

**Realidad virtual para la formación técnica del sector palmicultor: desarrollo de un entorno
virtual de aprendizaje**

Yury Lizeth Mendoza Manzano

**Informe final
para opción de grado por práctica empresarial**

Director

Pedro Pablo Díaz Jaimes

Magister en Dirección y Gestión de Proyectos

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

2026

Contenido

Introducción	7
1. Realidad virtual para la formación técnica del sector palmicultor: desarrollo de un entorno virtual de aprendizaje.....	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Justificación	11
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivos específicos.....	14
2. Marco referencial	15
2.1 Marco teórico	15
2.1.1 Polinización artificial en palma de aceite.....	15
2.1.2 Punto óptimo de cosecha en palma de aceite	16
2.1.3 Entornos virtuales de aprendizaje (EVA).....	17
2.1.4 Entrenamientos inmersivos con realidad virtual	18
3. Método	22
4. Resultados	25
4.1 Caracterización de los estados fenológicos	25
4.2 Obtención y posprocesamiento de modelos 3D	27
4.3 Desarrollo del sistema de entrenamiento en Realidad Virtual	30
4.4 Evaluación y validación del entrenamiento inmersivo.....	33
6. Conclusiones	34
7. Apéndices.....	36
8. Referencias.....	37

Lista de tablas

Tabla 1. *Indicadores técnicos de los modelos generados* 27

Lista de figuras

Figura 1. <i>Estadios fenológicos para punto óptimo de cosecha en <i>Elaeis guineensis</i>.</i>	26
Figura 2. <i>Estadios fenológicos para punto óptimo de cosecha en híbrido OxG.</i>	26
Figura 3. <i>Estadios fenológicos para punto óptimo de cosecha en híbrido OxG.</i>	27
Figura 4. <i>Modelo 3D del racimo de palma de aceite obtenido mediante escaneo 3D y postproceso en Blender. Nota. Elaboración propia.</i>	29
Figura 5. <i>Modelo 3D de inflorescencia femenina de palma de aceite obtenido mediante escaneo 3D y postproceso en Blender. Nota. Elaboración propia.</i>	30
Figura 6. <i>Modelo 3D del racimo de palma de aceite obtenido mediante escaneo 3D y postproceso en Blender.</i>	30
Figura 7. <i>Diagrama de flujo de Entorno Virtual de Aprendizaje.</i>	32

Resumen

En el cultivo de palma de aceite, labores como la polinización artificial y la determinación del punto óptimo de cosecha requieren un alto nivel de precisión técnica, cuya ejecución depende en gran medida del criterio humano, generando variabilidad y pérdidas productivas; a esto se suma que la capacitación presencial tradicional depende de la estacionalidad biológica y las condiciones climáticas, lo que fragmenta los procesos formativos. Frente a esta situación, el presente proyecto tuvo como propósito desarrollar un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) basado en realidad virtual para el reconocimiento de los estados fenológicos asociados a la cosecha y la polinización artificial en palma de aceite. Para ello, se empleó un enfoque de investigación aplicada de carácter tecnológico, desarrollado en cuatro fases: caracterización de los estados fenológicos con base en literatura institucional y la escala BBCH; digitalización de estructuras reproductivas mediante escaneo 3D y posprocesamiento en Blender; desarrollo del sistema inmersivo en Unreal Engine 5; y diseño de un esquema de validación pretest-posttest. Como resultado, se caracterizaron los estadios fenológicos requeridos, se generaron 19 modelos tridimensionales optimizados y se construyó un EVA funcional con módulos de polinización artificial y punto óptimo de cosecha, ajustado a partir de retroalimentación exploratoria con usuarios. Estos hallazgos evidencian la viabilidad técnica y pedagógica de la realidad virtual como herramienta de capacitación agrícola, sentando las bases para la validación formal de su impacto sobre el aprendizaje.

Palabras clave: realidad virtual, palma de aceite, polinización artificial, entorno virtual de aprendizaje, punto óptimo de cosecha.

Abstract

In oil palm cultivation, tasks such as artificial pollination and determining the optimal harvest point require a high level of technical precision, and their execution depends largely on human judgment, generating variability and productivity losses; in addition, traditional in-person training depends on the crop's biological seasonality and changing weather conditions, which fragments the training process. In response to this situation, the present project aimed to develop a Virtual Learning Environment (VLE) based on virtual reality for the recognition of phenological stages associated with harvesting and artificial pollination in oil palm. To this end, an applied, technology-based research approach was employed, developed in four phases: characterization of phenological stages based on institutional literature and the BBCH scale; digitization of reproductive structures through 3D scanning and post-processing in Blender; development of the immersive system in Unreal Engine 5; and design of a pretest-posttest validation scheme. As a result, the required phenological stages were characterized, 19 optimized three-dimensional models were generated, and a functional VLE was built with modules for artificial pollination and optimal harvest point, refined based on exploratory feedback from users. These findings demonstrate the technical and pedagogical feasibility of virtual reality as an agricultural training tool, laying the groundwork for the formal validation of its impact on learning.

Keywords: virtual reality, oil palm, artificial pollination, virtual learning environment, optimal harvest point

Introducción

El cultivo de palma de aceite constituye una de las principales actividades agroindustriales en Colombia debido a su contribución al desarrollo económico, la generación de empleo y el suministro de materia prima para diferentes sectores productivos. En este contexto, la correcta ejecución de labores agrícolas como la polinización artificial y la cosecha en el momento adecuado resulta determinante para garantizar la productividad del cultivo, la calidad del aceite extraído y la sostenibilidad del sistema productivo [1].

No obstante, dichas labores presentan un alto grado de dependencia del criterio humano, lo cual genera variabilidad en su ejecución y posibles pérdidas productivas. Frente a esta problemática, la incorporación de herramientas tecnológicas y entornos virtuales de aprendizaje se proyecta como una alternativa innovadora para fortalecer los procesos de capacitación, estandarizar las labores en campo y mejorar la transferencia de conocimiento técnico en el sector palmicultor.

A nivel global, el avance de las tecnologías inmersivas, como la Realidad Virtual (VR), la Realidad Aumentada (AR) y los entornos interactivos tridimensionales, ha transformado los paradigmas de la capacitación técnica y la formación industrial [2]. Desde la perspectiva del aprendizaje experiencial, la literatura científica respalda que la simulación de entornos críticos permite a los operarios adquirir competencias procedimentales complejas de manera segura, reduciendo la curva de error y eliminando los riesgos físicos asociados al entrenamiento en escenarios reales. Diversos estudios demuestran que estos sistemas no solo incrementan la retención del conocimiento, sino que además favorecen el desarrollo de competencias técnicas y optimizan los procesos de formación frente a metodologías tradicionales [3].

En el contexto agroindustrial, la adopción de herramientas digitales se ha consolidado como uno de los pilares de la Agricultura 4.0. El uso de simuladores, plataformas interactivas y tecnologías de realidad virtual permite complementar los procesos tradicionales de capacitación, facilitando la transferencia de conocimiento y la comprensión de conceptos técnicos en escenarios que replican condiciones reales de trabajo [4], [5]. Estas herramientas ofrecen la posibilidad de realizar procesos de entrenamiento independientes de las condiciones climáticas o de la disponibilidad de recursos biológicos, contribuyendo a la estandarización de criterios técnicos y a la mejora de los procesos formativos.

Por lo anterior, el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un Entorno Virtual de Aprendizaje basado en realidad virtual para fortalecer los procesos de capacitación en polinización artificial y determinación del punto óptimo de cosecha en palma de aceite. Para ello, se integran herramientas de modelado tridimensional, escaneo 3D, desarrollo de entornos inmersivos y metodologías de aprendizaje experiencial, con el propósito de contribuir al fortalecimiento de las competencias técnicas de los trabajadores y apoyar las estrategias de innovación y transferencia tecnológica promovidas por Cenipalma.

1. Realidad virtual para la formación técnica del sector palmicultor: desarrollo de un entorno virtual de aprendizaje

1.1 Planteamiento del problema

En el cultivo de palma de aceite, labores como la polinización artificial y la determinación del punto óptimo de cosecha (POC) requieren un alto nivel de precisión técnica, ya que influyen de manera directa en la conformación morfológica del racimo, el contenido de biomasa útil y la rentabilidad del sistema productivo. En plantaciones comerciales con híbridos interespecíficos OxG (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*), estas labores resultan aún más complejas debido a las particularidades fisiológicas del material, el cual exige una polinización asistida obligatoria, mediante inductores como el ácido naftalenacético (ANA), para garantizar la formación de frutos aprovechables. Investigaciones desarrolladas en el sector palmicultor demuestran que calibrar adecuadamente el POC bajo criterios estandarizados, como los estadios de la escala fenológica BBCH, puede favorecer el potencial de aceite por racimo y mejorar la tasa de extracción de aceite en planta de beneficio. Sin embargo, alcanzar este umbral de eficiencia es difícil debido a la alta variabilidad que introduce el factor humano durante la inspección visual en campo [6], [7], [8].

La magnitud de este problema se evidencia en los resultados reportados por Cenipalma, donde la aplicación adecuada del regulador de crecimiento ANA en la polinización artificial puede generar incrementos de hasta el 27% en la extracción de aceite [7]. Esto implica que una ejecución deficiente de esta labor, derivada de una capacitación insuficiente, representa un riesgo significativo de pérdida de productividad para el sector palmicultor.

Actualmente, la capacitación del personal encargado de estas labores críticas se realiza principalmente mediante entrenamientos presenciales tradicionales en campo, gestionados por

Cenipalma en articulación con el SENA y otras instituciones educativas, dado que la Corporación no imparte formación de manera directa [9]. Muestra de la magnitud de este esfuerzo formativo es que, a la fecha, esta alianza ha permitido certificar en competencias laborales a más de 24.000 trabajadores del sector palmicultor [10]. Estas jornadas formativas dependen de forma estricta de factores externos incontrolables, como la estacionalidad biológica del cultivo y las condiciones climáticas cambiantes. La presencia de precipitaciones u otras restricciones en la plantación obliga a suspender o reprogramar las capacitaciones, fragmentando la continuidad del proceso de aprendizaje y afectando los cronogramas de transferencia tecnológica de la organización. Además, la transferencia de estos criterios técnicos abstractos e inspecciones visuales sutiles varía considerablemente entre operarios nuevos y experimentados; como resultado, una capacitación insuficiente o poco clara genera errores recurrentes en la ejecución de las labores, los cuales se mantienen en el tiempo y provocan disminución de la productividad, pérdidas en el rendimiento del racimo y aumento de los costos operativos asociados a reprocesos y menor eficiencia en campo.

Aunque existen diferentes alternativas tecnológicas para apoyar los procesos de capacitación, como videos educativos, plataformas virtuales de aprendizaje o material multimedia interactivo, estas herramientas presentan limitaciones para recrear de manera práctica las condiciones observadas durante las labores de campo. En contraste, la realidad virtual permite al usuario interactuar directamente con modelos tridimensionales y escenarios inmersivos que representan elementos reales del cultivo, favoreciendo la observación detallada de estructuras fenológicas y la práctica guiada de procedimientos técnicos. Estas características resultan particularmente relevantes para labores como la polinización artificial y la determinación del punto óptimo de cosecha, donde el reconocimiento visual constituye un componente fundamental del proceso de aprendizaje.

Frente a esta situación, surge la necesidad de implementar alternativas innovadoras que fortalezcan los procesos de formación y permitan estandarizar los criterios técnicos asociados a labores críticas del cultivo. En este contexto, los entrenamientos inmersivos mediante realidad virtual se plantean como una herramienta con potencial para mejorar la comprensión, retención y aplicación de los conocimientos relacionados con la polinización artificial y la determinación del punto óptimo de cosecha. Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el impacto de un Entorno Virtual de Aprendizaje basado en realidad virtual sobre el reconocimiento de los criterios técnicos asociados a la labor de polinización artificial y la determinación del punto óptimo de cosecha en cultivos de palma de aceite?

1.2 Justificación

El desarrollo del presente proyecto se justifica por la necesidad de optimizar los procesos de capacitación del personal de campo en labores críticas del cultivo de palma de aceite, como la polinización artificial y la identificación del punto óptimo de cosecha. Estas actividades requieren un criterio técnico claro y homogéneo, ya que los errores en su ejecución pueden afectar directamente la productividad del cultivo, la calidad de los racimos cosechados y los costos operativos asociados al manejo agronómico.

Las metodologías tradicionales de capacitación, basadas principalmente en jornadas presenciales y acompañamiento en campo, presentan limitaciones para garantizar procesos de aprendizaje continuos, estandarizados y de fácil acceso para todos los trabajadores. En este sentido, la implementación de un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) apoyado en tecnologías de realidad virtual constituye una alternativa que favorece la apropiación del conocimiento mediante experiencias inmersivas, permitiendo la repetición de ejercicios, la visualización detallada de

procedimientos y el aprendizaje práctico en escenarios simulados que reproducen condiciones reales del cultivo.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Mecatrónica, el proyecto integra diferentes áreas del conocimiento relacionadas con el modelado tridimensional, la simulación de entornos interactivos, la realidad virtual y la interacción humano-máquina. El desarrollo del EVA requiere la construcción de modelos 3D representativos de elementos presentes en una plantación de palma de aceite, el diseño de sistemas de interacción que permitan al usuario explorar y manipular objetos virtuales, así como la implementación de mecanismos que faciliten la transferencia de conocimiento técnico mediante herramientas digitales innovadoras. De esta manera, el proyecto evidencia la aplicación de tecnologías propias de la transformación digital para la solución de necesidades reales del sector agroindustrial.

Desde el punto de vista organizacional, se espera que la herramienta contribuya a mejorar los procesos de formación mediante la estandarización de los criterios técnicos utilizados en las labores de polinización artificial y cosecha. Asimismo, se proyecta una disminución en los errores operativos asociados a la identificación incorrecta de estados fenológicos o grados de madurez del fruto, una reducción en los tiempos requeridos para la capacitación inicial del personal y una mayor disponibilidad de recursos formativos para procesos de actualización y entrenamiento continuo.

Adicionalmente, el proyecto fortalece las estrategias de transferencia tecnológica desarrolladas por Cenipalma, al proporcionar una herramienta digital innovadora que complementa los métodos tradicionales de capacitación y amplía las posibilidades de difusión del conocimiento técnico generado por la corporación. Esto permite acercar los resultados de investigación al personal operativo mediante experiencias de aprendizaje más dinámicas, prácticas e interactivas.

Con el fin de verificar el cumplimiento de los beneficios anteriormente mencionados, el presente proyecto contempla una estrategia de validación que permitirá contrastar los resultados obtenidos antes y después de la implementación del EVA. Dicha validación se apoyará en instrumentos como pruebas de conocimiento (pretest y postest) aplicadas al personal capacitado, así como en indicadores de desempeño relacionados con la identificación del punto óptimo de cosecha y la ejecución de la polinización artificial. De esta manera, se busca obtener evidencia objetiva sobre el impacto de la herramienta en el proceso de capacitación, garantizando que los beneficios atribuidos al EVA estén sustentados en resultados medibles y verificables. Finalmente, la propuesta se alinea con los objetivos de innovación, investigación y extensión tecnológica de Cenipalma, contribuyendo al fortalecimiento de las capacidades técnicas del talento humano del sector palmicultor y promoviendo la adopción de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia, calidad y sostenibilidad de las labores agrícolas relacionadas con el cultivo de palma de aceite.

1.3 Objetivos

Con el fin de dar respuesta a la problemática identificada en torno a la variabilidad del criterio humano en la ejecución de las labores de polinización artificial y determinación del punto óptimo de cosecha en palma de aceite, así como a las limitaciones de los métodos tradicionales de capacitación, se plantean el siguiente objetivo general y los objetivos específicos que orientan el desarrollo del presente proyecto.

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un entorno virtual de aprendizaje para el reconocimiento de estados fenológicos asociados a los criterios de la labor de cosecha y polinización artificial en el cultivo de palma de aceite utilizando realidad virtual.

1.3.1 Objetivos específicos

- Caracterizar los estados fenológicos requeridos en las labores de cosecha y polinización artificial en palma de aceite, con el fin de establecer los criterios formativos que fundamenten el diseño de un entorno de entrenamiento inmersivo.
- Proyectar los objetos y estructuras reproductivas de la palma de aceite en modelos 3D para la configuración del entorno virtual.
- Desarrollar un sistema de entrenamiento en realidad virtual orientado al reconocimiento de los estados fenológicos relacionados con las labores de cosecha y polinización artificial en palma de aceite, permitiendo la identificación visual y conceptual de los criterios que definen cada estado.
- Determinar el impacto del entorno virtual de aprendizaje sobre la adquisición, retención y transferencia de las habilidades operativas requeridas en la labor de cosecha y polinización artificial de palma de aceite.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) y los híbridos interespecíficos *Elaeis oleífera* × *Elaeis guineensis* (OxG) constituyen uno de los cultivos agroindustriales de mayor importancia en Colombia, debido a su alto rendimiento por hectárea y su impacto económico y social. El país ha promovido el uso de híbridos OxG principalmente por su tolerancia a enfermedades como la pudrición del cogollo y por su adaptación a diversas condiciones agroecológicas [11], [12].

El manejo agronómico de estos materiales requiere la ejecución adecuada de labores especializadas, entre las que se destacan la polinización artificial y la cosecha, consideradas determinantes para el rendimiento del racimo de fruta fresca (RFF) y la calidad del aceite extraído [1].

2.1.1 Polinización artificial en palma de aceite

La polinización es un proceso fundamental para la formación del fruto en la palma de aceite. En los híbridos OxG, la polinización natural presenta limitaciones asociadas a la baja producción de inflorescencias masculinas, la asincronía floral y la reducida presencia de insectos polinizadores, lo que hace necesaria la implementación de la polinización artificial [11].

La aplicación de reguladores de crecimiento como el ácido α -naftalenacético (ANA) ha sido ampliamente documentada como una estrategia efectiva para compensar las limitaciones reproductivas de los híbridos OxG. Diversas investigaciones indican que la aplicación de ANA favorece la conformación del racimo y contribuye al incremento del potencial de aceite mediante

el desarrollo de frutos partenocárpicos, constituyéndose en una alternativa para mejorar el rendimiento de estos materiales cuando las condiciones de polinización natural son limitadas [13].

Asimismo, los autores señalan que la efectividad de esta práctica

De igual forma, la literatura técnica señala que la efectividad de la polinización artificial depende de factores como el estado de receptividad de la inflorescencia, la dosis aplicada y la correcta ejecución de la labor, aspectos que influyen directamente en el desarrollo y posterior maduración del racimo [1].

2.1.2 Punto óptimo de cosecha en palma de aceite

Se define como el momento en el cual el racimo de fruta fresca (RFF) alcanza su máximo potencial de aceite, conservando condiciones adecuadas para la extracción industrial. En cultivares de *Elaeis guineensis*, este momento se ha identificado tradicionalmente mediante señales empíricas como el desprendimiento de frutos y el cambio de coloración; no obstante, estos criterios resultan insuficientes en híbridos OxG [1].

Investigaciones desarrolladas por Cenipalma han demostrado que los híbridos OxG presentan un patrón de maduración diferenciado, caracterizado por una alta proporción de frutos partenocárpicos y un menor desprendimiento natural. Como alternativa, se propuso la aplicación de la escala fenológica BBCH adaptada a palma de aceite, identificando estadios específicos que permiten estimar con mayor precisión el momento de cosecha y reducir pérdidas asociadas al corte inmaduro o sobre maduro del racimo [1], [6], [8].

Estos avances han permitido una mayor precisión técnica; sin embargo, su correcta aplicación depende en gran medida de la capacidad del trabajador para reconocer visual y temporalmente los estados fenológicos, lo que sigue representando una limitante en contextos

productivos reales. A partir de estos hallazgos, el módulo de cosecha desarrollado dentro del EVA incorpora actividades de reconocimiento y comparación visual de los diferentes estados fenológicos asociados a la maduración del racimo, utilizando como referencia la escala BBCH adaptada para híbridos OxG. [1], [6], [8].

2.1.3 Entornos virtuales de aprendizaje (EVA)

En diferentes contextos educativos y de formación profesional, los entornos virtuales y las tecnologías inmersivas han demostrado contribuir al desarrollo de competencias técnicas, la mejora de la participación de los usuarios y el fortalecimiento de los procesos de aprendizaje. Asimismo, estas herramientas favorecen la transferencia de conocimiento al permitir experiencias formativas más interactivas y centradas en el usuario [2], [3].

Los EVA modernos incorporan principios de aprendizaje inmersivo y aprendizaje experiencial, enfoques pedagógicos que promueven la construcción activa del conocimiento a través de la interacción con escenarios simulados. El aprendizaje experiencial plantea que los individuos aprenden de manera más efectiva cuando participan directamente en actividades que reproducen situaciones reales, permitiéndoles observar las consecuencias de sus decisiones y reflexionar sobre ellas. En este sentido, los entornos virtuales favorecen la adquisición de competencias técnicas mediante la práctica repetitiva, la retroalimentación inmediata y la reducción de riesgos asociados a escenarios reales de trabajo [2], [3].

La efectividad de los EVA ha sido evidenciada empíricamente en diversos contextos formativos. Díaz Perera et al. [14] implementaron un EVA como complemento didáctico para la enseñanza de funciones matemáticas en 125 estudiantes universitarios de la Facultad de Ciencias Económicas Administrativas de la Universidad Autónoma del Carmen, mediante un diseño

cuasiexperimental con pretest y posttest. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en el desempeño cognitivo entre el grupo que utilizó el EVA y el grupo que no lo hizo, favoreciendo a los primeros, además de fortalecer su autonomía y autorregulación del aprendizaje.

De manera similar, un estudio reciente evaluó el uso de un entorno virtual de aprendizaje basado en tareas para la formación de futuros docentes, comparando el desempeño entre estudiantes que utilizaron la herramienta y quienes no lo hicieron [15]. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en el desempeño del grupo que interactuó con el entorno virtual, respaldando la efectividad de este tipo de herramientas como complemento a la formación tradicional.

2.1.4 Entrenamientos inmersivos con realidad virtual

Los entrenamientos inmersivos basados en realidad virtual permiten recrear escenarios de trabajo de manera segura y controlada, facilitando la adquisición de habilidades prácticas, la repetición de procedimientos y el aprendizaje experiencial. Diversos estudios reportan que estas tecnologías favorecen la comprensión de conceptos complejos, incrementan el nivel de compromiso del usuario y mejoran el desarrollo de competencias técnicas en comparación con métodos tradicionales de capacitación [2], [16]. La realidad virtual constituye además una herramienta que genera una sensación de presencia dentro del entorno digital, permitiendo que el usuario interactúe con objetos y situaciones similares a las que encontrará en el contexto laboral real, favoreciendo la retención del conocimiento y la transferencia del aprendizaje hacia escenarios reales de desempeño [2], [3].

De acuerdo con esto, las experiencias inmersivas facilitan el desarrollo de competencias técnicas al permitir que los usuarios participen activamente en procesos de exploración, observación y toma de decisiones dentro de entornos virtuales. Asimismo, la posibilidad de repetir procedimientos en ambientes controlados reduce los riesgos asociados al entrenamiento tradicional y favorece la consolidación del aprendizaje.

En el sector agrícola, diversas investigaciones han aplicado estos principios al desarrollo de entornos inmersivos de entrenamiento. Martinelli et al [17] diseñaron un entorno de entrenamiento virtual para la poda de un avellano, en el cual reconstruyeron digitalmente la planta mediante escáner láser y fotogrametría, generando un modelo paramétrico controlable desde la raíz hasta las hojas. Su sistema permite que el operario interactúe con la planta a través de una interfaz háptica, siguiendo las instrucciones de un instructor virtual (personaje no jugable), lo que evidencia la viabilidad de reconstruir vegetación real en entornos inmersivos con fines de capacitación técnica de alta fidelidad.

Por su parte, Naudé et al [5] propusieron un marco de implementación (XR-AgriEdu) para la incorporación de tecnologías de realidad extendida en la educación agrícola, destacando que estas herramientas permiten acercar a los usuarios a condiciones reales de trabajo, facilitando la comprensión de conceptos agrícolas y reduciendo la brecha entre la teoría y la práctica. De manera similar, Greig et al. [4] implementaron y evaluaron un programa de educación agrícola apoyado en realidad virtual, reportando mejoras en el compromiso de los participantes y en la comprensión de contenidos técnicos por parte de los estudiantes.

Finalmente, en cuanto a las herramientas de desarrollo, motores gráficos como Unreal Engine se han consolidado como plataformas ampliamente utilizadas para la creación de simuladores y aplicaciones inmersivas, debido a su capacidad para generar entornos

tridimensionales de alta calidad visual y permitir la interacción en tiempo real, lo que ha favorecido su adopción en simuladores de entrenamiento industrial, educativo y técnico.

2.2 Marco conceptual

- *Palma de aceite (Elaeis guineensis)*: especie vegetal de gran importancia agroindustrial en Colombia, cultivada por su alto rendimiento por hectárea y su impacto económico y social en el sector palmicultor.
- *Híbridos OxG (Elaeis oleifera × Elaeis guineensis)*: material genético interespecífico promovido en Colombia principalmente por su tolerancia a enfermedades como la pudrición del cogollo y su adaptación a diversas condiciones agroecológicas. Presentan particularidades reproductivas (baja producción de inflorescencias masculinas, asincronía floral) y de maduración (alta proporción de frutos partenocárpicos) que los diferencian del cultivar tradicional.
- *Polinización artificial*: práctica agronómica que consiste en la aplicación manual de reguladores hormonales sobre las inflorescencias femeninas, necesaria en los híbridos OxG debido a las limitaciones de la polinización natural (baja presencia de insectos polinizadores y desfase floral).
- *Ácido α -naftalenacético (ANA)*: regulador de crecimiento vegetal utilizado como estrategia complementaria a la polinización artificial. Induce el desarrollo de frutos sin semilla (partenocarpia), incrementando el potencial de aceite del racimo incluso cuando no hay polen viable disponible. Su efectividad depende del número y frecuencia de aplicaciones y de la sincronización con el estado fenológico de la inflorescencia.

- *Racimo de fruta fresca (RFF)*: unidad de cosecha de la palma de aceite; su desarrollo y composición determinan el rendimiento y la calidad del aceite extraído.
- *Punto óptimo de cosecha (POC)*: momento en el cual el racimo alcanza su máximo potencial de aceite conservando condiciones adecuadas para la extracción industrial. En los híbridos OxG no puede determinarse solo con señales empíricas tradicionales (desprendimiento de frutos, cambio de color), por lo que se recurre a escalas fenológicas específicas.
- *Escala fenológica BBCH (adaptada a palma de aceite)*: herramienta técnica que identifica estadios de maduración específicos del racimo, permitiendo estimar con mayor precisión el momento de cosecha y reducir pérdidas por corte inmaduro o sobremaduro.
- *Entornos Virtuales de Aprendizaje (EVA)*: espacios digitales de formación que emplean tecnologías inmersivas para el desarrollo de competencias técnicas, la participación activa del usuario y el fortalecimiento del aprendizaje mediante experiencias interactivas centradas en el usuario.
- *Aprendizaje inmersivo*: enfoque pedagógico en el que el usuario se sumerge en escenarios simulados que reproducen condiciones reales de trabajo, favoreciendo la retención y transferencia del conocimiento.
- *Realidad virtual (RV)*: tecnología que recrea escenarios de trabajo de manera segura y controlada, generando una sensación de presencia que permite al usuario interactuar con objetos y situaciones similares a las del contexto laboral real, favoreciendo la repetición de procedimientos sin los riesgos del entrenamiento tradicional.

- *Realidad extendida (XR) en educación agrícola:* Conjunto de tecnologías inmersivas (VR, AR, mixtas) aplicadas a la formación agrícola, orientadas a acercar a los usuarios a condiciones reales de trabajo y reducir la brecha entre teoría y práctica.
- *Motor gráfico:* herramienta de desarrollo de software usada para crear entornos tridimensionales de alta calidad visual e interacción en tiempo real, empleada en la construcción de simuladores de entrenamiento industrial, educativo y técnico.

3. Método

El presente proyecto se desarrolla bajo un enfoque de investigación aplicada de carácter tecnológico, orientada al diseño y desarrollo de un Entorno Virtual de Aprendizaje (EVA) basado en Realidad Virtual (RV). Para la fase de evaluación del entrenamiento se adopta un diseño cuasiexperimental de tipo pretest-postest, sin grupo control, que permite comparar el nivel de conocimiento de los participantes antes y después de la intervención con el EVA.

El desarrollo del proyecto se organizó en cuatro fases metodológicas, cada una asociada a uno de los objetivos específicos planteados:

a) *Fase 1. Caracterización de los estados fenológicos*

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico, se realizó una revisión de fuentes técnicas especializadas, tomando como referentes principales el documento *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* [11] y material institucional de Cenipalma, con el fin de identificar los estadios fenológicos relevantes para:

- La determinación del punto óptimo de cosecha (POC) en *Elaeis guineensis* e híbridos OxG, con base en la escala fenológica BBCH adaptada a palma de aceite.

- La polinización artificial en híbridos OxG, considerando el estado de receptividad de la inflorescencia femenina y el momento adecuado para la aplicación de polen y del regulador de crecimiento ANA.

A partir de esta revisión se seleccionaron los estadios fenológicos que serían posteriormente representados en el entorno virtual, estableciendo así los criterios formativos base del entrenamiento inmersivo.

b) Fase 2. Obtención y posprocesamiento de modelos 3D

Para el segundo objetivo específico se realizó la digitalización tridimensional de racimos, inflorescencias y demás estructuras reproductivas de la palma de aceite, correspondientes a los estadios fenológicos seleccionados en la Fase 1.

Instrumento de captura: escáner 3D CR-Scan Ferret Pro, seleccionado por su portabilidad, facilidad de uso y capacidad para capturar geometrías complejas con un nivel de detalle adecuado. Para cada elemento se realizaron múltiples capturas desde diferentes ángulos, garantizando una cobertura completa de la geometría y minimizando zonas sin información.

Procesamiento: los modelos fueron editados en el software Blender (código abierto, compatible con los formatos requeridos por Unreal Engine 5), realizando limpieza de mallas, eliminación de ruido, corrección de imperfecciones geométricas, cierre de superficies abiertas, escalado y optimización poligonal, verificando en cada caso la fidelidad visual respecto al material real escaneado.

Los modelos finales fueron exportados en formato. FBX para su integración en Unreal Engine 5, priorizando el equilibrio entre fidelidad visual y rendimiento gráfico.

c) Fase 3. Desarrollo del sistema de entrenamiento en Realidad Virtual

Para el tercer objetivo específico se seleccionó Unreal Engine como motor gráfico de desarrollo, debido a su compatibilidad nativa con dispositivos de RV, su capacidad de renderizado realista y sus herramientas de desarrollo visual (Blueprints), que permiten implementar mecánicas de interacción sin requerir un desarrollo extensivo de código.

Arquitectura del EVA:

- *Escenario de introducción:* desplazamiento libre e instrucciones generales de uso.
- *Módulo 1 – Polinización artificial:* reconocimiento de inflorescencias, identificación de estados de desarrollo, procedimiento de polinización artificial y evaluación de conocimientos.
- *Módulo 2 – Punto óptimo de cosecha:* reconocimiento de estados fenológicos, identificación de características visuales del racimo, selección del momento de cosecha y evaluación práctica.

Flujo de navegación: menú principal → selección del módulo → test inicial → contenidos teóricos → exploración guiada → actividades prácticas → test final → retroalimentación de resultados.

Mecánicas de interacción: desplazamiento libre, selección e inspección de objetos, manipulación de modelos 3D, visualización de contenido multimedia y sistemas de retroalimentación interactiva.

d) Fase 4. Evaluación y validación del entrenamiento inmersivo

Para el cuarto objetivo específico se diseñó un esquema de evaluación de tipo *pretest-postest*, orientado a medir el impacto del EVA sobre la adquisición, retención y transferencia de conocimiento relacionado con la polinización artificial y el punto óptimo de cosecha.

Procedimiento proyectado:

1. Definición de la población y muestra de trabajadores participantes.
2. Diseño de instrumentos de evaluación (pretest y postest equivalentes).
3. Aplicación de la prueba diagnóstica inicial.
4. Desarrollo del entrenamiento inmersivo dentro del EVA.
5. Aplicación de la prueba final.
6. Análisis comparativo de resultados pretest-postest para determinar el impacto del entorno virtual sobre el aprendizaje.

4. Resultados

4.1 Caracterización de los estados fenológicos

Como resultado de la revisión documental, se identificaron y seleccionaron los estadios fenológicos correspondientes a:

Figura 1. *Estadios fenológicos para punto óptimo de cosecha en Elaeis guineensis.*

E. Guineensis		E. Guineensis	
705		800	
		805	
709		807	

Figura 2. *Estadios fenológicos para punto óptimo de cosecha en híbrido OxG.*

Hibrido OxG			Hibrido OxG					
703			800			807		
705			803					
709			805			809		

En el caso particular de la labor de polinización artificial, se trabaja con palmas híbridas.

Figura 3. *Estadios fenológicos para punto óptimo de cosecha en híbrido OxG.*

Estadio	Híbrido OxG	
6: Inflorescencias femeninas	603	
	607	
	609	

Esta caracterización constituyó la base conceptual y visual para el desarrollo de las fases posteriores, garantizando que los contenidos representados en el entorno virtual correspondieran a criterios técnicos validados por la literatura institucional (Fedepalma, Cenipalma).

4.2 Obtención y posprocesamiento de modelos 3D

Se generaron 19 modelos tridimensionales correspondientes a racimos, inflorescencias y estructuras asociadas a los estadios fenológicos seleccionados, mediante escaneo 3D y posprocesamiento en Blender. La Tabla 1 resume los indicadores técnicos de una muestra representativa de los modelos, evidenciando una reducción poligonal promedio superior al 75 % respecto a la malla original.

Tabla 1. *Indicadores técnicos de los modelos generados*

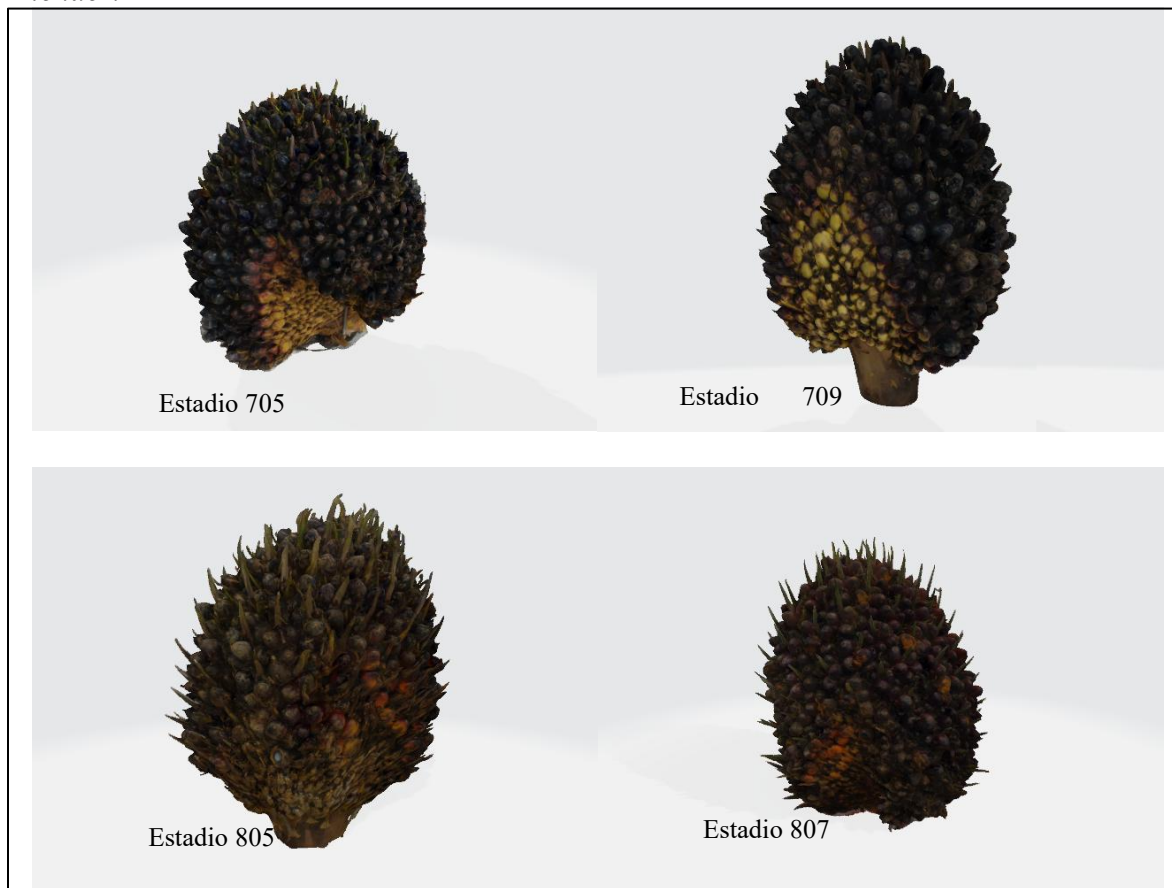
No	Modelo	Resolución	Polígonos iniciales	Formato de exportación	Polígonos finales	Formato de exportación
1	Oxg_603	0.5	6.877.784	.OBJ	1.485.218	.FBX
2	Oxg_603-607	0.52	4.447.110	.OBJ	999.998	.FBX

No	Modelo	Resolución	Polígonos iniciales	Formato de exportación	Polígonos finales	Formato de exportación
3	Oxg_607-100	0.59	4.712.498	.OBJ	999.976	.FBX
4	Oxg_607-50	0.5	4.775.030	.OBJ	1.190.507	.FBX
5	Oxg_607	0.5	5.679.537	.OBJ	1.560.491	.FBX
6	Oxg_609	0.52	3.831.550	.OBJ	1.027.729	.FBX
7	Raquila_Oxg_609	0.3	370.732	.OBJ	248.116	.FBX
8	Oxg_703	0.5	5.222.876	.OBJ	1.143.839	.FBX
9	Oxg_705	0.5	3.978.285	.OBJ	999.999	.FBX
10	Oxg_709	0.5	9.489.227	.OBJ	1.628.904	.FBX
11	Oxg_800	0.5	6.991.367	.OBJ	1.395.816	.FBX
12	Oxg_805	0.51	9.873.604	.OBJ	1.958.760	.FBX
13	Oxg_807	0.5	7.156.669	.OBJ	1.383.632	.FBX
14	Oxg_809	0.5	5.971.527	.OBJ	1.134.256	.FBX
15	G_705	0.5	4.076.376	.OBJ	999.999	.FBX
16	G_709	0.5	6.577.339	.OBJ	1.009.620	.FBX
17	G_800	0.5	4.723.634	.OBJ	1.000.688	.FBX
18	G_805	0.5	4.677.018	.OBJ	999.996	.FBX
19	G_807	0.5	4.627.725	.OBJ	991.353	.FBX

Entre los resultados visuales obtenidos se destacan el modelo 3D de racimo de *Elaeis guineensis* para la labor de punto óptimo de cosecha (Figura 4), el modelo 3D de inflorescencia femenina de híbrido OxG para la labor de polinización artificial (Figura 5), y el modelo 3D de racimo de híbrido OxG para la labor de punto óptimo de cosecha (Figura 6).

- *Elaeis Guineensis*, labor punto óptimo de cosecha:

Figura 4. Modelo 3D del racimo de palma de aceite obtenido mediante escaneo 3D y postproceso en Blender.



- *Hibrido OxG*, labor polinización artificial:

Figura 5. *Modelo 3D de inflorescencia femenina de palma de aceite obtenido mediante escaneo 3D y postproceso en Blender.*



- *Hibrido OxG*, labor punto óptimo de cosecha:

Figura 6. *Modelo 3D del racimo de palma de aceite obtenido mediante escaneo 3D y postproceso en Blender.*



4.3 Desarrollo del sistema de entrenamiento en Realidad Virtual

Se desarrolló la arquitectura preliminar del EVA en Unreal Engine 5, integrando los modelos 3D obtenidos junto con vegetación, materiales, iluminación que recrean un lote de palma

de aceite y contempla la implementación de diferentes escenarios de capacitación diseñados para fortalecer los conocimientos relacionados con la polinización artificial y la determinación del punto óptimo de cosecha en palma de aceite. La estructura general del entorno se compone de los siguientes módulos:

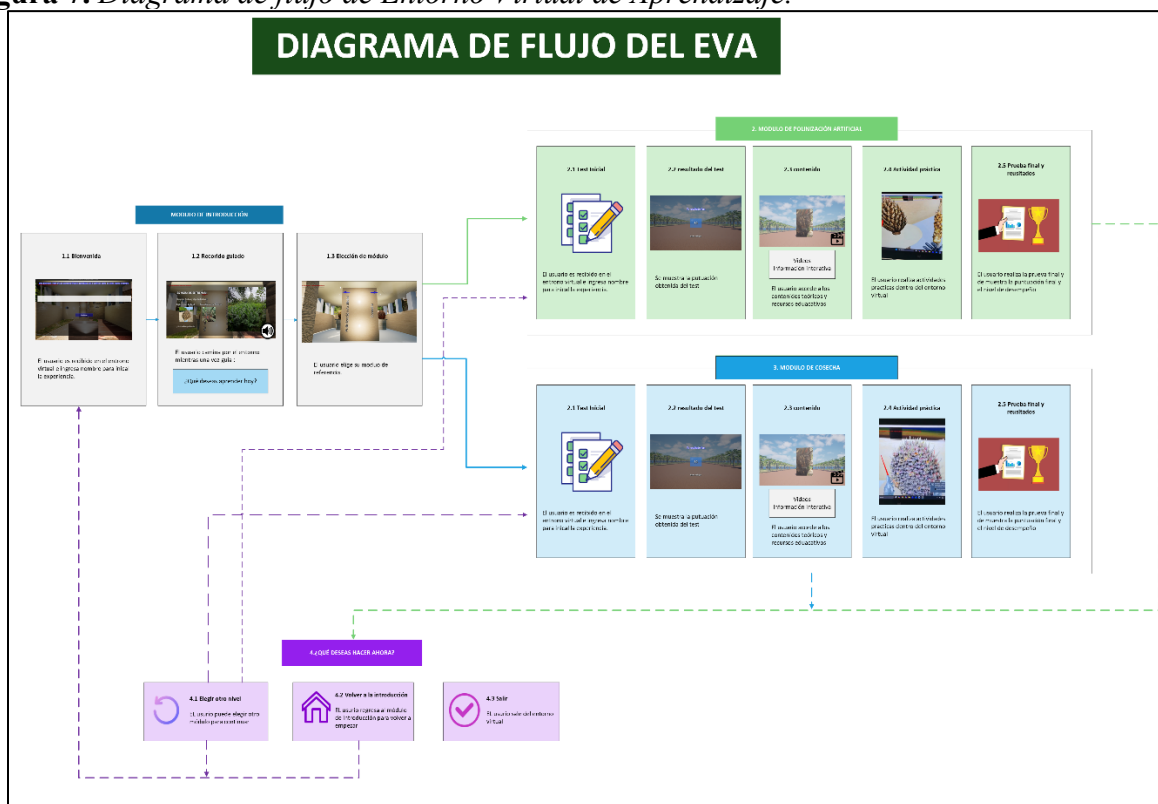
- *Escenario de introducción:* corresponde al escenario inicial del entorno virtual. En este espacio, el usuario dispone de libre desplazamiento para familiarizarse con el entorno y acceder a los módulos de capacitación disponibles. Asimismo, se presentan las instrucciones generales de uso y navegación del sistema.
- *Módulo 1. Polinización artificial:* este módulo está orientado al aprendizaje de los procedimientos asociados a la polinización artificial en híbridos OxG e incluye:
 1. Reconocimiento de inflorescencias.
 2. Identificación de estados de desarrollo.
 3. Procedimiento de polinización artificial.
 4. Evaluación de conocimientos antes y después del entrenamiento.
- *Módulo 2. Determinación del punto óptimo de cosecha:* este módulo se enfoca en el reconocimiento de los criterios técnicos utilizados para definir el momento adecuado de cosecha e incluye:
 1. Reconocimiento de estados fenológicos.
 2. Identificación de características visuales del racimo.
 3. Selección del momento adecuado de cosecha.
 4. Evaluación práctica de los conocimientos antes y después del entrenamiento.

Flujo de navegación: el recorrido propuesto dentro del EVA sigue la siguiente secuencia:

1. Menú principal.

2. Selección del módulo de capacitación.
3. Aplicación de test inicial.
4. Presentación de contenidos teóricos.
5. Exploración guiada del entorno.
6. Desarrollo de actividades prácticas.
7. Aplicación de test final.
8. Presentación de resultados y retroalimentación.

Figura 7. Diagrama de flujo de Entorno Virtual de Aprendizaje.



Mecánicas de interacción: para favorecer el aprendizaje inmersivo y la participación del usuario, el entorno incorpora las siguientes mecánicas de interacción:

1. Desplazamiento libre dentro del entorno virtual.

2. Selección e inspección de objetos de interés.
3. Manipulación de modelos tridimensionales (3D).
4. Visualización de contenido multimedia e informativo.
5. Sistemas de retroalimentación interactiva asociados a las actividades de aprendizaje.

Actualmente el sistema se encuentra en la etapa final de integración de las funciones de evaluación (test inicial/final) y retroalimentación, por lo que este resultado corresponde a un avance funcional sólido del sistema, en camino hacia su versión de entrega completa.

De manera adicional a la validación formal proyectada para la Fase 4, se realizaron sesiones exploratorias de retroalimentación con usuarios no pertenecientes a la población objetivo (trabajadores nuevos y antiguos), con el fin de identificar ajustes preliminares de usabilidad antes de la validación con la población objetivo. Esta retroalimentación permitió identificar oportunidades de mejora relacionadas con la claridad de la información y las preguntas de evaluación presentadas al usuario, así como con el uso de los recursos de audio y con la interacción del usuario con los objetos tridimensionales dentro del entorno. A partir de estos hallazgos, se ajustó la redacción y el nivel de detalle de las preguntas de evaluación para facilitar su comprensión, se reforzaron los recursos de audio como apoyo a las instrucciones y contenidos del entrenamiento, y se optimizaron los mecanismos de selección y manipulación de los modelos tridimensionales, mejorando así la fluidez de la experiencia de usuario previa a la validación formal con la población objetivo.

4.4 Evaluación y validación del entrenamiento inmersivo

Se cuenta con la estructuración preliminar de la estrategia de validación, incluyendo la definición del esquema pretest-posttest y la identificación de las variables generales de análisis a

considerar en la evaluación del entrenamiento. La aplicación de los instrumentos, la recolección de datos con los trabajadores y el análisis comparativo de resultados constituyen la siguiente etapa del proyecto, y sus hallazgos serán reportados una vez finalizada la fase de validación con los participantes.

6. Conclusiones

Respecto a la caracterización de los estados fenológicos, la revisión de fuentes técnicas institucionales (Fedepalma, Cenipalma) y la adaptación de la escala BBCH permitieron establecer criterios formativos claros y técnicamente validados para las labores de polinización artificial y punto óptimo de cosecha, constituyendo una base conceptual sólida sobre la cual se fundamentó todo el desarrollo posterior del entrenamiento inmersivo.

En cuanto a la proyección de estructuras reproductivas en modelos 3D, el proceso de escaneo con CR-Scan Ferret Pro y posprocesamiento en Blender demostró ser una estrategia efectiva para digitalizar material vegetal real con un alto nivel de fidelidad visual, logrando además una reducción poligonal superior al 75 % en la mayoría de los modelos. Esto confirma que es posible representar con precisión morfológica las estructuras necesarias para el reconocimiento fenológico, sin comprometer el rendimiento gráfico requerido por un entorno de realidad virtual en tiempo real.

Con relación al desarrollo del sistema de entrenamiento en realidad virtual, la integración de los modelos 3D dentro de Unreal Engine 5, junto con la arquitectura modular del EVA (escenario de introducción, módulo de polinización artificial y módulo de punto óptimo de cosecha), permitió construir un sistema funcional que representa de manera fiel las condiciones del contexto laboral real. Asimismo, las sesiones exploratorias de retroalimentación con usuarios

evidenciaron la importancia de iterar sobre aspectos de usabilidad —como la claridad de las preguntas de evaluación, el soporte de audio y la interacción con los objetos tridimensionales— antes de avanzar a la validación formal, lo cual fortalece la calidad del entrenamiento previo a su aplicación con la población objetivo.

Frente a la determinación del impacto del entorno virtual sobre el aprendizaje, si bien la validación formal mediante el esquema pretest-postest con trabajadores del sector palmicultor se encuentra proyectada como la etapa final del proyecto, la retroalimentación exploratoria recolectada hasta el momento sugiere una recepción favorable del entrenamiento y confirma la pertinencia de continuar con el proceso de validación planeado para obtener conclusiones definitivas sobre la efectividad del EVA.

En términos generales, el proyecto evidencia la viabilidad técnica y pedagógica de emplear la realidad virtual como herramienta de capacitación en labores agrícolas especializadas, al permitir recrear de manera segura, controlada y repetible escenarios de aprendizaje que en condiciones reales implican mayores riesgos, costos y limitaciones de tiempo. Los avances logrados en las tres primeras fases, sumados a los ajustes derivados de la retroalimentación temprana, consolidan una base robusta para culminar la fase de validación y determinar de manera concluyente el impacto del entorno virtual de aprendizaje sobre la adquisición, retención y transferencia de las competencias técnicas asociadas a la polinización artificial y el punto óptimo de cosecha en palma de aceite.

7. Apéndices

Apéndice A. Video ilustrativo de dos módulos.

Véase archivo en fuente externa

8. Referencias

- [1] K. Sinisterra, A. Caicedo, C. Castilla, D. Ceballos, M. Palacio, I. Cortés, J. Camperos, I. Ayala y M. Mosquera, “Validación del punto óptimo de cosecha en el cultivar híbrido interespecífico OxG Corpoica (Cereté x Deli y Cereté x Yangambi),” *Ceniavances*, no. 189, Rep. técnico, Cenipalma, Bogotá, Colombia, agosto 2019. DOI:[10.13140/RG.2.2.30419.71209](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30419.71209)
- [2] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, "A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda," *Computers & Education*, vol. 147, art. 103778, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>.
- [3] A. Cabrera-Duffaut, A. M. Pinto-Llorente, and A. Iglesias-Rodríguez, "Immersive learning platforms: Analyzing virtual reality contribution to competence development in higher education—A systematic literature review," *Frontiers in Education*, vol. 9, 2024, <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1391560>
- [4] J. A. Greig, B. Colclasure, S. Rampold, T. Ruth, and T. Granberry, “Enhancing agricultural education through virtual reality: Facilitation, application, reflection, and measurement in the classroom”, *Adv Ag Dev*, vol. 5, no. 2, pp. 64–80, enero 2024. <https://doi.org/10.37433/aad.v5i2.353>
- [5] D. H. Naudé, B. S. Botha, L. Hugo, H. Jordaan, and W. A. Lombard, "Extended reality in agricultural education: A framework for implementation," *Education Sciences*, vol. 14, no. 12, art. 1309, 2024, <https://doi.org/10.3390/educsci14121309>
- [6] E. Angarita, E. Daza, A. Caicedo, R. Ruíz, I. Ayala, and H. M. Romero, "Impacto de la polinización artificial y la implementación del punto óptimo de cosecha sobre la

- producción de aceite de híbridos interespecíficos OxG," *Boletín el Palmicultor*, Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2018.
<http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/138434>
- [7] Cenipalma, "Cultivares híbridos OxG: cómo ANA y el punto de cosecha impulsan la productividad," *El Palmicultor*. [En línea]. Disponibles en: <https://elpalmicultor.com/cultivares-hibridos-oxg-ana-productividad/> [Acceso: Ago. 25, 2026].
- [8] A. Niño, A. M. García, N. F. Pulido, J. Mendoza, L. C. Cruz, and E. Torrecilla, "Polinización, criterios de cosecha y procesamiento del híbrido OxG en Palmas y Extractora Monterrey S.A.," *Palmas*, vol. 42, no. 1, pp. 130–138, 2021.
- [9] Cenipalma, "¿Quiénes somos?," Centro de Investigación en Palma de Aceite. [En línea]. Disponible en: <https://www.cenipalma.org/quienes-somos/>. [Acceso: ago. 25, 2026].
- [10] "Cenipalma: 30 hitos y logros," *El Palmicultor*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elpalmicultor.com/cenipalma-30-hitos-y-logros/> [Acceso: ago. 25, 2026].
- [11] D. C. Forero H., P. A. Hormaza, L. P. Moreno y R. Ruíz R., *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite*. Bogotá, Colombia: Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, 2012.
- [12] H. M. Romero, Ed., *Los híbridos interespecíficos OxG de palma de aceite*. Bogotá, Colombia: Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, 2023.
- [13] O. Linares Leguizamón, L. Santacruz Arciniegas y G. A. Rosero Estupiñán, "Evaluación de la polinización artificial en el material híbrido OxG (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*)," *Palmas*, vol. 40, no. 4, pp. 96-105, 2019.

- [14] J. J. Díaz Perera, H. A. Salinas Padilla, S. del C. Herrera Sánchez, and E. Cajigal Molina, "Entorno virtual de aprendizaje y rendimiento académico de estudiantes de nivel superior en el tema de funciones matemáticas," *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, vol. 13, no. 26, 2023, <https://doi.org/10.23913/ride.v13i26.1407>
- [15] W. Wiboolyasarini, "Can a virtual task-based language learning environment enhance pre-service teachers' performance? Comparing non- and users of iPad," *Journal of Interactive Media in Education*, vol. 2023, no. 1, art. 12, pp. 1–15, 2023, <https://doi.org/10.5334/jime.802>
- [16] Y. Cao, G. W. Ng, and S. S. Ye, "Design and evaluation for immersive virtual reality learning environment: A systematic literature review," *Sustainability*, vol. 9, <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1391560>
- [17] A. Martinelli, D. Fabiocchi, F. Picchio, H. Giberti, and M. Carnevale, "Design of an environment for virtual training based on digital reconstruction: From real vegetation to its tactile simulation," *Designs*, vol. 9, no. 2, art. 32, 2025, <https://doi.org/10.3390/designs9020032>