello, se incorporaron y habilitaron diversos paquetes esenciales dentro del entorno Unity, entre ellos: los módulos de compilación para Android, el ARCore XR Plugin, el sistema de entrada Input System, TextMeshPro y Shader Graph. Asimismo, se integraron los componentes del Universal Render Pipeline (URP), indispensables para garantizar un manejo eficiente de materiales, sombras y efectos de iluminación en tiempo real.

Estas modificaciones permitieron establecer una estructura sólida para la ejecución del contenido en realidad aumentada, optimizando tanto la detección del entorno como la proyección de los modelos BIM. Adicionalmente, se realizaron ajustes en la jerarquía del proyecto, los managers del subsistema XR y las interfaces UI personalizadas, logrando una adaptación completa del template original hacia un diseño funcional y propio. Gracias a esta configuración, el rendimiento de la aplicación se mantuvo estable incluso en dispositivos móviles de gama media, como se evidencia en las figuras de la 29 a la 34.

Figura 29. Configuración adaptada de los botones

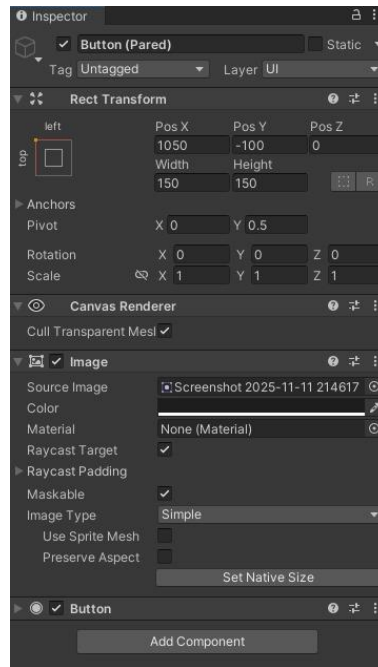


Figura 30. Configuración para presentar los modelos 3D en el Spawner



Figura 31. Configuración para los textos en el Coaching UI

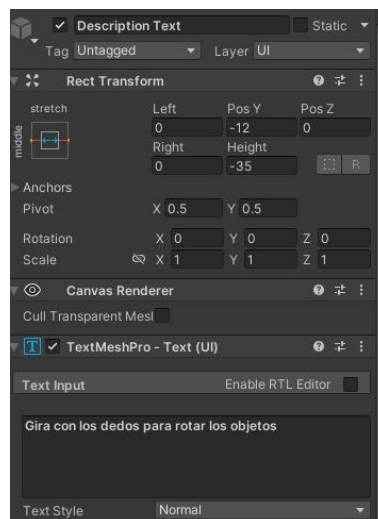


Figura 32. Configuración para el cambio de las imágenes en el Sprite

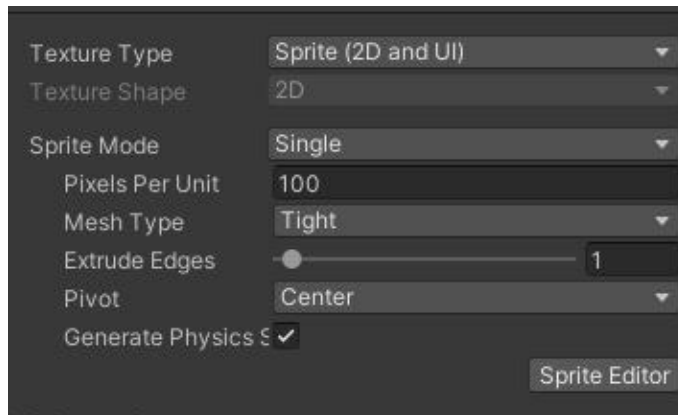
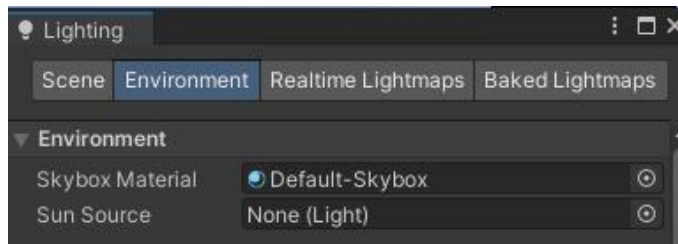


Figura 33. Configuración para personalizar el mensaje inicial en el Prompt



Figura 34. Configuración del fondo en Window



Finalmente, el uso del template AR Mobile no solo permitió acelerar el proceso de desarrollo, sino que también proporcionó una base sólida para la implementación de interacciones avanzadas y la compatibilidad multiplataforma. La personalización de su estructura, combinada con los módulos de AR Foundation y XR Toolkit, dio como resultado un entorno de realidad aumentada estable e interactivo, capaz de proyectar con precisión los modelos BIM directamente sobre el entorno físico, cumpliendo con los requerimientos técnicos y funcionales establecidos para esta investigación.

A lo largo de las distintas etapas de desarrollo, desde los primeros ensayos con Vuforia hasta la consolidación del sistema mediante AR Foundation y el template AR Mobile, el proceso permitió no solo explorar diversas alternativas tecnológicas, sino también comprender las limitaciones y ventajas de cada

enfoque. La evolución progresiva del prototipo reflejó una adaptación constante a las necesidades reales del entorno constructivo, priorizando la estabilidad, la precisión de proyección y la facilidad de uso en campo.

La estructura ligera del sistema y la adopción de tecnologías multiplataforma posibilitan su ejecución en dispositivos móviles de gama media, manteniendo un rendimiento estable, un bajo consumo de recursos y una visualización fluida en tiempo real. En conjunto, el prototipo RA–BIM se consolida como una herramienta práctica, escalable y aplicable al contexto operativo de la empresa Armabloque, materializando el potencial de la realidad aumentada como soporte a los procesos BIM.

Este desarrollo representa un paso significativo hacia la integración efectiva entre el modelo digital y la realidad física, fortaleciendo el control y seguimiento en obra, mejorando la toma de decisiones, reduciendo errores constructivos y potenciando la eficiencia global de los proyectos ejecutados bajo el sistema modulado.

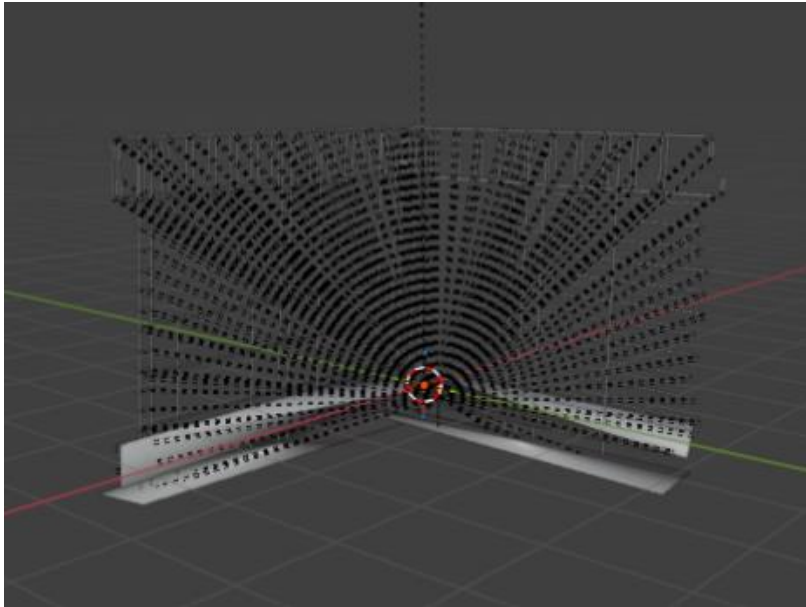
3.3.2. Código fuente y repositorio organizado

El desarrollo del prototipo RA–BIM se estructuró en cuatro etapas consecutivas, abarcando desde la preparación del modelo digital hasta la validación funcional en dispositivos móviles. Cada fase respondió a un objetivo técnico dentro del flujo de trabajo, garantizando la coherencia entre la información proveniente del entorno BIM y su correcta integración en la aplicación de realidad aumentada. Esta organización metodológica permitió mantener un control riguroso del proceso, asegurar la trazabilidad del código y facilitar su futura replicación o ampliación en proyectos similares.

3.3.2.1. Preparación del modelo BIM

La primera fase consistió en la preparación y optimización del modelo tridimensional generado en el entorno BIM. Los modelos fueron elaborados originalmente en Autodesk Revit y exportados en formato FBX, un estándar ampliamente compatible con motores gráficos como Unity. Antes de su incorporación al entorno de desarrollo, los modelos fueron tratados en Blender, donde se ajustaron detalles geométricos, se redujeron polígonos innecesarios, se depuraron texturas y se verificó la correcta orientación de los ejes y el punto de origen como se muestra en la figura 35. Este paso resultó esencial para garantizar que Unity pudiera procesar los modelos de forma eficiente, evitando errores de escala, rotación o sombras que pudieran afectar la proyección en RA.

Figura 35. Configuración del punto de origen del modelo en Blender



De esta forma, se logró una transición fluida entre el modelo BIM y el entorno tridimensional de Unity, asegurando la integridad visual y métrica del modelo para su correcta visualización y manipulación en el entorno de realidad aumentada.

3.3.2.2. Integración del modelo en Unity

En la segunda fase se procedió a la importación del modelo dentro del motor Unity, organizando el repositorio del proyecto en carpetas específicas: Models, Prefabs, Scripts y Scenes. Esta estructura permitió mantener un flujo de trabajo ordenado y escalable.

Cada modelo fue convertido en prefabricado (Prefab), encapsulando su geometría, materiales y componentes asociados. Esta técnica facilitó la reutilización y sustitución de modelos, además de optimizar la carga de recursos durante la ejecución de la aplicación.

Durante esta etapa también se incorporaron los componentes base del template “AR Mobile” de Unity, el cual sirvió como punto de partida para definir la interfaz general, los controladores de cámara y las funciones de detección de superficie. A partir de este modelo base se realizó una adaptación personalizada de la interfaz, integrando botones interactivos, menús y scripts que controlan la selección, proyección y manipulación de modelos BIM en el entorno real.

3.3.2.3. Desarrollo funcional de la aplicación

La tercera fase correspondió al desarrollo funcional del prototipo, centrado en la creación y programación de los scripts en C#, los cuales se encuentran documentados en el Apéndice 4. Estos scripts establecieron la lógica de interacción del usuario con el entorno de realidad aumentada y definieron las reglas de posicionamiento, movimiento y eliminación de los modelos proyectados.

Durante este proceso se consultaron diversas fuentes de apoyo técnico y conceptual, entre ellas bibliografía especializada, documentación oficial de Unity Technologies, el canal educativo Unity Adventure, y la guía “Pasos para la realización de un modelo en realidad aumentada” elaborada por el Ing. Leonardo Torres Hernández. Asimismo, se emplearon herramientas de inteligencia artificial como ChatGPT para la depuración del código, optimización de funciones y resolución de errores específicos durante la fase de pruebas.

Entre los principales componentes del sistema destacan los siguientes:

- **ARInteractionsManager**: encargado de gestionar la detección de superficies mediante AR Foundation y el posicionamiento preciso de los modelos sobre planos reales.
- **DataManager**: responsable de almacenar y administrar la información de los modelos disponibles, incluyendo nombres, descripciones y texturas asociadas a cada elemento del catálogo.
- **UIManager** e **ItemButtonManager**: controlan la interfaz de usuario, los botones interactivos y la vinculación entre el menú de selección y los modelos desplegados en escena.
- **GameManager**: centraliza la lógica principal del sistema, coordinando la relación entre el entorno de RA y las acciones del usuario para garantizar una experiencia fluida y coherente.

En conjunto, estos componentes permitieron desarrollar una interfaz intuitiva, funcional y visualmente limpia, donde el usuario puede seleccionar un modelo BIM, detectar un plano real mediante la cámara, anclar el modelo sobre la superficie y manipularlo libremente mediante gestos de rotación, desplazamiento o eliminación.

La optimización final del código, asistida mediante inteligencia artificial, permitió reducir redundancias, mejorar la eficiencia de procesamiento y asegurar un desempeño estable en diferentes dispositivos durante las pruebas de campo.

3.3.2.4. Validación y pruebas del prototipo

Finalmente, la cuarta fase se enfocó en la validación técnica del prototipo, ejecutada en distintos dispositivos móviles Android con soporte ARCore, como Samsung Galaxy y Xiaomi. Las pruebas contemplaron tres ejes de evaluación:

- Estabilidad del anclaje: se analizó la capacidad del modelo para mantener su posición relativa al plano detectado, incluso ante movimientos del dispositivo.
- Precisión geométrica: se verificó la correspondencia entre las dimensiones del modelo virtual y las medidas reales, asegurando la coherencia espacial del sistema.
- Usabilidad e interfaz: se evaluó la respuesta de los botones, la detección de superficies, la velocidad de renderizado y la claridad visual de los modelos proyectados.

Cada iteración de prueba permitió realizar ajustes incrementales al código y a la interfaz, optimizando la experiencia del usuario y reduciendo tiempos de carga. También se evaluó el desempeño bajo condiciones variables de iluminación y conectividad, garantizando la funcionalidad del sistema en contextos reales de obra.

El resultado fue un prototipo funcional, robusto y plenamente operativo, capaz de proyectar modelos BIM como se visualiza en la figura 36, en entornos reales con precisión, estabilidad y fluidez, demostrando su potencial como herramienta de apoyo para la supervisión, control y comunicación técnica en proyectos constructivos basados en metodología BIM.

Figura 36. Modelo 3D proyectado mediante la herramienta de RA en campo



3.3.3. Principales resultados y dificultades del proceso de desarrollo

Durante el desarrollo del prototipo RA–BIM se identificaron diversos desafíos técnicos y conceptuales que permitieron fortalecer la comprensión del flujo de trabajo entre la modelación BIM y la programación de aplicaciones de realidad aumentada. Estas dificultades, lejos de representar limitaciones, constituyeron etapas de aprendizaje progresivo que consolidaron el dominio de las herramientas y la madurez del proceso de integración tecnológica.

Desde las fases iniciales, el proyecto implicó un proceso de ensayo y error en la búsqueda de la configuración más estable entre Unity y los distintos frameworks de realidad aumentada disponibles. Uno de los primeros inconvenientes surgió durante las pruebas con la plataforma Vuforia Engine, cuando se intentó generar el archivo ejecutable en formato .apk. A pesar de que el proyecto compilaba sin errores visibles, el archivo resultante se generaba vacío (0 bytes), lo que impedía su instalación en dispositivos móviles Android.

Tras un análisis detallado de las dependencias del proyecto, se determinó que la causa principal radicaba en incompatibilidades entre el SDK de Vuforia y las versiones recientes de Unity (2022.3 LTS), así como en la presencia del motor gráfico Vulkan, que interfería con el sistema de renderizado al momento de la compilación. Este hallazgo permitió identificar una limitación estructural del motor de Vuforia al trabajar con versiones modernas del entorno de desarrollo, lo que condujo a la decisión estratégica de migrar a AR Foundation, un framework nativo de Unity que ofrece una integración directa con ARCore para dispositivos Android y ARKit en el caso de iOS.

La adopción de AR Foundation no solo resolvió los problemas de compatibilidad, sino que además mejoró la estabilidad del sistema, al permitir una configuración más transparente del entorno XR y una comunicación directa entre el motor gráfico y las bibliotecas del sistema operativo móvil. Este cambio de enfoque marcó un punto de inflexión en el desarrollo, estableciendo la base técnica del prototipo funcional descrito en el apartado anterior.

Durante las siguientes fases de programación surgieron dificultades menores vinculadas al lenguaje C#, especialmente en la escritura manual de los scripts y la gestión de referencias dentro del Inspector de Unity. Algunos errores comunes, como las excepciones del tipo `NullReferenceException`, se debieron a la falta de asignación de objetos o a discrepancias entre los nombres de variables y componentes en el código. Estos incidentes, aunque frecuentes en procesos iterativos, demandaron una depuración metódica y sistemática, revisando línea por línea el código fuente, comprobando las conexiones entre objetos en la jerarquía y estableciendo una estructura jerárquica coherente dentro de la escena.

A través de este proceso de corrección, se fortaleció la comprensión de los principios de modularidad, encapsulación y comunicación entre componentes, elementos fundamentales para el diseño de sistemas interactivos en Unity. Además, el uso de herramientas de asistencia basadas en inteligencia artificial, como

ChatGPT, permitió acelerar la resolución de errores, mejorar la organización de los scripts y aplicar buenas prácticas de programación orientada a objetos.

Otro aspecto técnico relevante fue la configuración del entorno de compilación. En las primeras pruebas, el motor gráfico Vulkan permanecía activo dentro de la lista de Graphics APIs en los ajustes de Player Settings, lo que generaba fallos de visualización y proyectaba los modelos con errores en la detección de planos. Una vez se deshabilitó Vulkan y se estableció OpenGLES3 como única API activa, la detección y proyección de los modelos tridimensionales se ejecutó de manera correcta, logrando una visualización estable, precisa y sin distorsiones en los distintos dispositivos de prueba.

A lo largo de las iteraciones, también se evidenció la importancia de mantener una estructura de proyecto ordenada y documentada, donde cada carpeta, prefab y script estuviera claramente identificado dentro del repositorio. Esta organización resultó clave para evitar redundancias, facilitar la depuración y garantizar la escalabilidad del sistema a futuras versiones o expansiones.

A pesar de las incidencias experimentadas, el proceso de desarrollo permitió consolidar un conocimiento integral del ciclo de vida de una aplicación RA-BIM, desde la preparación de los modelos digitales hasta su optimización para entornos móviles. La adopción definitiva de AR Foundation se tradujo en una mejora sustancial en términos de rendimiento, compatibilidad y estabilidad, permitiendo el despliegue de un prototipo plenamente funcional y alineado con los requerimientos técnicos y operativos definidos al inicio del proyecto.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian la madurez alcanzada en el proceso de desarrollo, donde cada dificultad fue abordada mediante análisis técnico, revisión iterativa y aplicación de estrategias de mejora continua. El prototipo resultante no solo valida la viabilidad de integrar modelos BIM en entornos de realidad aumentada, sino que también demuestra la capacidad del sistema para adaptarse y evolucionar frente a los retos propios del desarrollo tecnológico en el ámbito de la construcción digital.

3.3.4. Manual de usuario técnico

Como parte final del proceso de desarrollo del prototipo RA-BIM, se elaboró un documento preliminar dirigido al personal técnico y operativo encargado de implementar la herramienta en campo. Este manual tiene como propósito garantizar un uso correcto, seguro y eficiente de la aplicación, facilitando la transferencia de conocimiento técnico hacia los equipos encargados de la supervisión y control en obra.

El contenido del manual fue estructurado de manera didáctica y secuencial, con el fin de acompañar al usuario desde la instalación inicial hasta la manipulación avanzada de los modelos proyectados. En su interior se incluyen los siguientes apartados principales:

- Guía paso a paso para la instalación de la aplicación en dispositivos móviles Android compatibles con ARCore, especificando los requisitos mínimos de hardware y las configuraciones necesarias para su correcto funcionamiento.
- Procedimientos para la proyección de modelos BIM en el entorno real, describiendo el proceso mediante el cual el usuario selecciona el modelo desde la interfaz principal, detecta un plano físico utilizando la cámara del dispositivo y ancla la proyección tridimensional sobre la superficie identificada.
- Instrucciones de uso en campo, que describen las acciones básicas de interacción con el modelo, tales como el anclaje del objeto virtual, los ajustes de escala, rotación y reposicionamiento en tiempo real.
- Recomendaciones técnicas para optimizar la precisión y estabilidad de la proyección en entornos reales, incluyendo pautas sobre condiciones de iluminación, superficies de apoyo y calibración del plano base.
- Buenas prácticas de uso en escenarios constructivos, orientadas a evitar errores operativos, minimizar riesgos de interpretación y promover un uso eficiente de la herramienta durante las actividades de supervisión y seguimiento en obra.

Más allá de su función operativa, este manual fue concebido también como un instrumento pedagógico, destinado a apoyar los procesos de capacitación y entrenamiento del personal técnico en la adopción de herramientas de realidad aumentada integradas a flujos BIM. Su contenido busca fomentar la apropiación tecnológica dentro del sector constructivo, contribuyendo a la estandarización de procedimientos y al fortalecimiento de la cultura digital en el ámbito constructivo.

El documento completo del Manual Técnico de Uso y Capacitación puede consultarse en el Apéndice 5, donde se presenta su estructura detallada, ejemplos gráficos y las instrucciones actualizadas para su aplicación práctica en proyectos desarrollados.

3.4 Implementación de la herramienta RA–BIM mediante un caso piloto en entorno real de obra

La etapa de implementación representa la fase final del proceso de desarrollo de la herramienta RA–BIM, orientada a validar su desempeño en un contexto constructivo real. En esta fase, se aplicó el prototipo desarrollado a partir del template “AR Mobile” de Unity, el cual constituyó la base operativa para la proyección de modelos BIM en entorno aumentado. Este prototipo, previamente optimizado, fue adaptado para su uso en campo con el fin de comprobar su funcionalidad bajo condiciones reales de obra.

El objetivo principal de esta etapa es trasladar los resultados obtenidos en el entorno de desarrollo a una situación práctica, evaluando la capacidad del sistema para integrarse de manera efectiva en los procesos constructivos del sistema modulado de la empresa Armabloque. A través de la ejecución de un caso piloto, se busca analizar el comportamiento de la herramienta frente a las condiciones propias del entorno físico —como variaciones de iluminación, texturas de superficie, interferencias ambientales y conectividad—, valorando su precisión, estabilidad, usabilidad y eficiencia en la proyección de modelos BIM.

Esta validación constituye un paso esencial para determinar el grado de madurez tecnológica alcanzado, así como la viabilidad del prototipo como apoyo en tareas de control y seguimiento de obra. Además, los resultados obtenidos servirán como punto de partida para la formulación de mejoras, ajustes en la interfaz y refinamientos técnicos orientados a su futura implementación a mayor escala dentro de los procesos constructivos de la empresa.

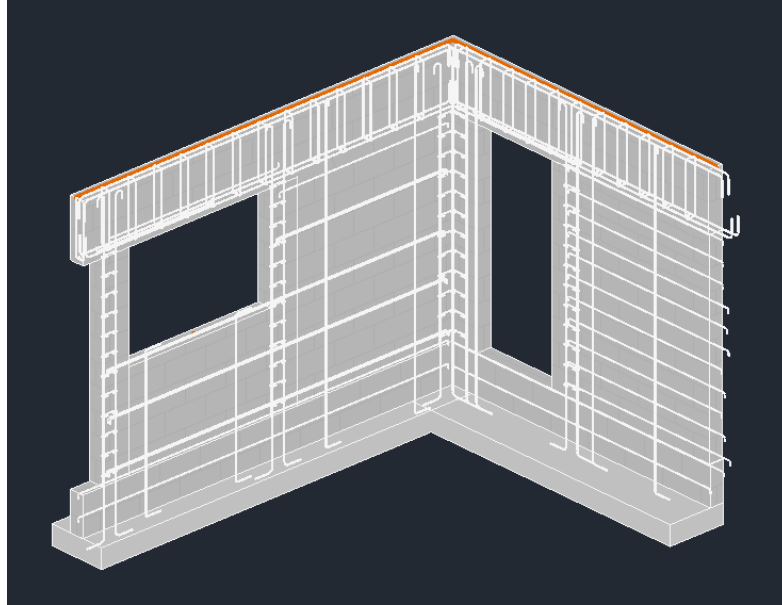
3.4.1 Descripción general del caso piloto

El caso piloto tuvo como finalidad validar la funcionalidad operativa de la herramienta RA–BIM en un entorno de obra real controlado, evaluando su precisión, estabilidad, usabilidad y potencial de apoyo en tareas de supervisión y control constructivo. Esta validación se concibió como una experiencia experimental aplicada, diseñada para reproducir las condiciones técnicas y ambientales de una obra en ejecución, permitiendo observar el comportamiento del prototipo en situaciones que emulan el trabajo profesional en campo.

Para este propósito, se seleccionó como modelo de prueba un conjunto constructivo conformado por dos paredes de mampostería apoyadas sobre una cimentación corrida según se observa en la figura 18, desarrollado previamente en entorno BIM. Este modelo fue elegido por su relevancia estructural y su utilidad pedagógica, ya que permite visualizar con claridad la disposición de los elementos de refuerzo de acero, los

anclajes verticales y horizontales, y la interacción entre los componentes estructurales de la base y el sistema de muros. Su configuración representa una unidad constructiva típica dentro de los proyectos constructivos básicos, lo que aporta coherencia entre el ejercicio experimental y las aplicaciones reales de la empresa.

Figura 18. Modelo 3D utilizado para el caso piloto del proyecto



El modelo tridimensional fue preparado en Autodesk Revit, posteriormente optimizado en Blender y exportado en formato FBX, para reducir su peso poligonal y garantizar la correcta lectura de materiales y geometrías dentro de Unity. Esta optimización incluyó la depuración de mallas, la verificación de normales, la asignación de texturas básicas y la centralización del origen del modelo, con el fin de lograr una proyección espacial precisa y estable en el entorno aumentado.

El escenario del caso piloto se estableció sobre un terreno real previamente aplanado como se visualiza en la figura 19, simulando una zona de obra en la etapa de ejecución. Se cuidaron aspectos como la iluminación natural, las condiciones del terreno, la presencia de texturas reales como el suelo, el concreto, el acero expuesto, y la distancia de proyección, de manera que el ejercicio reflejara con la mayor fidelidad posible el comportamiento que tendría la aplicación en un entorno constructivo activo.

Figura 19. Terreno para la proyección del modelo 3D utilizado en el caso piloto



Para la ejecución del caso, se empleó un dispositivo móvil Android con soporte ARCore, capaz de detectar planos horizontales y verticales mediante el framework AR Foundation. Una vez reconocido el plano físico, el modelo fue anclado y proyectado directamente sobre la superficie del terreno, permitiendo observar en tiempo real la correspondencia entre el modelo BIM digital y su representación aumentada. Esta proyección posibilitó la exploración interactiva del modelo, mediante rotación, traslación y ajuste de escala, facilitando su análisis desde distintos ángulos y distancias.

El ejercicio permitió validar la capacidad del sistema para representar con exactitud los elementos de acero estructural embebidos en la mampostería, evaluar su continuidad entre muros y cimentación, y comprobar la legibilidad del modelo bajo condiciones reales de luz y movimiento. Asimismo, se analizó la respuesta del anclaje espacial al desplazamiento del usuario y la estabilidad visual del modelo frente a variaciones de posición del dispositivo, demostrando un desempeño consistente y fluido durante toda la sesión de prueba.

En conjunto, el caso piloto constituyó un ensayo exploratorio integral, orientado a comprobar la viabilidad técnica, funcional y visual del prototipo RA-BIM desarrollado con el template AR Mobile de Unity, confirmando su potencial para integrarse como herramienta de apoyo en la fase de ejecución de obra. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras mejoras del sistema, así como para su implementación gradual en proyectos reales, en los cuales la proyección aumentada de modelos BIM puede convertirse en un recurso clave para la verificación de armado, control de calidad y asistencia técnica en campo.

3.4.2 Metodología de validación

La metodología de validación aplicada en el caso piloto tuvo como propósito comprobar la funcionalidad, precisión y aplicabilidad práctica del prototipo de herramienta RA–BIM desarrollado, dentro de un entorno constructivo real controlado. El proceso se diseñó bajo un enfoque experimental y observacional, en el cual se analizaron parámetros técnicos y de usabilidad mediante la ejecución de pruebas controladas en campo.

La validación se estructuró en tres etapas principales: preparación del entorno y los dispositivos, ejecución de la prueba en campo y registro de observaciones y resultados. Cada fase se definió con el fin de garantizar la coherencia entre las condiciones de evaluación y los objetivos del proyecto, asegurando que los resultados obtenidos fueran representativos de un escenario constructivo real.

3.4.2.1 Preparación del entorno de validación

En la primera etapa, se seleccionó un área de prueba con condiciones equivalentes a una obra en ejecución, específicamente un terreno previamente nivelado y con superficie de textura homogénea, que permitiera una correcta detección de planos horizontales mediante ARCore.

Se verificaron variables ambientales como la iluminación natural, la uniformidad del suelo y la ausencia de reflejos intensos o sombras pronunciadas, factores determinantes para la estabilidad del sistema de realidad aumentada.

Asimismo, se preparó el modelo BIM a utilizar en la prueba: dos muros de mampostería sobre cimentación corrida, con su refuerzo estructural completo. Este modelo fue procesado en Blender para su depuración geométrica y optimización, y posteriormente exportado al entorno de Unity dentro del proyecto RA–BIM.

Durante esta fase, se configuraron los scripts de detección de planos, posicionamiento y rotación del modelo, junto con la interfaz de usuario desarrollada en el prototipo.

3.4.2.2 Ejecución de la prueba en campo

La segunda etapa correspondió a la puesta en funcionamiento de la aplicación RA–BIM en condiciones reales de uso.

Se empleó un dispositivo móvil Android Samsung Galaxy S23 con soporte ARCore y cámara trasera de alta resolución, asegurando la correcta calibración del giroscopio y los sensores de profundidad antes de iniciar la prueba.

El procedimiento contempló los siguientes pasos:

- Inicialización de la aplicación RA–BIM y acceso al menú principal de modelos.
- Barrido del entorno físico con la cámara del dispositivo, permitiendo al sistema identificar planos horizontales mediante nubes de puntos generadas por ARCore.

- Selección del modelo de prueba desde la interfaz interactiva.
- Anclaje del modelo 3D sobre el plano detectado, verificando su posición, escala y orientación.
- Manipulación manual del modelo, incluyendo rotación, traslación y ajuste de escala, con el fin de observar la estabilidad del anclaje y la respuesta del sistema ante cambios de perspectiva.
- Observación y registro de comportamiento bajo distintas condiciones de iluminación y distancia.

Durante la prueba, se documentaron las reacciones del modelo ante movimientos rápidos, cambios de ángulo y aproximaciones a elementos físicos cercanos, valorando su capacidad de mantener la coherencia espacial y la precisión geométrica.

3.4.2.3 Registro y análisis de resultados

En la tercera fase se procedió al registro sistemático de las observaciones, tanto cualitativas como cuantitativas. Se consideraron tres ejes de evaluación:

- Estabilidad de la proyección aumentada: capacidad del modelo para mantener su posición relativa al plano detectado, sin desplazamientos o vibraciones perceptibles.
- Precisión geométrica: correspondencia entre la escala del modelo digital y las dimensiones reales del entorno físico.
- Usabilidad e interacción: facilidad de operación de la interfaz, tiempos de respuesta del sistema y claridad visual de los elementos mostrados.

Las observaciones fueron complementadas con capturas de pantalla como se observa en la figura 20, videos y notas técnicas que permitieron documentar el comportamiento del prototipo en cada etapa del proceso. Este registro fue fundamental para identificar oportunidades de mejora y consolidar la evidencia empírica sobre el desempeño del sistema RA-BIM.

Figura 20. Caso piloto con el modelo 3D proyectado en campo



Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre el modelo proyectado y el modelo BIM original, verificando la correspondencia entre ambos en términos de proporciones, alineación y representación estructural. El proceso metodológico permitió obtener una validación integral del prototipo, comprobando su estabilidad, precisión y aplicabilidad como herramienta de apoyo en la fase de ejecución de proyectos constructivos.

3.4.3 Resultados de la validación

La validación del prototipo RA-BIM en entorno real permitió obtener una serie de resultados que evidencian su capacidad de funcionamiento, así como las limitaciones y oportunidades de mejora identificadas durante el proceso. Los resultados se organizaron en tres dimensiones principales: comportamiento técnico del sistema, precisión y estabilidad de la proyección aumentada, y experiencia de uso en campo.

Primeramente, se verificó el desempeño técnico del sistema durante la ejecución del caso piloto, la aplicación mantuvo un rendimiento estable, con tiempos de carga promedio inferiores a 5 segundos para modelos optimizados en Blender y exportados en formato .fbx. El motor ARCore logró una detección de planos rápida y confiable, identificando superficies horizontales con una precisión suficiente para permitir el anclaje correcto del modelo 3D.

Se comprobó que el tratamiento previo del modelo BIM en Blender fue un factor determinante para el desempeño del sistema, ya que la reducción del número de polígonos y la depuración de geometrías innecesarias facilitaron la carga y manipulación del modelo en Unity, evitando retrasos o errores de renderizado.

La aplicación mantuvo una tasa de cuadros por segundo (FPS) adecuada para garantizar fluidez visual sin interrupciones perceptibles, incluso durante movimientos de cámara o rotaciones del modelo.

Por otro lado, con respecto a la precisión y estabilidad del modelo proyectado, el modelo virtual conservó una escala coherente respecto al entorno físico. El anclaje del modelo se mantuvo estable bajo desplazamientos moderados del dispositivo, sin desplazamientos notables o vibraciones del punto de anclaje. Sin embargo, se detectó una ligera pérdida de estabilidad cuando el dispositivo era girado con rapidez o bajo condiciones de iluminación intensa, lo que afectaba temporalmente la capacidad del sistema para mantener la coherencia espacial.

Estos comportamientos se atribuyen a las limitaciones propias de la detección visual de planos por parte de ARCore, especialmente en superficies con baja textura o reflejos pronunciados. Aun así, la recuperación del modelo tras estos eventos fue rápida, manteniendo la proyección anclada en la posición inicial con desviaciones mínimas.

A continuación, respectivo a la interacción y experiencia de usuario desde el punto de vista de usabilidad, los resultados mostraron una interfaz intuitiva y de fácil comprensión para el usuario técnico, incluso sin experiencia previa en aplicaciones de realidad aumentada.

Se observó que los usuarios valoraron positivamente la claridad visual de los elementos proyectados, especialmente en la representación de componentes estructurales como refuerzos y bloques modulares, lo que facilita la interpretación del modelo en campo y el contraste con la ejecución real.

No obstante, se identificaron oportunidades de mejora, tales como:

- Incorporar indicadores visuales de escala y nivelación para facilitar la alineación del modelo con los elementos físicos.
- Optimizar el contraste del modelo en condiciones de alta luminosidad.
- Permitir la carga selectiva de componentes del modelo BIM para reducir el peso computacional en dispositivos con menor capacidad gráfica.

Y para finalizar, en síntesis, de resultados, la validación demuestra que el prototipo RA-BIM cumple con los objetivos planteados en cuanto a proyección, manipulación y visualización de modelos BIM en campo. La

herramienta mostró un comportamiento estable, preciso y funcional, con una integración efectiva entre los procesos digitales (modelado BIM) y las condiciones físicas de obra.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica y operativa del sistema como apoyo al control y seguimiento de proyectos constructivos bajo el sistema básico constructivo, consolidando su potencial para futuras etapas de desarrollo y aplicación a proyectos de mayor complejidad.

Es relevante mencionar que los celulares Android capaces de utilizar la aplicación, son los que tengan disponibles los Servicios de Google Play para Realidad Aumentada, los cuales se encuentran en el anexo 3

3.4.4 Ajustes al flujo RA–BIM según resultados y comparativa pre/post implementación

A partir de la etapa de validación del prototipo RA–BIM en entorno de obra, se identificaron diversos aspectos que requerían ajustes dentro del flujo de trabajo, tanto a nivel técnico como operativo. Los resultados permitieron analizar el desempeño real de la herramienta, su interacción con el usuario y su respuesta ante las condiciones físicas del entorno constructivo, lo cual generó retroalimentación valiosa para la optimización del sistema.

Uno de los principales ajustes realizados correspondió a la configuración del proceso de detección y anclaje de planos, ya que durante las pruebas iniciales se observaron pequeñas desviaciones en la alineación del modelo respecto al terreno proyectado. Esto llevó a refinar los parámetros de raycasting y de actualización de pose dentro del script ARInteractionsManager, logrando una mayor estabilidad del modelo digital y una correspondencia más precisa con el entorno físico.

Asimismo, se introdujeron mejoras en la gestión de la interfaz de usuario (UI), optimizando la disposición de los botones y el tamaño de los paneles para facilitar la interacción en campo bajo condiciones de iluminación intensa. Se incorporó un sistema de realimentación visual que notifica al usuario cuando la aplicación ha detectado un plano válido, incrementando así la intuitividad del proceso y reduciendo los errores operativos durante el uso en obra.

Otro ajuste importante se aplicó al rendimiento gráfico del prototipo, donde se redujo la carga de texturas y se implementaron materiales de tipo Unlit/Texture, lo que permitió una proyección más fluida en dispositivos móviles de gama media. Además, se ajustó la escala base del modelo BIM dentro del entorno de Unity, asegurando la coherencia dimensional entre la representación aumentada y el modelo constructivo real.

A nivel procedimental, se redefinió la secuencia de carga de modelos BIM dentro del flujo RA–BIM, estandarizando las rutas de importación y estableciendo un formato de referencia (.FBX) que facilita la actualización continua de los elementos constructivos. Este cambio fortaleció la interoperabilidad del sistema y la posibilidad de incorporar nuevos modelos en futuras versiones del prototipo.

Finalmente, a partir del análisis comparativo entre el flujo inicial y la versión ajustada tras la validación, se identificaron mejoras significativas en términos de estabilidad, usabilidad y precisión de la proyección. La siguiente tabla 6 resume los principales cambios y beneficios observados:

Tabla 6. Análisis comparativo entre el flujo inicial y la versión ajustada

Aspecto evaluado	Situación previa a la validación	Ajustes realizados / Situación posterior
Detección de planos	Inestabilidad al anclar modelos sobre superficies irregulares.	Optimización de parámetros de raycasting y actualización de pose; mayor precisión en el anclaje.
Interfaz de usuario (UI)	Botones poco visibles bajo luz solar directa; ausencia de retroalimentación visual.	Rediseño de la UI con mejor contraste y alertas visuales al detectar planos válidos.
Escala y alineación del modelo BIM	Desajuste leve entre el modelo proyectado y el terreno real.	Reconfiguración de la escala base y punto de origen en Unity, logrando coherencia dimensional.
Rendimiento del sistema	Caídas de rendimiento en dispositivos de gama media durante la visualización.	Sustitución de materiales por shaders ligeros y reducción de texturas; ejecución más fluida.
Procedimiento de carga de modelos	Organización no estandarizada de archivos y rutas de importación.	Estructura unificada para la incorporación de modelos BIM (.FBX) dentro del sistema RA-BIM.
Usabilidad en obra	Requiere asistencia inicial para comprender el flujo de uso.	Interfaz más intuitiva; usuario puede operar de forma autónoma tras breve inducción.

Capítulo 4. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los principales hallazgos obtenidos durante el desarrollo de la investigación, relacionados con la implementación de la herramienta de realidad aumentada integrada con modelos BIM (RA-BIM) en proyectos de construcción. El análisis se estructura en función de cuatro subcapítulos, los cuales permiten abordar de manera integral los distintos componentes del estudio y su relación con los objetivos planteados.

4.1 Identificación de necesidades técnicas, operativas y funcionales

El análisis de los resultados obtenidos en la etapa de diagnóstico permite comprender de manera integral las condiciones, expectativas y limitaciones que enfrenta el personal técnico en obra respecto al uso de herramientas digitales, así como la pertinencia de implementar una solución basada en realidad aumentada integrada con modelos BIM (RA-BIM). Los hallazgos revelan un panorama donde convergen desafíos operativos tradicionales con nuevas oportunidades tecnológicas para optimizar la gestión constructiva.

En primer lugar, dentro de la categoría de visualización y comprensión del proyecto, se evidenció que el uso de planos bidimensionales continúa representando una de las principales fuentes de error e ineficiencia durante la ejecución. La falta de perspectiva tridimensional, la confusión en la lectura de detalles y la degradación física de los planos impresos generan dependencias excesivas del criterio individual del maestro de obras o del inspector. Ante ello, la RA se perfila como una respuesta directa a esta limitación, al permitir la proyección tridimensional del modelo arquitectónico y estructural directamente en el entorno físico, favoreciendo la comprensión espacial, la detección temprana de inconsistencias y la reducción de retrabajos.

En cuanto a la dimensión de control de calidad y supervisión, los encuestados reconocen que la mayor contribución potencial de la RA-BIM radica en su capacidad para comparar en tiempo real la ejecución física con el modelo digital, fortaleciendo la verificación técnica de obra y reduciendo la subjetividad en los procesos de inspección. Este hallazgo coincide con los objetivos del prototipo RA-BIM desarrollado en el

presente trabajo, el cual busca convertirse en un instrumento de apoyo al seguimiento constructivo mediante proyecciones precisas, estables y coherentes con los modelos BIM originales.

Desde el punto de vista de capacitación y adopción del personal, los resultados muestran una disposición positiva generalizada hacia el uso de la herramienta. La mayoría del personal encuestado indicó que una capacitación básica o intermedia sería suficiente para su dominio, lo que demuestra una alta apertura hacia la innovación tecnológica, siempre que la herramienta mantenga una interfaz simple, un flujo de uso intuitivo y soporte visual o documental adecuado. Este punto refuerza la decisión de incluir en el desarrollo del prototipo un manual práctico de instalación y uso, así como una interfaz centrada en la experiencia del usuario en campo.

Respecto a la eficiencia operativa y optimización de recursos, el análisis confirma que la RA puede generar impactos significativos en la reducción de tiempos de ejecución, la minimización de desperdicios y la optimización de materiales. No obstante, se identificaron limitaciones estructurales del entorno constructivo costarricense, como la inestabilidad de la conectividad móvil y la disponibilidad limitada de equipos tecnológicos, lo cual obliga a diseñar una aplicación ligera, funcional en dispositivos de gama media y con capacidades offline parciales. Estos criterios fueron considerados en la configuración técnica del prototipo RA-BIM mediante la utilización de modelos optimizados, materiales de bajo peso gráfico y un flujo de ejecución estable bajo condiciones de obra.

En la categoría de colaboración y comunicación, los hallazgos destacan que la RA no solo puede emplearse como una herramienta técnica de proyección, sino también como un medio colaborativo y comunicacional que fortalezca la coordinación interdisciplinaria y facilite la interacción entre equipos técnicos, administrativos y clientes. La posibilidad de compartir visualizaciones interactivas, registrar observaciones y mostrar avances en tiempo real promueve una cultura de transparencia y trabajo colaborativo en la gestión de proyectos.

Finalmente, la matriz de necesidades técnicas, operativas y funcionales permitió sintetizar y jerarquizar los factores críticos para el diseño de la herramienta, identificando como prioritarios la proyección precisa de modelos estructurales y arquitectónicos, la facilidad de uso, la robustez técnica y la interoperabilidad con entornos BIM. Estos resultados sirvieron como punto de partida para definir las características funcionales del prototipo RA-BIM y su metodología de validación en entorno real de obra.

En conjunto, el análisis evidencia que la RA-BIM posee un alto potencial transformador en los procesos constructivos, al actuar como puente entre la representación digital y la ejecución física del proyecto. Su implementación responde no solo a una necesidad técnica, sino también a una oportunidad de modernizar la supervisión, la capacitación y la comunicación dentro de los equipos de trabajo. Los hallazgos obtenidos constituyen, por tanto, un insumo estratégico para la consolidación del flujo RA-BIM, asegurando que el desarrollo tecnológico se alinee con las condiciones reales de campo y las prioridades detectadas en el sector.

4.2 Revisión sistemática del estado del arte en la integración RA–BIM en construcción

La revisión sistemática realizada evidencia que la integración de la realidad aumentada (RA) con la metodología Building Information Modeling (BIM) en el sector construcción se encuentra en una fase de consolidación, con una evolución marcada desde aplicaciones experimentales hacia soluciones más orientadas a la práctica profesional. El análisis de los estudios recopilados revela tres grandes áreas de desarrollo: la visualización de modelos tridimensionales superpuestos al entorno real, el soporte a la coordinación y gestión de obra, y el apoyo a la capacitación y toma de decisiones.

En primer lugar, la visualización de modelos 3D mediante RA constituye la aplicación más extendida. Los trabajos revisados muestran que esta capacidad incrementa la comprensión espacial, facilita la detección temprana de conflictos y genera un puente más eficiente entre el diseño digital y la realidad física. No obstante, los estudios también advierten limitaciones vinculadas a la precisión del anclaje espacial y la usabilidad en campo, especialmente en entornos con alta complejidad geométrica o condiciones ambientales adversas.

En segundo término, la RA como herramienta de gestión y control en fase de ejecución se perfila como un área emergente de alto potencial. Investigaciones recientes destacan su utilidad en la verificación de tolerancias, la supervisión del avance constructivo y la mejora en la comunicación entre actores. Sin embargo, los resultados también muestran que la adopción plena requiere una mayor estandarización en los flujos de trabajo BIM–RA, así como la compatibilidad entre distintos dispositivos y plataformas. La ausencia de protocolos universales limita todavía la interoperabilidad y la replicabilidad de estas experiencias en proyectos de gran escala.

Asimismo, la aplicación de RA en procesos formativos y de capacitación demuestra un impacto positivo en la reducción de errores, la transferencia de conocimiento y la seguridad laboral. Los casos de estudio revisados indican que la RA potencia la comprensión de procedimientos constructivos complejos, lo que resulta especialmente valioso en entornos educativos o en la inducción de personal en obra. No obstante, persiste la necesidad de evaluar de manera más sistemática la relación costo–beneficio de estas implementaciones, ya que la inversión en equipos y en generación de contenido sigue representando una barrera para su masificación.

Un elemento común a los diferentes enfoques revisados es la dependencia tecnológica: el rendimiento de las aplicaciones RA–BIM está directamente condicionado por la capacidad de procesamiento de los dispositivos móviles, la conectividad en obra y la calidad del modelado BIM de origen. La literatura señala que un modelado poco detallado o inconsistente puede comprometer la efectividad de la experiencia

aumentada, lo cual refuerza la importancia de establecer buenas prácticas en la creación y gestión de modelos digitales.

Finalmente, el conjunto de evidencias analizadas permite concluir que la integración RA–BIM genera beneficios tangibles en términos de productividad, precisión y comunicación, pero su consolidación como práctica estándar en la industria constructiva depende de superar tres desafíos clave:

- Garantizar la precisión espacial y la estabilidad de la visualización en contextos reales de obra.
- Desarrollar marcos normativos y protocolos de interoperabilidad que permitan la integración fluida en los flujos de trabajo BIM.
- Reducir los costos de implementación y mejorar la accesibilidad tecnológica para favorecer su adopción en empresas de diferentes escalas.

Por conclusión, los hallazgos confirman que la RA aplicada a entornos BIM representa una innovación disruptiva con capacidad de transformar las prácticas constructivas, aunque todavía requiere ajustes metodológicos y técnicos para lograr una implementación plenamente estandarizada y sostenible.

En este sentido, el análisis comparativo de los estudios revisados permite identificar una tendencia general hacia la madurez tecnológica del enfoque RA–BIM, acompañada de una progresiva diversificación en sus ámbitos de aplicación. Mientras que las primeras investigaciones se centraban en la validación de la viabilidad técnica, los trabajos más recientes se orientan a la optimización de los procesos de obra y a la integración operativa con sistemas de gestión de proyectos. Esta evolución refleja un cambio de paradigma en la forma en que la industria percibe la utilidad de la RA: de ser una herramienta complementaria de visualización, pasa a considerarse un componente estratégico para el control, la comunicación y la toma de decisiones.

Sin embargo, el conjunto de evidencias también muestra que la adopción de la RA–BIM aún no alcanza un nivel homogéneo dentro del sector. Las limitaciones derivadas de la fragmentación tecnológica, la ausencia de estándares unificados y la variabilidad en la calidad de los modelos BIM continúan condicionando los resultados. De igual forma, se advierte la necesidad de establecer metodologías de evaluación que permitan cuantificar de manera objetiva el impacto de estas herramientas sobre la productividad y la eficiencia constructiva.

De forma transversal, la literatura enfatiza que la efectividad de las aplicaciones RA–BIM depende tanto del desarrollo tecnológico como de la capacitación del personal que las utiliza. La aceptación y el aprovechamiento pleno de estas herramientas requieren no solo de dispositivos adecuados, sino también de una cultura digital consolidada que promueva la integración tecnológica como parte de la gestión del proyecto. En consecuencia, los esfuerzos futuros deben orientarse hacia el fortalecimiento de las competencias digitales, la estandarización de procesos y la democratización de las tecnologías inmersivas para que la integración RA–BIM pueda consolidarse como una práctica habitual y sostenible dentro de la industria de la construcción.

4.3 Desarrollo de un prototipo funcional de herramienta RA–BIM

El proceso de desarrollo del prototipo RA–BIM permitió evidenciar el potencial real de la integración entre los entornos de modelado BIM y las plataformas de realidad aumentada, demostrando la viabilidad de construir herramientas accesibles y funcionales capaces de vincular la información digital con el entorno físico de la obra. Los resultados obtenidos confirmaron que el prototipo cumple con los objetivos técnicos planteados: proyectar modelos tridimensionales con precisión sobre superficies reales, mantener estabilidad en el anclaje durante el movimiento del dispositivo y ofrecer una interfaz de usuario intuitiva, adecuada para personal técnico con conocimientos básicos en el manejo de dispositivos móviles.

Desde la perspectiva tecnológica, la decisión de migrar del uso de Vuforia hacia el framework AR Foundation resultó determinante para el éxito del proyecto. Esta transición permitió solventar los problemas de compatibilidad presentes en las primeras versiones del sistema y optimizar el proceso de compilación, aprovechando además las capacidades nativas de ARCore para la detección de planos y el seguimiento espacial. El uso de AR Foundation se consolidó como una solución más robusta, escalable y coherente con las versiones recientes de Unity, ofreciendo una arquitectura flexible que facilita futuras actualizaciones y la incorporación de nuevas funcionalidades.

En términos de desempeño, las pruebas realizadas en dispositivos Android compatibles con ARCore demostraron una estabilidad visual adecuada y un rendimiento fluido en tiempo real, incluso bajo condiciones de iluminación variable y sin conexión a internet. Estos resultados confirman la factibilidad de implementar la herramienta en entornos de obra reales, caracterizados por condiciones operativas cambiantes y limitaciones técnicas. La eliminación del motor gráfico Vulkan y la configuración basada en OpenGL ES3 fueron decisiones clave para lograr compatibilidad total y evitar errores de renderizado, garantizando una proyección estable de los modelos BIM.

El proceso de programación en C# y la depuración de los distintos scripts fortalecieron la comprensión sobre la estructura lógica que requiere una aplicación RA–BIM, destacando la relevancia de la jerarquía de objetos en Unity, la correcta asignación de componentes en el Inspector y la gestión eficiente de los prefabs. Estos aprendizajes aportaron una base sólida para la mejora continua del sistema, promoviendo la adopción de buenas prácticas de codificación, documentación y control de versiones.

Asimismo, el enfoque iterativo adoptado, basado en la experimentación, el análisis y la corrección progresiva, permitió no solo resolver incidencias técnicas, sino también optimizar la experiencia de usuario, mejorar la detección de planos y ajustar la escala de los modelos BIM para lograr correspondencia con las dimensiones reales. Este proceso contribuyó a consolidar un flujo de trabajo RA–BIM claro, replicable y adaptable a distintos tipos de proyectos dentro del sector constructivo.

En conjunto, los resultados alcanzados en esta etapa evidencian que la aplicación desarrollada cumple con los principios de precisión, estabilidad y facilidad de uso definidos al inicio de la investigación. Más allá de su funcionalidad técnica, el prototipo constituye un avance relevante en la transferencia tecnológica hacia el sector construcción, al ofrecer una herramienta práctica, de bajo costo y alta accesibilidad, capaz de fortalecer los procesos de supervisión, revisión y coordinación en obra. Su desarrollo demuestra el potencial de la realidad aumentada como apoyo directo a los flujos de trabajo basados en metodología BIM, contribuyendo así a la digitalización y modernización de los procesos constructivos.

4.4 Implementación de la herramienta RA–BIM mediante un caso piloto en entorno real de obra

La implementación del prototipo RA–BIM en un caso piloto de obra permitió trasladar validaciones técnicas del entorno de desarrollo a una situación práctica y documentar el comportamiento real del sistema frente a las condiciones operativas habituales en obra. El análisis de los resultados permite extraer conclusiones técnicas, operativas y estratégicas que son relevantes para la consolidación de la herramienta como apoyo a la supervisión, verificación y coordinación en la fase de ejecución constructiva.

En cuanto al rendimiento técnico y robustez del prototipo, las pruebas de campo confirmaron que la elección tecnológica, AR Foundation + ARCore y plantilla AR Mobile sobre Unity, ofrece un nivel de rendimiento adecuado para aplicaciones de proyección BIM en dispositivos móviles de gama media-alta. Los tiempos de carga reportados (inferiores a 5 s para modelos optimizados) y la tasa de imágenes por segundo estable indican que:

- El pipeline de optimización (exportar FBX desde Revit → tratamiento de polígonos y materiales en Blender → prefabs en Unity) es efectivo para mantener la fluidez en tiempo real.
- La configuración de compilación (OpenGL ES3, IL2CPP, ARM64) posibilita compatibilidad y estabilidad en Android; la exclusión de Vulkan resolvió problemas de renderizado detectados en etapas previas.

No obstante, la robustez del sistema está condicionada por factores externos a la aplicación: calidad del sensor de la cámara, características del giroscopio/IMU del dispositivo, condiciones lumínicas y texturización de las superficies. En particular, la detección visual de planos por ARCore mostró límites en

superficies con baja textura o con reflejos, lo que produjo pérdida temporal de seguimiento cuando el dispositivo se movió bruscamente o ante iluminación intensa.

Implicación práctica: el prototipo es técnicamente viable para uso en obra, siempre que se implementen procedimientos de mitigación (calibración previa, selección de superficies objetivo y ajustes en UI para guiar al usuario).

Por otro lado, en cuanto a la precisión y estabilidad espacial, la correspondencia métrica entre modelo y realidad se mantuvo en rangos aceptables durante la mayor parte de las pruebas. El anclaje espacial mostró estabilidad adecuada ante desplazamientos moderados del usuario, y la recuperación tras eventos de pérdida de tracking fue rápida y con desviaciones mínimas.

Limitaciones detectadas:

- Pérdida temporal de estabilidad ante movimientos rápidos o cambios abruptos de ángulo.
- Sensible a superficies con brillo o muy homogéneas (asfalto pulido, planchas metálicas reflectantes).
- Ligera deriva acumulativa en sesiones prolongadas sin re-anclaje o sin referencias externas.

Recomendaciones técnicas: integrar mecanismos de re-anclaje explícito, emplear anclajes híbridos y ofrecer indicadores de confianza del anclaje para que el usuario conozca la calidad del tracking en cada momento.

En términos de usabilidad y experiencia de usuario, la UI diseñada resultó intuitiva para usuarios técnicos no familiarizados con RA: selección de modelos, anclaje, manipulación (rotar/trasladar/escalar) y eliminación. Los ajustes de la interfaz posteriores a la validación (mejor contraste, feedback visual al detectar plano válido) mejoraron la experiencia en condiciones de luminosidad alta y facilitaron la autonomía del usuario tras una breve inducción.

- Áreas de mejora en usabilidad:
- Incluir guías contextuales en la primera ejecución.
- Añadir indicadores visuales de escala y nivel para la alineación precisa con elementos reales.
- Implementar carga selectiva (toggle por capas/disciplinas) para evitar sobrecarga visual y reducir consumo de recursos.

Además, en cuanto a los efectos sobre los procesos constructivos, el piloto mostró evidencia cualitativa de que la herramienta puede:

- Acelerar la verificación visual del armado y la ubicación de elementos.
- Mejorar la comunicación entre técnicos y operarios al ofrecer una referencia visual compartida in situ.
- Disminuir errores por interpretación de planos al superponer la geometría BIM directamente sobre la obra.

Para cuantificar estos beneficios se recomienda realizar estudios complementarios con métricas antes/después como tiempo medio de inspección, número de rectificaciones detectadas por etapa, retrasos por errores de implantación).

Para ajustes técnicos y procedimentales derivados del piloto, la ejecución del piloto permitió identificar y aplicar mejoras concretas en el flujo RA–BIM. Los cambios realizados (optimización de raycasting, UI, materiales Unlit, normalización de rutas .FBX) tuvieron impacto medible en estabilidad, usabilidad y rendimiento. Estas intervenciones confirman que la iteración rápida entre pruebas en campo y ajustes de software es un factor crítico para la maduración del sistema.

Y para finalizar, dentro de los riesgos, limitaciones y consideraciones operativas

- Dependencia de la calidad del dispositivo: proliferación de resultados dispares entre diferentes modelos.
- Condiciones ambientales adversas como lluvia e iluminación extrema, que degradan el tracking.
- Riesgos de seguridad si el personal utiliza la app en zonas con peligro como distraerse al mirar pantalla.
- Establecer protocolos de uso en obra como zonas seguras para visualizar, tiempos máximos de uso.
- Recomendar dispositivos con especificaciones mínimas y mantener un inventario controlado de hardware.
- Programas de capacitación y manuales que incluyan recomendaciones de seguridad y mantenimiento.

En síntesis, la implementación piloto validó la viabilidad técnica y operativa del prototipo RA–BIM y proporcionó insumos claros para su mejora incremental y su escalado. La combinación entre ajustes técnicos

(optimización, re-anclaje, UI adaptativa) y medidas organizativas (procedimientos de uso, capacitación y estandarización) permitirá transitar desde un prototipo funcional hacia una solución robusta y repetible aplicable a distintos tipos de obra en el sector constructivo.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permitió abordar la integración de la realidad aumentada (RA) con la metodología Building Information Modeling (BIM) como una alternativa tecnológica para optimizar los procesos de ejecución en proyectos constructivos. A partir de los objetivos planteados, se obtuvieron resultados que evidencian tanto el potencial de esta integración como los retos que aún persisten para su implementación generalizada. En este apartado se presentan las conclusiones más relevantes derivadas de la investigación, organizadas conforme a los objetivos específicos establecidos.

- La identificación de las necesidades técnicas, operativas y funcionales en la fase de ejecución permitió reconocer que la principal limitación en los proyectos constructivos radica en la falta de herramientas que conecten eficazmente la información digital del modelo BIM con el entorno físico. La integración de la realidad aumentada se plantea como una solución viable para optimizar la interpretación espacial, mejorar la comunicación entre equipos y fortalecer el control visual de las actividades en obra.
- La revisión sistemática del estado del arte evidenció que la integración RA–BIM se encuentra en una fase de consolidación, con avances significativos en visualización, control y capacitación. Sin embargo, persisten desafíos técnicos relacionados con la precisión del anclaje espacial, la interoperabilidad entre plataformas y la ausencia de protocolos estandarizados, factores que limitan su adopción masiva en el sector construcción.
- El desarrollo del prototipo de realidad aumentada en Unity y Vuforia demostró la viabilidad técnica de visualizar e interactuar con modelos BIM en entornos reales. El sistema permitió una proyección estable y funcional, confirmando su potencial para apoyar la planificación, supervisión y control de obra mediante una experiencia inmersiva e intuitiva para el usuario.
- La validación del caso piloto en un entorno real comprobó la utilidad práctica del prototipo RA–BIM, destacando su aporte en la comprensión espacial y la verificación de elementos constructivos. No obstante, se identificaron limitaciones relacionadas con las condiciones lumínicas y la detección de superficies, lo que evidencia la necesidad de optimizar los algoritmos de reconocimiento y mejorar la calibración del sistema para distintas condiciones de obra.

- La implementación de AR Foundation permitió incorporar una capa de realidad aumentada más estable, moderna y nativa de Unity, lo cual evidenció que las tecnologías emergentes de RA están alcanzando un nivel de madurez capaz de integrarse directamente con flujos BIM sin depender de marcadores físicos. Esta transición tecnológica refuerza la viabilidad de soluciones basadas en plane detection, que ofrecen mayor flexibilidad en entornos constructivos reales y reducen la necesidad de preparación previa del sitio.
- El proceso de desarrollo evidenció la importancia de estructurar un flujo de trabajo metodológico claro para la integración RA–BIM, especialmente en lo referente a la limpieza del modelo, la estandarización de escalas y la organización de los recursos digitales. La experiencia demostró que una correcta preparación del modelo BIM es determinante para evitar inconsistencias visuales, mejorar la estabilidad de anclaje y asegurar una visualización coherente con las condiciones reales de obra.
- La construcción del prototipo permitió comprobar que las tecnologías inmersivas pueden convertirse en herramientas accesibles para perfiles no especializados, siempre que se diseñen interfaces simples, intuitivas y orientadas al proceso constructivo. Este hallazgo subraya la relevancia de la experiencia de usuario (UX) dentro de las soluciones RA–BIM, particularmente en proyectos donde participan múltiples actores con distintos niveles de alfabetización digital.

Recomendaciones

Derivado de los resultados obtenidos y del análisis de las conclusiones, se formulan a continuación una serie de recomendaciones orientadas a fortalecer la aplicación práctica y el desarrollo futuro de herramientas basadas en la integración RA–BIM. Estas sugerencias buscan aportar a la mejora continua de los procesos constructivos, promoviendo la innovación tecnológica, la eficiencia operativa y la transición hacia modelos de gestión más digitalizados en el sector construcción.

- Se recomienda que los profesionales encargados del modelado BIM en el sector construcción, avancen hacia la creación de una base de datos estructurada que permita almacenar y organizar los modelos utilizados en los distintos proyectos. Esta iniciativa facilitaría que las aplicaciones de realidad aumentada incluyan un menú con opciones de selección por proyecto, mejorando así la gestión y el acceso al contenido digital.
- Asimismo, se sugiere que los desarrolladores incorporen funciones interactivas, como la posibilidad de desplegar información detallada al tocar materiales o componentes específicos dentro de la proyección aumentada, y trabajar en la mejora de la calidad visual de las texturas y elementos gráficos para garantizar una interpretación más precisa durante la ejecución en obra.
- Por su parte, los desarrolladores junto con un equipo técnico deberían continuar perfeccionando el prototipo desarrollado, especialmente en lo que respecta a la detección de planos, la estabilidad del anclaje espacial y la visualización del modelo bajo diferentes condiciones ambientales.
- Los encargados en gestión de proyectos, se recomienda que realicen pruebas adicionales en distintos tipos de obras que abarquen desde proyectos de menor complejidad hasta edificaciones o infraestructuras de mayor escala. Estas evaluaciones permitirían analizar la escalabilidad, adaptabilidad y desempeño operativo de las herramientas RA–BIM en escenarios reales, así como medir su impacto en la precisión, la eficiencia del proceso constructivo y la reducción de errores en campo.
- Finalmente, se recomienda que el equipo técnico fortalezca los procesos de capacitación continua en tecnologías RA–BIM. El desarrollo de competencias digitales actualizadas permitirá que el personal técnico y profesional adopte con mayor facilidad estas soluciones emergentes y se adapte progresivamente a los lineamientos y prácticas de la Construcción 4.0.

Referencias

- (2024). Metodología de enseñanza-aprendizaje con realidad aumentada para el desarrollo de habilidades espaciales: caso aplicado en estudiantes de Ingeniería Civil. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/22855>
- Arone Huallpa, A. M. (2022). Metodología BIM para la optimización del ciclo de vida de proyectos constructivos. Moquegua. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/133373>
- Ashour, Z., Shaghaghian, Z., & Yan, W. (2022). BIMxAR: BIM-empowered augmented reality for learning architectural representations. arXiv preprint arXiv:2204.03207.
- Bello, C. R. (2017). La realidad aumentada: lo que debemos conocer. Tecnología Investigación y Academia, 5(2), 257-261.
- Blanco Almeda, L. (2024). Selección de la metodología de gestión más adecuada para proyectos constructivos. [Trabajo de grado, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. <https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/4228de33-9a9b-4616-aa32-362e662d5727/content>
- Chai, C., Mustafa, K., Kuppusamy, S., Yusof, A., Lim, C. S., & Wai, S. H. (2019). BIM integration in augmented reality model. Civ. Eng, 10, 1266-1275.
- Coss Henning, G. (2020). Aplicaciones de la realidad aumentada en la construcción. Revista de Ingeniería de Construcción, 35(1), 23–35.
- de-Camino-Beck, T. (2025). Programación asistida por inteligencia artificial generativa. Technology Inside by CPIC, 12. <https://cpic-sistemas.or.cr/revista/index.php/technology-inside/article/view/114>
- Folch, D. R., Vázquez, J. M. P., & Julián, A. B. A. (2021). Diseño e implementación de un modelado interactivo 3D de la ETSIGCT mediante el motor gráfico Unity.
- Gámez, F. C., Severino, M. J. S., & Márquez, R. J. G. (2014). Introducción a la metodología BIM. Spanish Journal of Building Information Modelling, 14(1), 4–10.
- Gomis Álvarez, A. (2017). Aplicaciones de la realidad aumentada en la promoción y la edificación.
- Google Developers. (2025). Getting started with ARCore Extensions for AR Foundation. Recuperado de <https://developers.google.com/ar/develop/unity-arf/getting-started-extensions>
- Guzman Paredes, Y. (2022). Realidad aumentada utilizando Unity.

- Herrera, N., & Ospina, D. (2019). Guía para la definición de una estrategia de transformación digital en el sector de la construcción inmobiliaria en Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/b52cde3b-7d1d-492b-9ad4-7c86f9e9113b/content>
- Lombana, L., Ramírez, & Rivero. (2024). Videojuego 2D en Unity: Realidad aumentada con Vuforia y enfoque educativo en comunicación asertiva. *Tecnología en Marcha*, 37(2), 44–50.
- Ma, Y. P. (2022). Improved interaction of BIM models for historic buildings with a game engine platform. *Applied Sciences*, 12(3), 945.
- Martínez, J. S., & Domínguez, J. M. (2018). BIM, realidad aumentada y técnicas holográficas aplicadas a la construcción = BIM, increased reality and holographic techniques applied to construction. *Anales de Edificación*, 4(1), 27–36.
- Mendoza, J. G., Quispe, M. B., & Muñoz, S. P. (2022). Una revisión sobre el rol de la inteligencia artificial en la industria de la construcción. *Ingeniería y competitividad*, 24(2). http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30332022000200030&script=sci_arttext
- Olaya Quintero, M., & Ardila Quintero, J. (2021). Desarrollo de una herramienta de realidad aumentada para capacitación en obra. *Revista Ingeniería y Región*, 19(1), 45–58.
- Piedecausa-García, B., Pérez Sánchez, J. C., & Mateo Vicente, J. M. (2016). Construcción virtual y realidad aumentada. Aplicación en el grado de Arquitectura Técnica. <http://hdl.handle.net/10045/58459>
- Quispe Navarro, L. F., & Retamozo Lassler, A. S. (2020). Implementación de realidad virtual (RV) y realidad aumentada (RA) en preventa de proyectos multifamiliares como una experiencia inmersiva en tiempos de la nueva normalidad. <http://hdl.handle.net/10757/653973>
- Skanska. (s. f.). *Reality Capture*. Recuperado de <https://www.usa.skanska.com/what-we-deliver/services/innovation/reality-capture/>
- Simon, J. (2023). Augmented reality application development using Unity and Vuforia. *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS*, 21(1), 69–77.
- Song, J., Park, S., Lee, K., Bae, J., Kwon, S., Cho, C. S., & Chung, S. (2023). Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation. *Buildings*, 13(11), 2683.
- Torres, L. (2024). Pasos para la realización de un modelo en realidad aumentada. *Tecnológico de Costa Rica*.
- Trejo, N. (2018). Estudio de impacto del uso de la metodología BIM en la planificación y control de proyectos de ingeniería y construcción. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168599>
- Unity. (2023). *Unity and OutHere partner with Skanska to create VR safety training experiences*. Unity Technologies. Recuperado de <https://www.infosys.com/navigate-your-next/digital-capabilities/experience/taking-the-complexity.html>
- Unity Technologies. (2024). AR Foundation | Unity Manual. Recuperado de <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@latest/Manual/index.html>
- Unity Technologies. (2024). AR Foundation: Solution for AR development | Unity. Recuperado de <https://unity.com/solutions/xr/ar>

- Villegas Hortal, A. (2012). Realidad virtual en el sector de la construcción (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT). <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/c171671e-1e13-40ca-9022-b4ec0d835990/content>
- Wang, X., Love, P. E. D., & Kang, S.-C. (2013). Augmented reality in built environment: Classification and implications for future research. *Automation in Construction*, 32, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.021>

Apéndices

Apéndice 1. Encuesta realizada a personal clave del sector construcción

Encuesta diagnóstica para la implementación de RA en proyectos Constructivos

El propósito de esta encuesta es recopilar información sobre las necesidades, expectativas y condiciones técnicas relacionadas con la posible implementación de una herramienta de realidad aumentada (RA) integrada con modelos BIM en proyectos constructivos. Los resultados obtenidos permitirán orientar el desarrollo de un proyecto académico de investigación y graduación, contribuyendo a evaluar la pertinencia, beneficios y limitaciones de esta tecnología en la fase de ejecución de obra. La encuesta es de carácter confidencial y se utilizará únicamente con fines académicos. Se solicita responder de manera objetiva y sincera, ya que no existen respuestas correctas o incorrectas. Su participación es fundamental para contar con insumos reales que fortalezcan el análisis y permitan proponer soluciones tecnológicas aplicables al sector construcción.

¿Qué es la realidad aumentada (RA)?
<https://www.youtube.com/watch?v=egp18tBnuuCE>

Cuando envíe este formulario, no recopilaremos automáticamente sus detalles, como el nombre y la dirección de correo electrónico, a menos que lo proporcione usted mismo.

* Obligatorio

1. Nombre del encuestado *

Escriba su respuesta

2. ¿En qué áreas de un proyecto constructivo considera que la RA tendrá un mayor impacto? *

Diseño y modelado BIM
Supervisión e inspección de obra
Planificación y control de proyectos
Logística y gestión de materiales
Ventas y mercadeo de proyectos
Capacitación del personal en obra
Coordinación interdisciplinaria

3. ¿Qué limitaciones técnicas podrían afectar la implementación de esta herramienta en obra? *

☐ Internet-Símbolo
☐ Falta de equipo tecnológico
☐ Poca o nula experiencia del personal
☐ Fallos en la sincronización

4. ¿Cuáles cree que son las principales dificultades que se enfrentan actualmente durante la fase de ejecución en obra al trabajar únicamente con planos 2D o planos de taller? *

Escriba su respuesta

5. ¿En qué etapas del proceso constructivo considera más útil la aplicación de la RA? *

Control de calidad
Supervisión y seguimiento
Capacitación en campo
Planificación inicial del proyecto
Presentación de avances a clientes o inversionistas

6. ¿Qué elementos del modelo BIM considera indispensables para proyectar en campo mediante realidad aumentada (RA)?

Seleccione 3 opciones.

☐ Modelo arquitectónico
☐ Modelo estructural
☐ Planos de taller
☐ Lámina de presentación
☐ Modelos MEP

7. ¿Qué beneficios cree que se podrían obtener con la integración de una herramienta de realidad aumentada (RA) en un proceso constructivo? *

Escriba su respuesta

8. ¿Qué aspectos considera más importantes para evaluar el éxito de una herramienta RA-BIM?

Facilidad de uso
Precisión en la proyección
Reducción de errores y reprocesos
Optimización de tiempos de ejecución
Satisfacción del usuario
Reducción del desperdicio de materiales

9. ¿Estaría dispuesto(a) a participar en pruebas piloto y capacitaciones sobre el uso de la herramienta? *

☐ Sí
☐ No

10. ¿Qué nivel de capacitación cree que requeriría un personal para utilizar esta herramienta de RA? *

☐ Ninguna, es intuitiva
☐ Capacitación básica (1 sesión)
☐ Capacitación intermedia (varias sesiones)
☐ Capacitación avanzada (acompañamiento continuo)

11. Por favor, indique cualquier comentario, sugerencia o expectativa adicional sobre la implementación de la RA en proyectos constructivos. *

Escriba su respuesta

Apéndice 2. Check list para la verificación de fuentes bibliográficas

Título del documento

Autor

Fuente

Link

Cumple / No Cumple	Requerimiento
1. Relevancia del documento	
☐	El tema aborda Realidad Aumentada (RA), BIM o tecnologías digitales aplicadas a construcción.
☐	Está vinculado con fase de ejecución de obra, no solo diseño o visualización.
☐	Incluye aplicaciones en control, calidad, supervisión, planificación o capacitación.
☐	Aporta elementos relacionados con sistemas constructivos modulares o prefabricados (si existen).
2. Calidad de la fuente	
☐	Documento publicado en revistas indexadas (Scopus, Web of Science, etc.), congresos reconocidos, tesis de posgrado, o reportes técnicos de organismos oficiales.
☐	Blogs, Wikipedia o sitios sin revisión académica.
☐	Autores con experiencia o reconocimiento en el área (arquitectura, ingeniería, construcción, tecnologías emergentes).
3. Aspectos metodológicos de los estudios	
☐	Definen claramente el objetivo de la investigación.
☐	Señalan el contexto (país, tipo de obra, fase del proyecto).
☐	Explican las herramientas RA-BIM utilizadas (ej. Unity, Vuforia, Archicad, Revit, HoloLens, tablets).
☐	Incluyen datos sobre la muestra o usuarios involucrados (capacitaciones, cuadrillas, ingenieros, estudiantes).
Porcentaje de aprobación	0,00%

Apéndice 3. Scripts utilizados en el desarrollo del prototipo

- GameManager

```
using System;
using UnityEngine;

public class GameManager : MonoBehaviour
{
    public static GameManager Instance; //  Instancia correctamente tipada

    public event Action OnMainMenu;
    public event Action OnItemsMenu;
    public event Action OnARPosition;

    private void Awake()
    {
        if (Instance != null && Instance != this)
        {
            Destroy(gameObject);
        }
        else
        {
            Instance = this;
        }
    }

    void Start()
    {
        MainMenu();
    }

    public void MainMenu()
    {
        OnMainMenu?.Invoke();
        Debug.Log("Main Menu Activated");
    }

    public void ItemsMenu()
    {
        OnItemsMenu?.Invoke();
        Debug.Log("Items Menu Activated");
    }

    public void ARPosition()
    {
        OnARPosition?.Invoke();
        Debug.Log("AR Position Activated ");
    }

    public void CloseAPP()
    {
        Application.Quit();
    }
}
```

- DataManager

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class DataManager : MonoBehaviour
{
    [SerializeField] private List<Item> items = new List<Item>();
    [SerializeField] private GameObject buttonContainer;
    [SerializeField] private ItemButton itemButtonManager; // Prefab de ItemButton

    void Start()
    {
        if (GameManager.Instance != null)
            GameManager.Instance.OnItemsMenu += CreateButtons;
        else
            Debug.LogError("GameManager.Instance no encontrado en la escena.");
    }

    private void CreateButtons()
    {
        if (items == null || itemButtonManager == null || buttonContainer == null)
        {
            Debug.LogError("Faltan referencias asignadas en DataManager.");
            return;
        }

        foreach (var item in items)
        {
            ItemButton itemButton = Instantiate(itemButtonManager, buttonContainer.transform);

            itemButton.ItemName = item.Name;
            itemButton.ItemDescription = item.Description;

            // Convertir Texture2D a Sprite
            if (item.Image != null)
            {
                itemButton.ItemImage = Sprite.Create(
                    item.Image,
                    new Rect(0, 0, item.Image.width, item.Image.height),
                    new Vector2(0.5f, 0.5f)
                );
            }

            itemButton.Item3DModel = item.model3D; // Modelo 3D
        }

        // Remueve la suscripción para no crear botones repetidos
        if (GameManager.Instance != null)
            GameManager.Instance.OnItemsMenu -= CreateButtons;
    }
}
```

- UIManager

```
using System;
using UnityEngine;
using DG.Tweening;

public class UIManager : MonoBehaviour
{
    [Header("Panels")]
    [SerializeField] private GameObject mainMenuCanvas;
    [SerializeField] private GameObject itemsMenuCanvas;
    [SerializeField] private GameObject ARPositionCanvas;

    [Header("Main Menu Buttons")]
    [SerializeField] private Transform showItemsButton;
    [SerializeField] private Transform closeAppButton;
    [SerializeField] private Transform screenshotButton;

    [Header("Items Menu Elements")]
    [SerializeField] private Transform itemsOpenButton;
    [SerializeField] private Transform scrollView;

    [Header("AR Position Elements")]
    [SerializeField] private Transform approveButton;
    [SerializeField] private Transform deleteButton;

    private void Start()
    {
        if (GameManager.Instance != null)
        {
            GameManager.Instance.OnMainMenu += ActivateMainMenu;
            GameManager.Instance.OnItemsMenu += ActivateItemsMenu;
            GameManager.Instance.OnARPosition += ActivateARPosition;
        }
    }

    private void OnDestroy()
    {
        if (GameManager.Instance != null)
        {
            GameManager.Instance.OnMainMenu -= ActivateMainMenu;
            GameManager.Instance.OnItemsMenu -= ActivateItemsMenu;
            GameManager.Instance.OnARPosition -= ActivateARPosition;
        }
    }

    #region Activate Panels

    private void ActivateMainMenu()
    {
        // Mostrar Main Menu
        showItemsButton?.DOScale(Vector3.one, 0.3f);
        closeAppButton?.DOScale(Vector3.one, 0.3f);
    }
}
```

```

screenshotButton?.DOScale(Vector3.one, 0.3f);

// Ocultar Items Menu
itemsOpenButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.5f);
scrollView?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
scrollView?.DOMoveY(180, 0.3f);

// Ocultar AR Panel
aproveButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
deleteButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
}

private void ActivatItemsMenu()
{
    // Ocultar Main Menu
    showItemsButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
    closeAppButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
    screenshotButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);

    // Mostrar Items Menu
    itemsOpenButton?.DOScale(Vector3.one, 0.5f);
    scrollView?.DOScale(Vector3.one, 0.3f);
    scrollView?.DOMoveY(300, 0.3f);
}

private void ActivateARPosition()
{
    // Ocultar Main Menu
    showItemsButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
    closeAppButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
    screenshotButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);

    // Ocultar Items Menu
    itemsOpenButton?.DOScale(Vector3.zero, 0.5f);
    scrollView?.DOScale(Vector3.zero, 0.3f);
    scrollView?.DOMoveY(180, 0.3f);

    // Mostrar AR Menu
    aproveButton?.DOScale(Vector3.one, 0.3f);
    deleteButton?.DOScale(Vector3.one, 0.3f);
}

#endregion
}

```

- ItemButtonManager

```
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;
using TMPro;

public class ItemButton : MonoBehaviour
{
    [Header("Item Data")]
    [SerializeField] private string itemName;
    [SerializeField] private string itemDescription;
    [SerializeField] private Sprite itemImage;
    [SerializeField] private GameObject item3DModel;

    [Header("UI References (World Space Canvas)")]
    public TextMeshProUGUI nameText;
    public TextMeshProUGUI descriptionText;
    public RawImage imageRenderer;

    [Header("AR Placement")]
    public Transform spawnParent; // Donde aparecerá el modelo 3D
    private ARInteractionsManager interactionsManager;

    #region Propiedades públicas (compatibles con DataManager)
    public string ItemName { get => itemName; set => itemName = value; }
    public string ItemDescription { get => itemDescription; set => itemDescription = value; }
    public Sprite ItemImage { get => itemImage; set => itemImage = value; }
    public GameObject Item3DModel { get => item3DModel; set => item3DModel = value; }
    #endregion

    private void Start()
    {
        // Mostrar datos en el Canvas
        if (nameText != null) nameText.text = itemName;
        if (descriptionText != null) descriptionText.text = itemDescription;

        if (imageRenderer != null && itemImage != null)
        {
            // Convertimos el Sprite a Texture2D antes de asignarlo a RawImage
            imageRenderer.texture = SpriteToTexture(itemImage);
        }

        interactionsManager = FindAnyObjectByType<ARInteractionsManager>();
    }

    // Método público para asignar al botón OnClick
    public void OnItemSelected()
    {
        GameManager.Instance.ARPosition();

        if (item3DModel != null && interactionsManager != null)
        {
            interactionsManager.SpawnItem(item3DModel);
        }
    }
}
```

```

    }
}

// Convierte un Sprite a Texture2D para mostrar en RawImage
private Texture2D SpriteToTexture(Sprite sprite)
{
    if (sprite == null) return null;

    Texture2D newTexture = new Texture2D(
        (int)sprite.rect.width,
        (int)sprite.rect.height
    );

    Color[] pixels = sprite.texture.GetPixels(
        (int)sprite.textureRect.x,
        (int)sprite.textureRect.y,
        (int)sprite.textureRect.width,
        (int)sprite.textureRect.height
    );

    newTexture.SetPixels(pixels);
    newTexture.Apply();
    return newTexture;
}
}

```

- Item

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

[CreateAssetMenu]
public class Item : ScriptableObject
{
    public string Name;
    public Texture2D Image;
    public string Description;
    public GameObject model3D;
}
```

- ARInteractionsManager

```

using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.XR.ARFoundation;
using UnityEngine.XR.ARSubsystems;

public class ARInteractionsManager : MonoBehaviour
{
    [Header("AR References")]
    [SerializeField] private Camera arCamera;
    private ARRaycastManager arRaycastManager;
    private List<ARRaycastHit> hits = new List<ARRaycastHit>();

    private GameObject currentItem; // Modelo 3D activo

    void Awake()
    {
        arRaycastManager = FindObjectOfType<ARRaycastManager>();
        if (arCamera == null)
        {
            arCamera = Camera.main;
        }
    }

    void Update()
    {
        // Solo para debug: resaltar posición de raycast en pantalla
        // No instanciamos nada aquí; la instancia se hace al presionar el botón
    }

    /// <summary>
    /// Llama ItemButton para instanciar un modelo 3D sobre la nube de puntos.
    /// </summary>
    public void SpawnItem(GameObject prefab)
    {
        if (prefab == null) return;

        Vector2 screenCenter = new Vector2(Screen.width / 2f, Screen.height / 2f);

        // Raycast sobre Feature Points
        if (arRaycastManager.Raycast(screenCenter, hits, TrackableType.PlaneWithinPolygon))
        {
            Pose hitPose = hits[0].pose;

            // Instancia el prefab en la posición del hit
            if (currentItem != null)
            {

```

```

        Destroy(currentItem); // eliminar el anterior si existía
    }

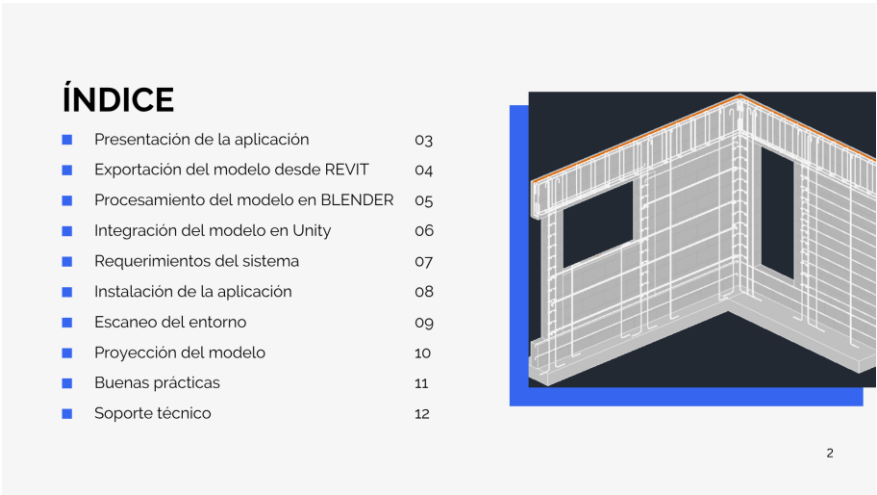
    currentItem = Instantiate(prefab, hitPose.position, hitPose.rotation);

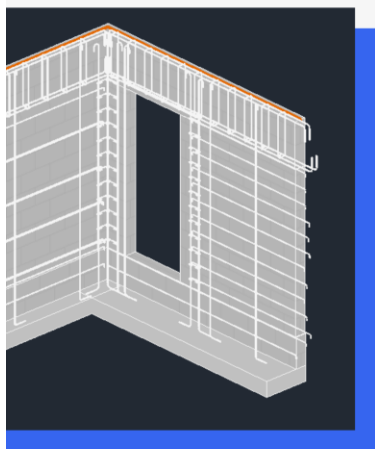
    // Ajustar escala si es necesario
    currentItem.transform.localScale = Vector3.one; // ajustar según tu modelo
    hitPose.position.y += 0.05f;
}
else
{
    Debug.Log("No se detectó ningún punto de la nube. Mueve la cámara.");
}
}

/// <summary>
/// Elimina el objeto instanciado
/// </summary>
public void DeleteItem()
{
    if (currentItem != null)
    {
        Destroy(currentItem);
        currentItem = null;
    }
}
}

```

Apéndice 4. Manual de Usuario para el uso de la herramienta





PRESENTACIÓN DE LA APLICACIÓN

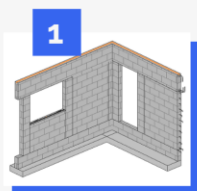
El presente manual de usuario describe el flujo completo para la utilización de la herramienta RA-BIM desarrollada para la proyección tridimensional de modelos constructivos en entornos reales mediante dispositivos móviles.

El documento abarca desde la exportación inicial del modelo BIM en Revit, su optimización geométrica en Blender, la incorporación del modelo en el entorno de Unity con AR Foundation, y finalmente su uso en campo mediante la aplicación móvil.

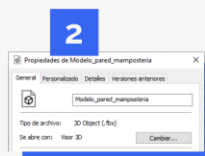
Su objetivo es garantizar un manejo adecuado del sistema por parte del personal técnico, facilitando la comprensión del modelo, la verificación de elementos constructivos y el control visual durante la fase de ejecución.

3

EXPORTACIÓN DEL MODELO DESDE REVIT



Realización de nuestro modelo, el número de polígonos es ideal que sea bajo, pero de no serlo, más adelante puede ser cambiado.



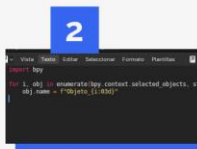
Dentro de la aplicación, nos vamos a Archivo - Exportar, y exportamos el modelo como FBX.

4

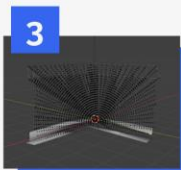
PROCESAMIENTO DEL MODELO EN BLENDER



Agregar el modificador de 'deformar', para la reducir el número de polígonos del modelo sin alterar su forma visual. Esto para facilitar la compilación y presentación del modelo en Unity.



Abrir el editor de texto, y agregar un código para renombrar cada pieza del modelo, diferenciar los nombres de estas piezas facilita la lectura del modelo a la hora de la compilación.



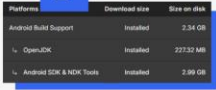
Por último, centralizar nuestro modelo para su visualización a la hora de ser proyectado.

El modelo puede, o no, ser cambiado en Blender antes de ser llevado a Unity, en este caso, se le retiraron las paredes.

5

INTEGRACIÓN DEL MODELO EN UNITY

1



Instalar los módulos necesarios para la plataforma a la que vamos a lanzar el programa, en este caso, Android.

2



Crear un nuevo proyecto utilizando el Template de AR Mobile.

3



Arrastrar los modelos a la carpeta de prefabs para su visualización.

4



Por último, ingresar los prefabs en el spawner.

6

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Dispositivo compatible:

Sistema operativo: Android 10 o superior.
 Compatibilidad con Google ARCore.
 Cámara trasera funcional.
 Memoria RAM recomendada: 4 GB o más.
 Almacenamiento disponible: al menos 200 MB.

Condiciones del entorno:

Iluminación natural moderada.
 Superficies con textura o elementos diferenciables.
 Espacio libre para caminar alrededor del modelo.

7

INSTALACIÓN DE LA APLICACIÓN

- 1** Solicite la versión actual del archivo de instalación APK al responsable técnico o al área de desarrollo.
- 2** Descargue o copie el archivo al dispositivo móvil.
- 3** En el dispositivo, active temporalmente la opción: Ajustes → Seguridad → Instalar aplicaciones desconocidas.
- 4** Ejecute el archivo APK y seleccione Instalar.
- 5** Una vez instalada, abra la aplicación desde el menú principal del dispositivo.

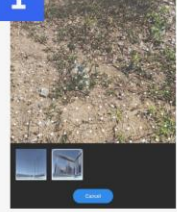
8

ESCANEEO DEL ENTORNO

- 1  Abra la aplicación. Conceda los permisos correspondientes.
- 2  Mueva el dispositivo suavemente para permitir la detección del plano.
- 3  Aparecerá un patrón visual indicando que la superficie es válida.

9

PROYECCIÓN DEL MODELO

- 1  Seleccione el menú principal para desplegar los modelos constructivos disponibles.
- 2  Escoja el modelo y coloquelo sobre el plano previamente visualizado.
- 3  Aparecerá un patrón visual indicando que la superficie es válida.

10

BUENAS PRÁCTICAS

- Compare ubicación de muros, cimentación y acero de refuerzo.
- Evalúe la continuidad de barras verticales y horizontales.
- Verifique alineaciones, dimensiones aproximadas y posibles inconsistencias visuales.
- Documente observaciones mediante capturas.
- Verifique que el dispositivo es compatible con los servicios de Google Play para RA

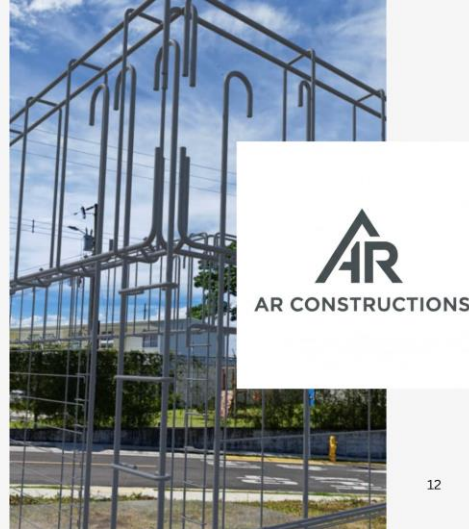


11

Soporte técnico:

Jazmín Araya
jazminjulianaar@estudiantec.cr
(+506) 8665-42-94

Jesús Sandí
jesuscastillo1205@gmail.com
(+506) 8987-25-69



Anexos

Anexo 1. Ficha Técnica de Caso de Aplicación RA–BIM N°2: BIMxAR: BIM-Empowered Augmented Reality for Learning Architectural Representations

Título del caso / Estudio:		
BIMxAR: BIM-Empowered Augmented Reality for Learning Architectural Representations		
Autores y año: W. Yan, Z. Ashour et al.		2022
Fuente: Department of Architecture Texas A&M University College Station		
Objetivo del estudio:	Examinar y evaluar un prototipo de sistema de Realidad Aumentada (BIMxAR) diseñado para mejorar la comprensión de representaciones arquitectónicas en sección, mediante la integración de RA, modelos BIM y edificios físicos, y analizar su efecto en las habilidades espaciales de los estudiantes al interactuar con vistas 3D complejas y configuraciones de materiales en un entorno físico.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Prototipo orientado a educación y aprendizaje (mejorar comprensión de representaciones arquitectónicas y vistas de sección) y a la alineación a escala de modelos BIM con edificios reales. Se probó con usuarios (estudiantes) en edificios existentes.	
Tecnologías empleadas:	Vuforia Model Targets	3D scanning
	C#	Unity
Resultados principales:	Se desarrolló y validó un método de registro (DL-3S-BIM) que combina detección basada en modelo 3D y escaneo para mejorar la alineación edificio-modelo. En estudios pilotos los estudiantes mostraron mejoras en la comprensión espacial y las funcionalidades demostraron potencial para enseñanza y verificación in situ.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:		
Necesidad de 3D-scans previos (coste/tiempo); limitaciones en espacios con geometría ambigua; exigencia de preparación de “targets” 3D y preprocesado del modelo.		
Aportes relevantes al proyecto RA-BIM:		
Demuestra que Vuforia Model Targets (basado en la geometría del objeto) mejora el registro a escala de edificio frente a marcadores planos.		

Ficha Técnica de Caso de Aplicación RA–BIM N°3: Improved Interaction of BIM Models for Historic Buildings Using Unity

Título del caso / Estudio:		
Improved Interaction of BIM Models for Historic Buildings Using Unity		
Autores y año: Y. P. Ma et al.		2022
Fuente: Department of Architecture Texas A&M University College Station.		
Objetivo del estudio:	Desarrollar un entorno interactivo visual integrado que permita la conservación, representación y gestión de información de edificios históricos, facilitando la recopilación de datos, la comunicación y la gestión de reparaciones, mediante la integración de modelos HBIM en Unity y servicios en la nube.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Proyecto aplicado a edificios históricos que buscó mejorar la interacción con modelos BIM para exploración/consulta (contexto educativo y de conservación). Puso énfasis en integrar información semántica con la geometría para consultas in situ.	
Tecnologías empleadas:	AR Foundation/ARKit/ARCore	Unity
	C#	
Resultados principales:	Prototipo que facilita la consulta interactiva de modelos BIM y vinculación de información no geométrica in situ; mejora de la usabilidad para técnicos y estudiantes en la interpretación de edificios históricos.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:		
Retos de performance con modelos a gran escala; necesidad de procesamiento previo del modelo y de gestión de semántica externa.		
Aportes relevantes al proyecto RA-BIM:		
Buen ejemplo de cómo mapear y presentar atributos semánticos de BIM dentro de Unity, útil si tu herramienta debe mostrar no solo geometría sino información de elementos.		

Ficha Técnica de Caso de Aplicación RA–BIM N°4: Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation

Título del caso / Estudio:		
Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation		
Autores y año: J. Song et al.		2023
Fuente:	Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea.	
Objetivo del estudio:	Desarrollar un sistema AR que permita que los modelos virtuales BIM se alineen y mantengan compatibilidad con los elementos físicos en entornos complejos de fabricación de semiconductores, aumentando la eficiencia y reduciendo errores.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Verificación de compatibilidad entre BIM y entorno físico en entornos industriales/fábrica (FAB), con pruebas en salas de máquinas y entornos de fabricación para validar el ajuste del modelo y la fijación de este en campo.	
Tecnologías empleadas:	ARCore/ARKit	SLAM
	Tracking	Unity
Resultados principales:	Desarrollo de un módulo de “fitting & fixing” que combina SLAM + detección por imagen + anclaje local para estabilizar la superposición de modelos BIM; pruebas en entornos reales mostraron buen desempeño de anclaje y fijación en tareas de verificación.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:		
Algunos casos requieren complementos (visionlib, Wikitude) para tracking de objetos que ARCore no soporta nativamente; condiciones con movimientos rápidos o texturas pobres aún afectan el anclaje; la solución exige preconfiguración (marcadores QR en pruebas).		
Aportes relevantes al proyecto RA-BIM:		
Referencia directa para usar AR Foundation en lugar (o junto) a Vuforia cuando la meta sea multiplataforma (iOS/Android) y se requiera SLAM robusto.		

Título del caso / Estudio:		
Realidad aumentada aplicada a la construcción		
Autores y año: Coss Henning, O. D.		2017
Fuente: Universitat Politècnica de Catalunya.		
Objetivo del estudio:	Desarrollar y evaluar la aplicación de la Realidad Aumentada (RA) integrada con BIM, utilizando Revit, Unity y Vuforia, para mejorar la visualización y planificación de proyectos de construcción, facilitando la toma de decisiones a escala real y la familiarización de los profesionales con recorridos virtuales e interactivos en el sector AEC mediante dispositivos como Microsoft HoloLens.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	El estudio se desarrolla en el ámbito de la construcción y el sector AEC (Architecture, Engineering and Construction). Su propósito es demostrar cómo la Realidad Aumentada (RA) puede conciliar el mundo físico con el digital, facilitando a ingenieros y arquitectos la visualización de sus proyectos a escala real.	
Tecnologías empleadas:	REVIT	Unity
	Vuforia	HoloLens
Resultados principales:	La división en dos casos de uso mostró que es posible familiarizar a los usuarios con la tecnología y al mismo tiempo aplicarla en entornos reales de construcción usando HoloLens.	
Limitaciones identificadas respecto al proyecto RA-BIM:		
La experiencia depende de la calidad del marcador y la cámara, lo que puede afectar la precisión de la RA. No se mencionan métricas cuantitativas sobre mejora en la eficiencia o reducción de errores, por lo que los resultados son cualitativos y exploratorios.		
Aportes relevantes al proyecto RA-BIM:		
Aporta bases metodológicas para desarrollar una herramienta RA-BIM accesible, interoperable y aplicable en distintos niveles tecnológicos dentro del sector construcción.		

Ficha Técnica de Caso de Aplicación RA–BIM N°6: Realidad Aumentada como herramienta didáctica en geometría 3D

Título del caso / Estudio:		
Realidad Aumentada como herramienta didáctica en geometría 3D		
Autores y año:	Isidro Gómez-Vargas, Ricardo Medel-Esquivel, Ricardo García-Salcedo	2018
Fuente:	Unidad Legaria del Instituto Politécnico Nacional	
Objetivo del estudio:	Se investigaron las posibilidades que ofrece la Realidad Aumentada como herramienta didáctica y se propone que un tema idóneo para emplearla es la geometría.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Con base en las investigaciones se propone el desarrollo de una aplicación móvil prototipo usando las herramientas gratuitas Unity 3D y Vuforia.	
Tecnologías empleadas:	Unity	Vuforia
Resultados principales:	No son necesarios equipos costosos para desarrollar e implementar las aplicaciones didácticas de RA. Es posible que cualquier persona con conocimientos básicos de programación orientada a objetos pueda hacer los scripts de animaciones sencilla.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:	No brinda una explicación detallada sobre el desarrollo de la herramienta.	
Aportes relevantes para el proyecto RA–BIM:	Utiliza los mismos motores de desarrollo en los que se enfoca el proyecto.	

Ficha Técnica de Caso de Aplicación RA–BIM N°7: Realidad aumentada con Unity y Vuforia para mejorar la experiencia educativa

Título del caso / Estudio:		
Realidad aumentada con Unity y Vuforia para mejorar la experiencia educativa		
Autores y año: Quisaguano Collaguazo et al		2024
Fuente: Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação.		
Objetivo del estudio:	Desarrolla un prototipo con RA mediante Unity y Vuforia para contribuir en la experiencia educativa de una escuela de Quito, Ecuador.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Se aplicó la metodología Kanban para gestionar el desarrollo del prototipo, definiendo las fases “por hacer”, “en proceso”, “en revisión” y “completado”.	
Tecnologías empleadas:	Unity	Vuforia
Resultados principales:	Unity tiene la capacidad de generar apps móviles para iOS.	
	Esta modalidad tecnológica va ganando espacio en el ámbito de la educación, salud e ingeniería por su versatilidad de US.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:		
No está aplicado al contexto de la construcción.		
Aportes relevantes para el proyecto RA-BIM:		
Da una descripción más general sobre la generación de esta herramienta.		
Brinda un contexto desde otra perspectiva, la educación.		

Título del caso / Estudio:		
Realidad aumentada utilizando Unity		
Autores y año:	Guzman Paredes, Yomaira	2022
Fuente:	Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, Facultad de Ingenierías, Ingeniería de Sistemas.	
Objetivo del estudio:	Desarrollar las competencias en el uso y la aplicación de la realidad aumentada en distintos escenarios.	
Contexto / Etapa del proceso constructivo:	Describe cómo crear un proyecto de RA en Unity y cómo generar marcadores en Vuforia para su integración. Aunque la aplicación concreta está orientada al entretenimiento (uso de la baraja española en 3D), se explica el flujo técnico.	
Tecnologías empleadas:	Unity	Vuforia
Resultados principales:	Desarrollar proyecto de realidad aumentada utilizando Unity Realizar impresión en 3D del modelo creado para utilizar como prototipo y como marcador.	
Limitaciones identificadas respecto el proyecto RA-BIM:	No se encuentra enfocado a la construcción.	
Aportes relevantes para el proyecto RA-BIM:	Desarrollo paso a paso para la herramienta de una RA.	

Anexo 2. Scripts base del template AR Mobile de Unity

- ARFeatheredPlaneMeshVisualizerCompanion

```
using
UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Utilities.Tweenables.P
rimitives;
```

```
namespace
```

```
UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Samples.ARStarterAss
ets
{
```

```
    /// <summary>
```

```
    /// Performs additional visual operations on the
    ARFeatheredPlane mesh, such as animated alpha
    fading.
```

```
    /// </summary>
```

```
    [RequireComponent(typeof(MeshRenderer))]
```

```
    public class
```

```
ARFeatheredPlaneMeshVisualizerCompanion :
MonoBehaviour
```

```
    {
```

```
        [Tooltip("Renderer component on the
        ARFeatheredPlane prefab. Used to fetch the material to
        fade in/out.")]
```

```
        [SerializeField]
```

```
        Renderer m_PlaneRenderer;
```

```
    /// <summary>
```

```
    /// The Renderer component on the
    ARFeatheredPlane prefab. Used to fetch the material to
    fade in/out.
```

```
    /// </summary>
```

```
    public Renderer planeRenderer
```

```
    {
```

```
        get => m_PlaneRenderer;
```

```
        set => m_PlaneRenderer = value;
```

```
    }
```

```
        [Tooltip("Fade in/out speed multiplier applied
        during the alpha tweening. The lower the value, the
        slower it works. A value of 1 is full speed (1 second).")]
```

```
        [Range(0.1f, 1.0f)]
```

```
        [SerializeField]
```

```
        float m_FadeSpeed = 1f;
```

```
    /// <summary>
```

```
    /// Fade in/out speed multiplier applied during the
    alpha tweening.
```

```
    /// The lower the value, the slower it works. A value
    of 1 is full speed (1 second).
```

```
    /// </summary>
```

```
    public float fadeSpeed
```

```
    {
```

```
        get => m_FadeSpeed;
```

```
        set => m_FadeSpeed = value;
```

```
    }
```

```
    int m_ShaderAlphaPropertyID;
```

```
    float m_SurfaceVisualAlpha = 1f;
```

```
    float m_TweenProgress;
```

```
    Material m_PlaneMaterial;
```

```
#pragma warning disable CS0618 // Type or member is
obsolete -- affordance system to be replaced in a future
XRI version
```

```
    readonly FloatTweenableVariable
```

```
m_AlphaTweenableVariable = new
```

```
FloatTweenableVariable();
```

```
#pragma warning restore CS0618
```

```
    /// <summary>
```

```
    /// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
```

```
    /// </summary>
```

```
    void Awake()
```

```
    {
```

```
        m_ShaderAlphaPropertyID =
```

```
Shader.PropertyToID("_PlaneAlpha");
```

```
        m_PlaneMaterial = m_PlaneRenderer.material;
```

```
        visualizeSurfaces = true;
```

```
    }
```

```
    /// <summary>
```

```
    /// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
```

```
    /// </summary>
```

```
    void OnDestroy()
```

```
    {
```

```
        m_AlphaTweenableVariable.Dispose();
```

```
    }
```

```
    /// <summary>
```

```
    /// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
```

```
    /// </summary>
```

```
    void Update()
```

```
    {
```

```
        m_AlphaTweenableVariable.HandleTween(m_TweenPro
gress);
```

```
        m_TweenProgress += Time.unscaledDeltaTime *
```

```
m_FadeSpeed;
```

```
        m_SurfaceVisualAlpha =
```

```
m_AlphaTweenableVariable.Value;
```

```

m_PlaneMaterial.SetFloat(m_ShaderAlphaPropertyID,
m_SurfaceVisualAlpha);
    }

    /// <summary>
    /// Show plane surfaces if true, hide plane surfaces
if false
    /// </summary>
    public bool visualizeSurfaces
    {

```

```

        set
        {
            m_TweenProgress = 0f;
            m_AlphaTweenableVariable.target = value ?
1f : 0f;
            m_AlphaTweenableVariable.HandleTween(0f);
        }
    }
}

```

- ARTemplateMenuManager

```
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.EventSystems;
using UnityEngine.InputSystem;
using UnityEngine.UI;
using UnityEngine.XR.ARFoundation;
using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit;
using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Inputs.Readers;
using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Interactors;
using
UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Samples.ARStarterAssets;
using
UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Samples.StarterAssets;
```

```
/// <summary>
/// Handles dismissing the object menu when clicking
out the UI bounds, and showing the
/// menu again when the create menu button is clicked
after dismissal. Manages object deletion in the AR
demo scene,
/// and also handles the toggling between the object
creation menu button and the delete button.
/// </summary>
```

```
public class ARTemplateMenuManager :
MonoBehaviour
{
```

```
    [SerializeField]
    [Tooltip("Button that opens the create menu.")]
    Button m_CreateButton;
```

```
    /// <summary>
    /// Button that opens the create menu.
    /// </summary>
```

```
    public Button createButton
    {
        get => m_CreateButton;
        set => m_CreateButton = value;
    }
```

```
    [SerializeField]
    [Tooltip("Button that deletes a selected object.")]
    Button m_DeleteButton;
```

```
    /// <summary>
    /// Button that deletes a selected object.
    /// </summary>
```

```
    public Button deleteButton
    {
        get => m_DeleteButton;
```

```
        set => m_DeleteButton = value;
    }
```

```
    [SerializeField]
    [Tooltip("The menu with all the creatable objects.")]
    GameObject m_ObjectMenu;
```

```
    /// <summary>
    /// The menu with all the creatable objects.
    /// </summary>
```

```
    public GameObject objectMenu
    {
        get => m_ObjectMenu;
        set => m_ObjectMenu = value;
    }
```

```
    [SerializeField]
    [Tooltip("The modal with debug options.")]
    GameObject m_ModalMenu;
```

```
    /// <summary>
    /// The modal with debug options.
    /// </summary>
```

```
    public GameObject modalMenu
    {
        get => m_ModalMenu;
        set => m_ModalMenu = value;
    }
```

```
    [SerializeField]
    [Tooltip("The animator for the object creation
menu.")]
    Animator m_ObjectMenuAnimator;
```

```
    /// <summary>
    /// The animator for the object creation menu.
    /// </summary>
```

```
    public Animator objectMenuAnimator
    {
        get => m_ObjectMenuAnimator;
        set => m_ObjectMenuAnimator = value;
    }
```

```
    [SerializeField]
    [Tooltip("The object spawner component in charge of
spawning new objects.")]
    ObjectSpawner m_ObjectSpawner;
```

```
    /// <summary>
    /// The object spawner component in charge of
spawning new objects.
```

```

    /// </summary>
    public ObjectSpawner objectSpawner
    {
        get => m_ObjectSpawner;
        set => m_ObjectSpawner = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("Button that closes the object creation
menu.")]
    Button m_CancelButton;

    /// <summary>
    /// Button that closes the object creation menu.
    /// </summary>
    public Button cancelButton
    {
        get => m_CancelButton;
        set => m_CancelButton = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("The interaction group for the AR demo
scene.")]
    XRInteractionGroup m_InteractionGroup;

    /// <summary>
    /// The interaction group for the AR demo scene.
    /// </summary>
    public XRInteractionGroup interactionGroup
    {
        get => m_InteractionGroup;
        set => m_InteractionGroup = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("The slider for activating plane debug
visuals.")]
    DebugSlider m_DebugPlaneSlider;

    /// <summary>
    /// The slider for activating plane debug visuals.
    /// </summary>
    public DebugSlider debugPlaneSlider
    {
        get => m_DebugPlaneSlider;
        set => m_DebugPlaneSlider = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("The plane prefab with shadows and debug
visuals.")]
    GameObject m_DebugPlane;

```

```

    /// <summary>
    /// The plane prefab with shadows and debug visuals.
    /// </summary>
    public GameObject debugPlane
    {
        get => m_DebugPlane;
        set => m_DebugPlane = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("The plane manager in the AR demo
scene.")]
    ARPlaneManager m_PlaneManager;

    /// <summary>
    /// The plane manager in the AR demo scene.
    /// </summary>
    public ARPlaneManager planeManager
    {
        get => m_PlaneManager;
        set => m_PlaneManager = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("The AR debug menu.")]
    ARDebugMenu m_DebugMenu;

    /// <summary>
    /// The AR debug menu.
    /// </summary>
    public ARDebugMenu debugMenu
    {
        get => m_DebugMenu;
        set => m_DebugMenu = value;
    }

    [SerializeField]
    [Tooltip("The slider for activating the debug menu.")]
    DebugSlider m_DebugMenuSlider;

    /// <summary>
    /// The slider for activating the debug menu.
    /// </summary>
    public DebugSlider debugMenuSlider
    {
        get => m_DebugMenuSlider;
        set => m_DebugMenuSlider = value;
    }

    [SerializeField]

```

```

XRInputValueReader<Vector2>
m_TapStartPositionInput = new
XRInputValueReader<Vector2>("Tap Start Position");

/// <summary>
/// Input to use for the screen tap start position.
/// </summary>
/// <seealso
cref="TouchscreenGestureInputController.tapStartPosition"/>
public XRInputValueReader<Vector2>
tapStartPositionInput
{
    get => m_TapStartPositionInput;
    set => XRInputReaderUtility.SetInputProperty(ref
m_TapStartPositionInput, value, this);
}

[SerializeField]
XRInputValueReader<Vector2>
m_DragCurrentPositionInput = new
XRInputValueReader<Vector2>("Drag Current
Position");

/// <summary>
/// Input to use for the screen tap start position.
/// </summary>
/// <seealso
cref="TouchscreenGestureInputController.dragCurrentP
osition"/>
public XRInputValueReader<Vector2>
dragCurrentPositionInput
{
    get => m_DragCurrentPositionInput;
    set => XRInputReaderUtility.SetInputProperty(ref
m_DragCurrentPositionInput, value, this);
}

bool m_IsPointerOverUI;
bool m_ShowObjectMenu;
bool m_ShowOptionsModal;
bool m_InitializingDebugMenu;
Vector2 m_ObjectButtonOffset = Vector2.zero;
Vector2 m_ObjectMenuOffset = Vector2.zero;
readonly
List<ARFeatheredPlaneMeshVisualizerCompanion>
featheredPlaneMeshVisualizerCompanions = new
List<ARFeatheredPlaneMeshVisualizerCompanion>();

/// <summary>
/// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
/// </summary>
void OnEnable()

```

```

{
    m_CreateButton.onClick.AddListener>ShowMenu);
    m_CancelButton.onClick.AddListener(HideMenu);

m_DeleteButton.onClick.AddListener>DeleteFocusedObj
ect);
    m_PlaneManager.planesChanged +=
OnPlaneChanged;
}

/// <summary>
/// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
/// </summary>
void OnDisable()
{
    m_ShowObjectMenu = false;

m_CreateButton.onClick.RemoveListener>ShowMenu);
m_CancelButton.onClick.RemoveListener(HideMenu);
m_DeleteButton.onClick.RemoveListener>DeleteFocused
Object);
    m_PlaneManager.planesChanged -=
OnPlaneChanged;
}

/// <summary>
/// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
/// </summary>
void Start()
{
    // Auto turn on/off debug menu. We want it
initially active so it calls into 'Start', which will
// allow us to move the menu properties later if
the debug menu is turned on.
    m_DebugMenu.gameObject.SetActive(true);
    m_InitializingDebugMenu = true;

InitializeDebugMenuOffsets();
HideMenu();
m_PlaneManager.planePrefab = m_DebugPlane;
}

/// <summary>
/// See <see cref="MonoBehaviour"/>.
/// </summary>
void Update()
{
    if (m_InitializingDebugMenu)
    {
        m_DebugMenu.gameObject.SetActive(false);
        m_InitializingDebugMenu = false;
    }
}

```

```

    }

    if (m_ShowObjectMenu || m_ShowOptionsModal)
    {
        if (!m_IsPointerOverUI &&
(m_TapStartPositionInput.TryReadValue(out _) ||
m_DragCurrentPositionInput.TryReadValue(out _)))
        {
            if (m_ShowObjectMenu)
                HideMenu();

            if (m_ShowOptionsModal)
                m_ModalMenu.SetActive(false);
        }

        if (m_ShowObjectMenu)
        {
            m_DeleteButton.gameObject.SetActive(false);
        }
        else
        {
            m_DeleteButton.gameObject.SetActive(m_InteractionGroup?.focusInteractable != null);
        }

        m_IsPointerOverUI = EventSystem.current != null &&
EventSystem.current.IsPointerOverGameObject(-1);
    }
    else
    {
        m_IsPointerOverUI = false;
        m_CreateButton.gameObject.SetActive(true);

        m_DeleteButton.gameObject.SetActive(m_InteractionGroup?.focusInteractable != null);
    }

    if (!m_IsPointerOverUI && m_ShowOptionsModal)
    {
        m_IsPointerOverUI = EventSystem.current != null &&
EventSystem.current.IsPointerOverGameObject(-1);
    }
}

/// <summary>
/// Set the index of the object in the list on the
ObjectSpawner to a specific value.
/// This is effectively an override of the default
behavior or randomly spawning an object.
/// </summary>

```

```

    /// <param name="objectIndex">The index in the
array of the object to spawn with the
ObjectSpawner</param>
    public void SetObjectToSpawn(int objectIndex)
    {
        if (m_ObjectSpawner == null)
        {
            Debug.LogWarning("Object Spawner not
configured correctly: no ObjectSpawner set.");
        }
        else
        {
            if (m_ObjectSpawner.objectPrefabs.Count >
objectIndex)
            {
                m_ObjectSpawner.spawnOptionIndex =
objectIndex;
            }
            else
            {
                Debug.LogWarning("Object Spawner not
configured correctly: object index larger than number
of Object Prefabs.");
            }
        }

        HideMenu();
    }

    void ShowMenu()
    {
        m_ShowObjectMenu = true;
        m_ObjectMenu.SetActive(true);
        if (!m_ObjectMenuAnimator.GetBool("Show"))
        {
            m_ObjectMenuAnimator.SetBool("Show", true);
        }
        AdjustARDebugMenuPosition();
    }

    /// <summary>
    /// Shows or hides the menu modal when the options
button is clicked.
    /// </summary>
    public void ShowHideModal()
    {
        if (m_ModalMenu.activeSelf)
        {
            m_ShowOptionsModal = false;
            m_ModalMenu.SetActive(false);
        }
        else
        {

```

```

        m_ShowOptionsModal = true;
        m_ModalMenu.SetActive(true);
    }
}

/// <summary>
/// Shows or hides the plane debug visuals.
/// </summary>
public void ShowHideDebugPlane()
{
    if (m_DebugPlaneSlider.value == 1)
    {
        m_DebugPlaneSlider.value = 0;
        ChangePlaneVisibility(false);
    }
    else
    {
        m_DebugPlaneSlider.value = 1;
        ChangePlaneVisibility(true);
    }
}

/// <summary>
/// Shows or hides the AR debug menu.
/// </summary>
public void ShowHideDebugMenu()
{
    if (m_DebugMenu.gameObject.activeSelf)
    {
        m_DebugMenuSlider.value = 0;
        m_DebugMenu.gameObject.SetActive(false);
    }
    else
    {
        m_DebugMenuSlider.value = 1;
        m_DebugMenu.gameObject.SetActive(true);
        AdjustARDebugMenuPosition();
    }
}

/// <summary>
/// Clear all created objects in the scene.
/// </summary>
public void ClearAllObjects()
{
    foreach (Transform child in
m_ObjectSpawner.transform)
    {
        Destroy(child.gameObject);
    }
}

/// <summary>

```

```

/// Triggers hide animation for menu.
/// </summary>
public void HideMenu()
{
    m_ObjectMenuAnimator.SetBool("Show", false);
    m_ShowObjectMenu = false;
    AdjustARDebugMenuPosition();
}

void ChangePlaneVisibility(bool setVisible)
{
    var count =
featheredPlaneMeshVisualizerCompanions.Count;
    for (int i = 0; i < count; ++i)
    {
        featheredPlaneMeshVisualizerCompanions[i].visualizeSurfaces = setVisible;
    }
}

void DeleteFocusedObject()
{
    var currentFocusedObject =
m_InteractionGroup.focusInteractable;
    if (currentFocusedObject != null)
    {
        Destroy(currentFocusedObject.transform.gameObject);
    }
}

void InitializeDebugMenuOffsets()
{
    if
(m_CreateButton.TryGetComponent<RectTransform>(out var buttonRect))
        m_ObjectButtonOffset = new Vector2(0f,
buttonRect.anchoredPosition.y + buttonRect.rect.height
+ 10f);
    else
        m_ObjectButtonOffset = new Vector2(0f, 200f);

    if
(m_ObjectMenu.TryGetComponent<RectTransform>(out var menuRect))
        m_ObjectMenuOffset = new Vector2(0f,
menuRect.anchoredPosition.y + menuRect.rect.height +
10f);
    else
        m_ObjectMenuOffset = new Vector2(0f, 345f);
}

```

```

void AdjustARDebugMenuPosition()
{
    float screenWidthInInches = Screen.width /
Screen.dpi;

    if (screenWidthInInches < 5)
    {
        Vector2 menuOffset = m_ShowObjectMenu ?
m_ObjectMenuOffset : m_ObjectButtonOffset;

        if
(m_DebugMenu.toolbar.TryGetComponent<RectTransform>(out var rect))
        {
            rect.anchorMin = new Vector2(0.5f, 0);
            rect.anchorMax = new Vector2(0.5f, 0);
            rect.eulerAngles = new
Vector3(rect.eulerAngles.x, rect.eulerAngles.y, 90);
            rect.anchoredPosition = new Vector2(0, 20) +
menuOffset;
        }

        if
(m_DebugMenu.displayInfoMenuButton.TryGetComponent<RectTransform>(out var infoMenuButtonRect))
            infoMenuButtonRect.localEulerAngles = new
Vector3(infoMenuButtonRect.localEulerAngles.x,
infoMenuButtonRect.localEulerAngles.y, -90);

        if
(m_DebugMenu.displayConfigurationsMenuButton.TryG
etComponent<RectTransform>(out var
configurationsMenuButtonRect))

            configurationsMenuButtonRect.localEulerAngles = new
Vector3(configurationsMenuButtonRect.localEulerAngle
s.x, configurationsMenuButtonRect.localEulerAngles.y, -
90);

        if
(m_DebugMenu.displayCameraConfigurationsMenuButt
on.TryGetComponent<RectTransform>(out var
cameraConfigurationsMenuButtonRect))

            cameraConfigurationsMenuButtonRect.localEulerAngles
= new
Vector3(cameraConfigurationsMenuButtonRect.localEul
erAngles.x,
cameraConfigurationsMenuButtonRect.localEulerAngles
.y, -90);

        if
(m_DebugMenu.displayDebugOptionsMenuButton.TryG

```

```

etComponent<RectTransform>(out var
debugOptionsMenuButtonRect))

            debugOptionsMenuButtonRect.localEulerAngles = new
Vector3(debugOptionsMenuButtonRect.localEulerAngle
s.x, debugOptionsMenuButtonRect.localEulerAngles.y, -
90);

            if
(m_DebugMenu.infoMenu.TryGetComponent<RectTran
sform>(out var infoMenuRect))
            {
                infoMenuRect.anchorMin = new Vector2(0.5f,
0);
                infoMenuRect.anchorMax = new Vector2(0.5f,
0);
                infoMenuRect.pivot = new Vector2(0.5f, 0);
                infoMenuRect.anchoredPosition = new
Vector2(0, 150) + menuOffset;
            }

            if
(m_DebugMenu.configurationMenu.TryGetComponent
<RectTransform>(out var configurationsMenuRect))
            {
                configurationsMenuRect.anchorMin = new
Vector2(0.5f, 0);
                configurationsMenuRect.anchorMax = new
Vector2(0.5f, 0);
                configurationsMenuRect.pivot = new
Vector2(0.5f, 0);
                configurationsMenuRect.anchoredPosition =
new Vector2(0, 150) + menuOffset;
            }

            if
(m_DebugMenu.cameraConfigurationMenu.TryGetCom
ponent<RectTransform>(out var
cameraConfigurationsMenuRect))
            {
                cameraConfigurationsMenuRect.anchorMin =
new Vector2(0.5f, 0);
                cameraConfigurationsMenuRect.anchorMax =
new Vector2(0.5f, 0);
                cameraConfigurationsMenuRect.pivot = new
Vector2(0.5f, 0);

                cameraConfigurationsMenuRect.anchoredPosition =
new Vector2(0, 150) + menuOffset;
            }

```

```

        if
(m_DebugMenu.debugOptionsMenu.TryGetComponent
<RectTransform>(out var debugOptionsMenuRect))
        {
            debugOptionsMenuRect.anchorMin = new
Vector2(0.5f, 0);
            debugOptionsMenuRect.anchorMax = new
Vector2(0.5f, 0);
            debugOptionsMenuRect.pivot = new
Vector2(0.5f, 0);
            debugOptionsMenuRect.anchoredPosition =
new Vector2(0, 150) + menuOffset;
        }
    }
}

void OnPlaneChanged(ARPlanesChangedEventArgs
eventArgs)
{
    if (eventArgs.added.Count > 0)
    {
        foreach (var plane in eventArgs.added)
        {
            if
(plane.TryGetComponent<ARFeatheredPlaneMeshVisua
lizerCompanion>(out var visualizer))
            {
                featheredPlaneMeshVisualizerCompanions.Add(visualiz
er);
                visualizer.visualizeSurfaces =
(m_DebugPlaneSlider.value != 0);
            }
        }
    }

    if (eventArgs.removed.Count > 0)

```

```

    {
        foreach (var plane in eventArgs.removed)
        {
            if
(plane.TryGetComponent<ARFeatheredPlaneMeshVisua
lizerCompanion>(out var visualizer))

            featheredPlaneMeshVisualizerCompanions.Remove(visu
alizer);
        }
    }

    // Fallback if the counts do not match after an
update
    if (m_PlaneManager.trackables.count !=
featheredPlaneMeshVisualizerCompanions.Count)
    {
        featheredPlaneMeshVisualizerCompanions.Clear();
        foreach (var trackable in
m_PlaneManager.trackables)
        {
            if
(trackable.TryGetComponent<ARFeatheredPlaneMeshVi
sualizerCompanion>(out var visualizer))
            {
                featheredPlaneMeshVisualizerCompanions.Add(visualiz
er);
                visualizer.visualizeSurfaces =
(m_DebugPlaneSlider.value != 0);
            }
        }
    }
}

```

- GoalManager

```
using System;
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.InputSystem;
using
UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Samples.StarterAsset
s;

/// <summary>
/// Onboarding goal to be achieved as part of the <see
cref="GoalManager"/>.
/// </summary>
public struct Goal
{
    /// <summary>
    /// Goal state this goal represents.
    /// </summary>
    public GoalManager.OnboardingGoals CurrentGoal;

    /// <summary>
    /// This denotes whether a goal has been completed.
    /// </summary>
    public bool Completed;

    /// <summary>
    /// Creates a new Goal with the specified <see
cref="GoalManager.OnboardingGoals"/>.
    /// </summary>
    /// <param name="goal">The <see
cref="GoalManager.OnboardingGoals"/> state to
assign to this Goal.</param>
    public Goal(GoalManager.OnboardingGoals goal)
    {
        CurrentGoal = goal;
        Completed = false;
    }
}

/// <summary>
/// The GoalManager cycles through a list of Goals,
each representing
/// an <see cref="GoalManager.OnboardingGoals"/>
state to be completed by the user.
/// </summary>
public class GoalManager : MonoBehaviour
{
    /// <summary>
    /// State representation for the onboarding goals for
the GoalManager.
    /// </summary>
```

```
public enum OnboardingGoals
{
    /// <summary>
    /// Current empty scene
    /// </summary>
    Empty,

    /// <summary>
    /// Find/scan for AR surfaces
    /// </summary>
    FindSurfaces,

    /// <summary>
    /// Tap a surface to spawn an object
    /// </summary>
    TapSurface,

    /// <summary>
    /// Show movement hints
    /// </summary>
    Hints,

    /// <summary>
    /// Show scale and rotate hints
    /// </summary>
    Scale
}

/// <summary>
/// Individual step instructions to show as part of a
goal.
/// </summary>
[Serializable]
public class Step
{
    /// <summary>
    /// The GameObject to enable and show the user
in order to complete the goal.
    /// </summary>
    [SerializeField]
    public GameObject stepObject;

    /// <summary>
    /// The text to display on the button shown in the
step instructions.
    /// </summary>
    [SerializeField]
    public string buttonText;

    /// <summary>
```

```

    /// This indicates whether to show an additional
    button to skip the current goal/step.
    /// </summary>
    [SerializeField]
    public bool includeSkipButton;
}

[Tooltip("List of Goals/Steps to complete as part of
the user onboarding.")]
[SerializeField]
List<Step> m_StepList = new List<Step>();

/// <summary>
/// List of Goals/Steps to complete as part of the user
onboarding.
/// </summary>
public List<Step> stepList
{
    get => m_StepList;
    set => m_StepList = value;
}

[Tooltip("Object Spawner used to detect whether the
spawning goal has been achieved.")]
[SerializeField]
ObjectSpawner m_ObjectSpawner;

/// <summary>
/// Object Spawner used to detect whether the
spawning goal has been achieved.
/// </summary>
public ObjectSpawner objectSpawner
{
    get => m_ObjectSpawner;
    set => m_ObjectSpawner = value;
}

[Tooltip("The greeting prompt Game Object to show
when onboarding begins.")]
[SerializeField]
GameObject m_GreetingPrompt;

/// <summary>
/// The greeting prompt Game Object to show when
onboarding begins.
/// </summary>
public GameObject greetingPrompt
{
    get => m_GreetingPrompt;
    set => m_GreetingPrompt = value;
}

```

```

[Tooltip("The Options Button to enable once the
greeting prompt is dismissed.")]
[SerializeField]
GameObject m_OptionsButton;

/// <summary>
/// The Options Button to enable once the greeting
prompt is dismissed.
/// </summary>
public GameObject optionsButton
{
    get => m_OptionsButton;
    set => m_OptionsButton = value;
}

[Tooltip("The Create Button to enable once the
greeting prompt is dismissed.")]
[SerializeField]
GameObject m_CreateButton;

/// <summary>
/// The Create Button to enable once the greeting
prompt is dismissed.
/// </summary>
public GameObject createButton
{
    get => m_CreateButton;
    set => m_CreateButton = value;
}

[Tooltip("The AR Template Menu Manager object to
enable once the greeting prompt is dismissed.")]
[SerializeField]
ARTemplateMenuManager m_MenuManager;

/// <summary>
/// The AR Template Menu Manager object to enable
once the greeting prompt is dismissed.
/// </summary>
public ARTemplateMenuManager menuManager
{
    get => m_MenuManager;
    set => m_MenuManager = value;
}

const int
k_NumberOfSurfacesTappedToCompleteGoal = 1;

Queue<Goal> m_OnboardingGoals;
Coroutine m_CurrentCoroutine;
Goal m_CurrentGoal;
bool m_AllGoalsFinished;
int m_SurfacesTapped;

```

```

int m_CurrentGoalIndex = 0;

void Update()
{
    if (Pointer.current != null &&
        Pointer.current.press.wasPressedThisFrame &&
        !m_AllGoalsFinished && (m_CurrentGoal.CurrentGoal
            == OnboardingGoals.FindSurfaces ||
            m_CurrentGoal.CurrentGoal == OnboardingGoals.Hints
            || m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
            OnboardingGoals.Scale))
    {
        if (m_CurrentCoroutine != null)
        {
            StopCoroutine(m_CurrentCoroutine);
        }
        CompleteGoal();
    }
}

void CompleteGoal()
{
    if (m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
        OnboardingGoals.TapSurface)
        m_ObjectSpawner.objectSpawned -=
        OnObjectSpawned;

    m_CurrentGoal.Completed = true;
    m_CurrentGoalIndex++;
    if (m_OnboardingGoals.Count > 0)
    {
        m_CurrentGoal =
        m_OnboardingGoals.Dequeue();
        m_StepList[m_CurrentGoalIndex -
        1].stepObject.SetActive(false);

        m_StepList[m_CurrentGoalIndex].stepObject.SetActive(true);
    }
    else
    {
        m_StepList[m_CurrentGoalIndex -
        1].stepObject.SetActive(false);
        m_AllGoalsFinished = true;
        return;
    }

    PreprocessGoal();
}

void PreprocessGoal()
{

```

```

        if (m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
            OnboardingGoals.FindSurfaces)
        {
            m_CurrentCoroutine =
            StartCoroutine(WaitUntilNextCard(5f));
        }
        else if (m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
            OnboardingGoals.Hints)
        {
            m_CurrentCoroutine =
            StartCoroutine(WaitUntilNextCard(6f));
        }
        else if (m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
            OnboardingGoals.Scale)
        {
            m_CurrentCoroutine =
            StartCoroutine(WaitUntilNextCard(8f));
        }
        else if (m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
            OnboardingGoals.TapSurface)
        {
            m_SurfacesTapped = 0;
            m_ObjectSpawner.objectSpawned +=
            OnObjectSpawned;
        }
    }

    /// <summary>
    /// Tells the Goal Manager to wait for a specific
    /// number of seconds before completing
    /// the goal and showing the next card.
    /// </summary>
    /// <param name="seconds">The number of
    /// seconds to wait before showing the card.</param>
    /// <returns>Returns an IEnumerator for the current
    /// coroutine running.</returns>
    public IEnumerator WaitUntilNextCard(float seconds)
    {
        yield return new WaitForSeconds(seconds);

        if (!Pointer.current.press.wasPressedThisFrame)
        {
            m_CurrentCoroutine = null;
            CompleteGoal();
        }
    }

    /// <summary>
    /// Forces the completion of the current goal and
    /// moves to the next.
    /// </summary>
    public void ForceCompleteGoal()
    {

```

```

        CompleteGoal();
    }

    void OnObjectSpawned(GameObject
spawnedObject)
    {
        m_SurfacesTapped++;
        if (m_CurrentGoal.CurrentGoal ==
OnboardingGoals.TapSurface && m_SurfacesTapped
>= k_NumberOfSurfacesTappedToCompleteGoal)
        {
            CompleteGoal();
        }
    }

    /// <summary>
    /// Triggers a restart of the onboarding/coaching
process.
    /// </summary>
    public void StartCoaching()
    {
        if (m_OnboardingGoals != null)
        {
            m_OnboardingGoals.Clear();
        }

        m_OnboardingGoals = new Queue<Goal>();

        if (!m_AllGoalsFinished)
        {
            var findSurfaceGoal = new
Goal(OnboardingGoals.FindSurfaces);
            m_OnboardingGoals.Enqueue(findSurfaceGoal);
        }

        int startingStep = m_AllGoalsFinished ? 1 : 0;

```

```

        var tapSurfaceGoal = new
Goal(OnboardingGoals.TapSurface);
        var translateHintsGoal = new
Goal(OnboardingGoals.Hints);
        var scaleHintsGoal = new
Goal(OnboardingGoals.Scale);
        var rotateHintsGoal = new
Goal(OnboardingGoals.Hints);

        m_OnboardingGoals.Enqueue(tapSurfaceGoal);
        m_OnboardingGoals.Enqueue(translateHintsGoal);
        m_OnboardingGoals.Enqueue(scaleHintsGoal);
        m_OnboardingGoals.Enqueue(rotateHintsGoal);

        m_CurrentGoal = m_OnboardingGoals.Dequeue();
        m_AllGoalsFinished = false;
        m_CurrentGoalIndex = startingStep;

        m_GreetingPrompt.SetActive(false);
        m_OptionsButton.SetActive(true);
        m_CreateButton.SetActive(true);
        m_MenuManager.enabled = true;

        for (int i = startingStep; i < m_StepList.Count; i++)
        {
            if (i == startingStep)
            {
                m_StepList[i].stepObject.SetActive(true);
                PreprocessGoal();
            }
            else
            {
                m_StepList[i].stepObject.SetActive(false);
            }
        }
    }
}

```

Anexo 3. Celulares que cuentan con los Servicios de Google Play para RA

Nexus 5X	Huawei nova 4	Moto G Pro
Nexus 6P	Honor View 20	Moto G9 Plus
Pixel	Honor 8X	Edge
Pixel XL	Honor View 10 Lite	Edge+
Pixel 2	Huawei Mate 20X	Moto G 5G
Pixel 2 XL	Huawei Porsche Design Mate 20	Motorola One Fusion
Pixel 3	RS	Samsung Galaxy A22 5G
Pixel 3 XL	Huawei Y9 2019	Samsung Galaxy A72
Pixel 3a	Moto G 50	Samsung Galaxy Quantum2
Pixel 3a XL	Moto G100	Samsung Galaxy Tab S7+
Pixel 4	Moto G Power 2021	Samsung Galaxy A32 5G
Pixel 4 XL	Moto G9 Power	Samsung Galaxy A42 5G
Pixel 4a	moto g power	Samsung Galaxy F41
Pixel 4a 5G	motorola edge	Samsung Galaxy S21
Pixel 5	motorola edge plus	Samsung Galaxy S21+
Pixel 5a	moto g ⁷ play	Samsung Galaxy S21 Ultra
Pixel 6	moto g ⁸ play	Samsung Galaxy M20
Pixel 6 Pro	moto g ⁸ plus	Samsung Galaxy A31
Nokia 5.4	moto g ⁸ power	Samsung Galaxy A41
Nokia 8	moto g ⁸ power lite	Samsung Galaxy Tab S6 Lite
Nokia 6.1	moto g stylus	Samsung Galaxy Tab S7
Nokia 6.1 Plus	One hyper	Samsung Galaxy Tab S7+
Nokia 7 Plus	One macro	Samsung Galaxy M31
Nokia 7.1	One Vision	Samsung Galaxy M21
Nokia 8 Sirocco	One	Samsung Galaxy A70s
Nokia 8.1	Moto Z4	Samsung Galaxy A71
Nokia 8.3 5G	Moto G5S Plus	Samsung Galaxy Note10 5G
Nokia 3.4	Moto G6	Samsung Galaxy Note10+ 5G
Huawei P30	Moto G6 Plus	Samsung Galaxy Note10 Lite
Huawei P30 Pro	Moto Z2 Force	Samsung Galaxy S10 Lite
Huawei Mate 20	Moto Z3 Play	Samsung Galaxy XCover Pro
Huawei Mate 20 Pro	Moto X4	Samsung Galaxy Z Flip
Huawei P20	Moto G7	Samsung Galaxy Note10+
Huawei P20 Pro	Moto G7 Plus	Samsung Galaxy Note10
Huawei Porsche Design Mate	Moto G7 Power	Samsung Galaxy S10
RS	Moto G7 Play	Samsung Galaxy S10+
Huawei nova 3	Moto G8 Power Lite	Samsung Galaxy S10e

Samsung Galaxy S10 5G	Samsung Galaxy A53 5G	Xiaomi Redmi Note 9 Pro Max
Samsung Galaxy A3 (2017)	Samsung Galaxy F23 5G	Xiaomi Mi 10T Pro
Samsung Galaxy A5 (2017)	Samsung Galaxy M23 5G	iPhone 13
Samsung Galaxy A6 (2017)	Samsung Galaxy M33 5G	iPhone 13 mini
Samsung Galaxy A7 (2017)	Samsung Galaxy Tab A8	iPhone 13 Pro
Samsung Galaxy A8, Galaxy A8+ (2018)	Samsung Galaxy S21/S21+/S21 Ultra	iPhone 13 Pro Max
Samsung Galaxy A30	Samsung Galaxy S22/S22+/S22 Ultra	iPhone 12
Samsung Galaxy A50		iPhone 12 mini
Samsung Galaxy J5 (2017), Galaxy J5 Pro	Samsung Galaxy Z Flip/Z Flip 3	iPhone 12 Pro
Samsung Galaxy J7 (2017), Galaxy J7 Pro	Samsung Galaxy Z Fold / Z Fold 2 / Z Fold 3	iPhone 12 Pro Max
Samsung Galaxy Note8	Xiaomi Mi 11 Pro	iPad mini (6th Generation)
Samsung Galaxy Note9	Xiaomi Mi 11 Lite 5G	iPhone 12 Pro Max
Samsung Galaxy S7	Xiaomi Redmi Note 10	iPhone 12 Pro
Samsung Galaxy S7 edge	Xiaomi Redmi Note 10 Pro	iPhone 12
Samsung Galaxy S8	Xiaomi Mi 11	iPhone 12 Mini
Samsung Galaxy S8+	Xiaomi Redmi Note 9 5G	iPhone 11 Pro Max
Samsung Galaxy S9	Xiaomi Mi 10 Lite 5G	iPhone 11 Pro
Samsung Galaxy S9+	Xiaomi Mi 10i	iPhone XR
Samsung Galaxy A6	Xiaomi Redmi Note 8	iPhone XS Max
Samsung Galaxy Tab S3	Xiaomi Mi 9T	iPhone XS
Samsung Galaxy A20	Xiaomi Mi 9T Pro	iPhone X
Samsung Galaxy A20s	Xiaomi Mi 9	iPhone 8
Samsung Galaxy A30s	Xiaomi Mi 8	iPhone 8 Plus
Samsung Galaxy M31s	Xiaomi Mi 8 SE	iPhone 7
Samsung Galaxy Z Flip 5G	Xiaomi Mi Mix 2S	iPhone 7 Plus
Samsung Galaxy Note20	Xiaomi Mi Mix 3	iPhone 6S
Samsung Galaxy Note20 Ultra	Xiaomi Mi 10	iPhone 6S Plus
Samsung Galaxy A51	Xiaomi Mi 10 Lite 5G	iPhone SE
Samsung Galaxy A51 5G	Xiaomi Mi 10 / Pro	iPad
Samsung Galaxy A71 5G	Xiaomi Mi 10 Ultra	iPad Pro de 12,9"
Samsung Galaxy S20 FE	Xiaomi Poco X2	iPad Pro de 9,7"
Samsung Galaxy A20e	Xiaomi Redmi K30	iPad Pro de 10,5"
Samsung Samsung Galaxy Tab A7	Xiaomi Mi 9 Lite	iPad Pro de 11
Samsung Galaxy A23	Xiaomi Mi 10 Lite Zoom Edition	
Samsung Galaxy A33 5G	Xiaomi Mi Note 10	
	Xiaomi Redmi K30 Pro	
	Xiaomi POCO X3	