

Digitalización inmersiva del Bosque Murocomba con técnicas de procesamiento de imágenes

Immersive digitization of the Murocomba Forest using image processing techniques

Diego Intriago-Rodríguez¹ <https://orcid.org/0000-0003-4829-0089>, Mathías Ortega-Rizzo¹ <https://orcid.org/0009-0007-9952-075X>, Carlos Belezaca-Pinargote¹ <https://orcid.org/0000-0002-3158-7380>, Edison Solano-Apuntes¹ <https://orcid.org/0000-0001-8158-0040>

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
dintriagor3@uteq.edu.ec, aortegar@uteq.edu.ec,
cbelezaca@uteq.edu.ec, esolano@uteq.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/29

Aceptado: 2025/08/24

Publicado: 2025/10/15

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de una solución tecnológica basada en procesamiento de imágenes para la digitalización inmersiva del Bosque Protector Murocomba, ubicado en la provincia de Los Ríos, Ecuador. La propuesta integra el uso de una cámara 360° para la captura de imágenes esféricas de alta calidad, que fueron procesadas digitalmente con el fin de optimizar su nitidez, corregir imperfecciones y facilitar su integración en un entorno virtual interactivo. Como parte del sistema, se implementó un modelo de inteligencia artificial con arquitectura YOLOv8, entrenado para detectar especies vegetales presentes en los senderos del bosque. Estas detecciones se incorporaron a una aplicación web que permite a los usuarios explorar el recorrido de manera remota, interactuar con el contenido e identificar la flora del lugar sin necesidad de presencia física. El proyecto busca ofrecer una alternativa para la conservación del ecosistema mediante el acceso digital a su biodiversidad, reduciendo el impacto humano directo y promoviendo la educación ambiental. Los resultados demuestran la efectividad de combinar tecnologías inmersivas y modelos de detección para representar entornos naturales con alto valor ecológico de forma accesible y sostenible.

Palabras clave: tecnologías interactivas, inteligencia artificial aplicada, ecosistemas tropicales, educación ambiental, sistemas de visualización remota.

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones.

Cómo citar: Intriago-Rodríguez, D., Ortega-Rizzo, M., Belezaca-Pinargote, C. & Solano-Apuntes, E. (2025). Digitalización inmersiva del Bosque Murocomba con técnicas de procesamiento de imágenes. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 77-87. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1355>

Abstract

This paper presents the development of a technological solution based on image processing for the immersive digitization of the Murocomba Protected Forest, located in the province of Los Ríos, Ecuador. The proposal integrates the use of a 360° camera to capture high-quality spherical images, which were digitally processed to optimize their sharpness, correct imperfections, and facilitate their integration into an interactive virtual environment. As part of the system, an artificial intelligence model with YOLOv8 architecture was implemented, trained to detect plant species present in the forest trails. These detections were incorporated into a web application that allows users to explore the trail remotely, interact with the content, and identify the flora of the site without the need for physical presence. The project seeks to offer an alternative for the conservation of the ecosystem through digital access to its biodiversity, reducing direct human impact and promoting environmental education. The results demonstrate the effectiveness of combining immersive technologies and sensing models to represent natural environments with high ecological value in an accessible and sustainable way.

Keywords: Interactive technologies, applied artificial intelligence, tropical ecosystems, environmental education, remote visualization systems.

Introducción

La conservación de los ecosistemas naturales es uno de los retos más significativos de la actualidad, especialmente en áreas de elevada diversidad biológica como los bosques tropicales. Estos hábitats, fundamentales para sostener el equilibrio ambiental a escala global, se ven sometidos a presiones cada vez más intensas debido a actividades como la deforestación, el turismo descontrolado y el crecimiento de las zonas urbanas. En este escenario, resulta imperativo adoptar soluciones tecnológicas que faciliten la investigación, el seguimiento y la divulgación de estos entornos sin generar un impacto negativo en su estructura ecológica ni en su funcionamiento.

En este marco, las tecnologías inmersivas, junto con el procesamiento de imágenes digitales y los modelos de entrenamiento, emergen como una opción viable para conectar a diversas audiencias con la riqueza de los ecosistemas naturales, eliminando la necesidad de alterar físicamente dichos espacios. La captura de entornos mediante cámaras 360° posibilita una representación fiel y detallada de los paisajes naturales, lo que permite desarrollar recorridos virtuales que no solo fomentan la educación ambiental, sino que también incentivan una mayor apreciación de la biodiversidad y su importancia.

El estudio tiene como eje central el Bosque Protector Murocomba, situado en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Este ecosistema se distingue por su notable diversidad vegetal y, al mismo tiempo, por su susceptibilidad a las perturbaciones derivadas de la actividad humana. Dado que actualmente no existen instrumentos suficientes para su exploración a distancia, este trabajo propone la creación de un recorrido virtual inmersivo, complementado con un sistema inteligente de reconocimiento de especies vegetales basado en la arquitectura YOLOv8.

Este estudio busca cumplir un doble objetivo: por un lado, aprovechar las herramientas digitales para promover la educación y la conservación; por otro, ofrecer a investigadores, estudiantes y al público en general la posibilidad de interactuar con el ecosistema de manera no invasiva, preservando su sostenibilidad a largo plazo. Así, el proyecto se posiciona como una alternativa que armoniza el avance tecnológico con el compromiso ambiental, contribuyendo tanto a la protección de la biodiversidad como al fortalecimiento de la conciencia ecológica en la sociedad.

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque exploratorio y no experimental, orientado al diseño e implementación de una solución tecnológica sin manipulación directa de las variables del entorno. El estudio se efectuó en el sendero del Bosque Protector Murocomba, ubicado en el cantón Valencia, provincia de Los Ríos, Ecuador, que inicia en las coordenadas longitud -79.164583 , latitud -0.637222 y finaliza en longitud -79.144083 , latitud -0.646583 , a una altitud promedio de 526 m. s. n. m. En una primera fase se realizó un reconocimiento del terreno con el fin de identificar el sendero ecoturístico más representativo del área, tomando en cuenta la diversidad vegetal observable y las condiciones de accesibilidad para la captura de datos. A lo largo de un recorrido de 3.73 km, se capturaron 61 panoramas 360° con una cámara Insta360 ONE X2, seleccionada por su capacidad de capturar imágenes esféricas en alta resolución, resistente a condiciones climáticas adversas. Las imágenes fueron procesadas utilizando software especializado con el fin de mejorar la calidad visual, corregir distorsiones y preparar el material para su integración en entornos digitales inmersivos. Posteriormente, se construyó un recorrido virtual a partir de las imágenes 360° capturadas previamente, mediante la herramienta Pano2VR, permitiendo vincular escenas y agregar puntos interactivos.

Figura 1

Ubicación del Bosque Protector Murocomba

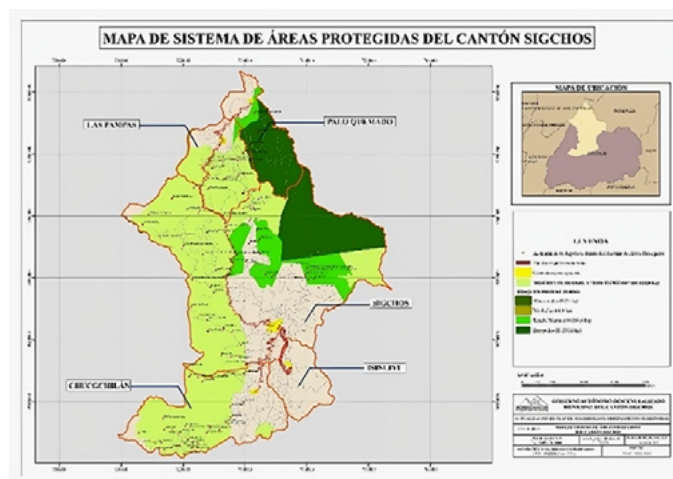


Figura 2

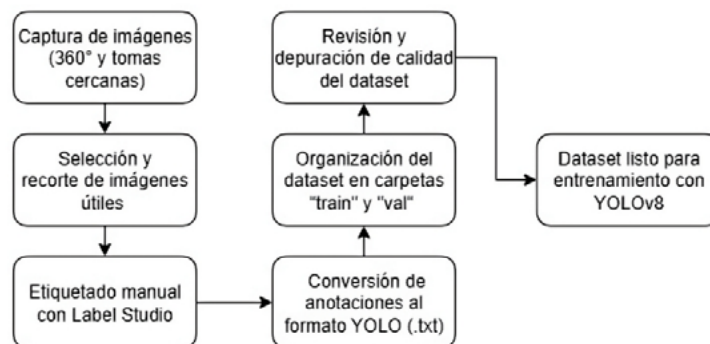
Ruta seguida para la captura de datos



Paralelamente, se elaboró un conjunto de datos compuesto por 793 imágenes etiquetadas manualmente, en las que se identificaron seis especies vegetales características del bosque. Estas imágenes fueron divididas en subconjuntos de entrenamiento y validación, y utilizadas

para entrenar un modelo de detección basado en la arquitectura YOLOv8. El proceso incluyó técnicas de aumento de datos, configuración de hiperparámetros y validación del rendimiento del modelo mediante métricas como la precisión promedio (mAP).

Figura 3
Diagrama del proceso de captura y tratamiento de imágenes



Finalmente, se integró el recorrido virtual y el sistema de detección en una aplicación web interactiva desarrollada con tecnologías estándar como HTML, JavaScript y ONNX, optimizando su rendimiento para dispositivos de distintas características. Esta metodología combinó la observación directa, el procesamiento digital de imágenes y el desarrollo de interfaces web con el propósito de ofrecer una experiencia inmersiva accesible, educativa y orientada a la conservación ambiental.

Resultados y Discusión

Identificación de senderos ecoturísticos

La primera etapa consistió en una exploración física detallada del Bosque Protector Murocomba, con el propósito de hallar el camino ecoturístico que mejor representara el área desde tres perspectivas principales: la biológica, la paisajística y la técnica. Este esfuerzo inicial fue clave para garantizar que la experiencia inmersiva que se desarrolló refleje la riqueza natural del bosque, sin poner en riesgo su delicado equilibrio ecológico. Se buscó virtualizar un trayecto que no solo fuera funcional, sino que también mostrara la esencia del lugar de una manera auténtica y respetuosa.

Para lograr esto, se llevó a cabo varios recorridos por las zonas transitables del bosque, usando como referencia aspectos como la variedad de plantas, la facilidad para el desplazamiento, la estabilidad del suelo y el valor educativo que el entorno ofrece. En este proceso, fue crucial contar con expertos locales que compartieron su conocimiento profundo del área. Además, se hizo uso de herramientas prácticas como un GPS para registrar ubicaciones importantes, y una cámara Insta360 ONE X2 para grabar videos y tomar fotos esféricas. La elección de esta cámara se debe a su alta resolución, costo accesible y capacidad de resistencia a las condiciones cambiantes del clima en el bosque.

A lo largo del recorrido presencial del lugar, se fueron recolectando datos geoespaciales que resultaron fundamentales para decidir qué partes del bosque se incluirían finalmente en el recorrido virtual. El enfoque estuvo principalmente en áreas donde existe amplia variedad de especies vegetales, y en lugares donde las plantas estaban en diferentes etapas de crecimiento. Esto permitió armar un trayecto que muestra la diversidad del ecosistema de forma realista y completa, para que quienes lo recorran digitalmente puedan apreciarlo tal y como es.

Figura 4
Reconocimiento presencial del terreno



El uso de la cámara 360 tuvo la finalidad de capturar imágenes esféricas a lo largo de las rutas elegidas. Estas imágenes sirvieron para el desarrollo y diseño posterior de la virtualización del sendero, así como para extraer de ellas a las especies que serán parte del modelo de reconocimiento. Además, se complementó con la toma de fotos tradicionales realizadas de forma cercana a cada especie, para complementar la creación del dataset necesario para el entrenamiento futuro del modelo.

Gracias a la ayuda de los expertos, se redujo el número de especies vegetales que formarán parte del modelo de entrenamiento, basando la elección principalmente en especies que tienen mayor presencia dentro de las zonas seleccionadas para la virtualización. Las seis especies seleccionadas se detallan a continuación:

Tabla 1
Inventario de especies seleccionadas

NOMBRE COMÚN	DENOMINACIÓN CIENTÍFICA	GRUPO TAXONÓMICO
Palma jardinera	Chamaedorea chapana	Arecaceae
Colca	Minonia crocea	Melastomataceae
Azulciza	Faramea suerrensis	Rubiaceae
Mursuelo	Browneopsis disepala	Fabaceae
Tumbiliyo	Bubbia semecarpoides	Monimiaceae
Zarzaparrilla	Smilax bona-nox	Smilacaceae

Diseño del recorrido virtual

Tras seleccionar el sendero ecoturístico más representativo del Bosque Protector Murocomba, se diseñó el recorrido virtual inmersivo utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes (PDI) y herramientas especializadas para transformar el material capturado en una experiencia interactiva y fiel al entorno.

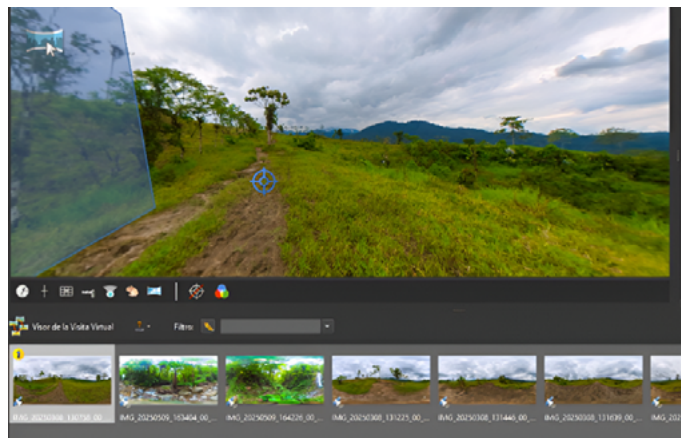
El proceso comenzó con el tratamiento de las imágenes esféricas capturadas por la cámara Insta360 ONE X2. Se corrigieron distorsiones del lente gran angular, se ajustó el horizonte y se

convirtieron las imágenes a formato equirectangular, asegurando una visualización fluida y sin defectos en el entorno virtual. La corrección de distorsión y conversión a formato equirectangular mejoró la calidad visual de los panoramas, obteniéndose valores promedio de PSNR 32.8 dB y SSIM 0.947, lo que asegura una proyección más nítida en el recorrido virtual.

Para construir el recorrido, se utilizó el software Pano2VR, que permitió organizar las imágenes panorámicas según su ubicación real y conectarlas mediante nodos interactivos. Cada escena se alineó con el trayecto definido en el trabajo de campo, garantizando una navegación lógica y coherente.

Figura 5

Diseño y organización del recorrido



Un aspecto clave fue la integración de hotspots poligonales, que delimitaron áreas irregulares en las imágenes 360° para resaltar especies vegetales. Estos hotspots activaban ventanas con datos como el nombre común, científico y familia botánica, enriqueciendo la experiencia con un enfoque educativo y científico.

Figura 6

Delimitación de polígonos por especie



La interfaz de navegación se diseñó para ser intuitiva, con menús contextuales, controles de movimiento, puntos de referencia y zoom, optimizada para funcionar en dispositivos móviles y navegadores de escritorio. Para mejorar el rendimiento, se implementó carga progresiva con imágenes en múltiples resoluciones, adaptándose al ancho de banda del usuario sin sacrificar calidad.

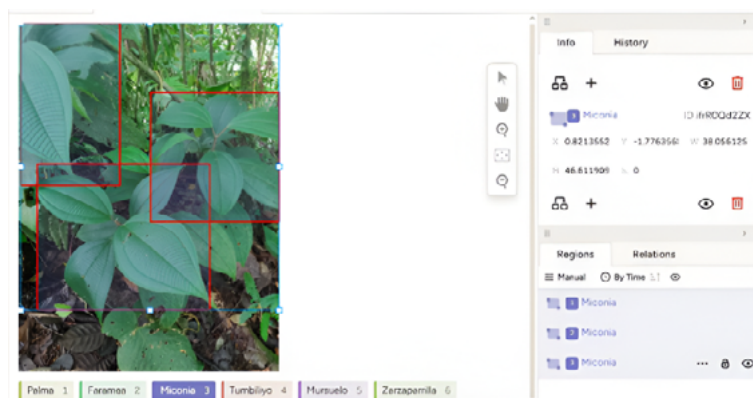
Figura 7
Fragmento del recorrido virtual



Desarrollo y evaluación de un modelo de entrenamiento para detectar especies vegetales

Para enriquecer el recorrido virtual del Bosque Protector Murocomba, se implementó un modelo de inteligencia artificial basado en YOLOv8, diseñado para identificar especies vegetales en el entorno inmersivo. Este modelo se entrenó con un dataset de 793 imágenes etiquetadas manualmente usando Label Studio, organizadas en seis clases de especies ecológicamente relevantes, divididas en 80 % para entrenamiento y 20 % para validación.

Figura 8
Etiquetado de imágenes y asignación de clases



Configuración del modelo

Se seleccionó YOLOv8n por su equilibrio entre precisión y eficiencia, ideal para navegadores web. Se aplicaron técnicas de aumento de datos, como inversión horizontal, desenfoque y ajustes de exposición, para adaptarse a las variaciones de luz y perspectiva del bosque. Los parámetros clave del entrenamiento se resumen a continuación:

Tabla 2
Principales hiperparámetros usados en el entrenamiento

PARÁMETRO	VALOR
Arquitectura	YOLOv8n
Número de clases	6
Tamaño de imagen	640x640 px
Número de épocas	100
Batch size	16
Learning rate inicial	0.001
Aumento de datos	Sí (flip, blur, exposure)

Rendimiento del modelo

Tras 100 épocas, el modelo mostró un desempeño sólido en el conjunto de validación, con métricas que confirman su capacidad para detectar especies bajo condiciones variables:

Tabla 3
Métricas de evaluación del modelo YOLOv8n

MÉTRICA	RESULTADO (%)
Precisión	91.3
Recall	88.6
mAP0.5	92.7
mAP0.5:0.95	73.4
F1-Score	89.9

La evaluación del modelo YOLOv8n mostró un desempeño robusto en la identificación de especies vegetales. Con una precisión del 91.3 %, el modelo acertó en la mayoría de sus detecciones, mientras que el *recall* (porcentaje de verdaderos positivos entre los casos reales) del 88.6 % indica que identificó casi todos los ejemplares reales en las imágenes. El F1-Score del 89.9 % refleja un balance sólido entre ambas métricas. El valor de mAP0.5 (92.7 %) corresponde al promedio de precisión para todas las clases, considerando una superposición mínima del 50 % entre la predicción y la anotación real. Por su parte, el mAP0.5:0.95 (73.4 %) representa el promedio de precisión calculado a lo largo de múltiples umbrales (desde 0.5 hasta 0.95), ofreciendo una evaluación más exigente. En conjunto, estas métricas confirman que el modelo YOLOv8n logró generalizar adecuadamente, manteniendo eficiencia y exactitud en un entorno con variabilidad natural como el bosque.

Tabla 4
Comparación de principales métricas entre dos modelos

MODELO	mAP@0.5 (%)	F1-score (%)	PRECISIÓN
YOLOv5n	89.6	86.7	88.0
YOLOv8n	96.4	96.6	91.3

Como referencia comparativa, se evaluó YOLOv5n en el mismo dataset, alcanzando un mAP@0.5 de 89.6 % y F1-score de 86.7 %, valores inferiores a los obtenidos por YOLOv8n. El rendimiento del dataset en estos dos modelos muestra una evidente diferencia, ratificando la razón de la elección del modelo mencionado.

Exportación y despliegue

Una vez completado el proceso de entrenamiento, el modelo fue exportado al formato ONNX, lo que permitió su ejecución directa en el navegador dentro del aplicativo web. Esta elección técnica representó una ventaja en términos de portabilidad, interoperabilidad y eficiencia, ya que ONNX está diseñado para funcionar en múltiples entornos sin necesidad de convertir el modelo a otros formatos específicos de *framework*.

El principal beneficio del despliegue en ONNX radica en que el modelo se ejecuta completamente de forma local en el navegador, sin requerir servidores externos ni procesamiento en la nube. Esto permitió mejorar los tiempos de respuesta, evitar la transmisión de datos sensibles y garantizar una mayor autonomía del sistema, permitiendo su funcionamiento incluso en contextos con conectividad limitada.

El aplicativo web fue probado en dispositivos de gama media: un PC portátil (Intel i5, 16 GB RAM) y en un smartphone Android (Snapdragon 778G). Se obtuvo una latencia promedio de 62 ms y 86 ms, respectivamente, con un rendimiento de 26 y 24 FPS. El tamaño total de descarga de la aplicación fue de ~42 MB, considerando a la experiencia de usuario como “buena” al no presentar caídas de fotogramas ni retardos al moverse entre panoramas.

Discusión

Nazare et al., (2024) sostiene que las plataformas de virtualización de ecosistemas facilitan la interacción con entornos naturales sin desplazamiento físico, contribuyendo a su preservación. Debido a esto, se considera que el proceso de identificación de senderos en el Bosque Protector Murocomba mediante imágenes 360° optimiza la digitalización del entorno sin afectar su conservación. Este proceso define puntos estratégicos para capturar imágenes en 360°, permitiendo crear un recorrido virtual que refleja la biodiversidad y características geográficas del bosque. La selección de senderos considera accesibilidad, atractivo visual y riqueza ecológica, priorizando rutas con alta diversidad de flora para entrenar un modelo de entrenamiento que identificará especies vegetales. La calidad de los datos es clave, ya que una selección inadecuada limitaría la precisión del modelo. Se enfrentaron a desafíos para equilibrar la representación del ecosistema con la viabilidad técnica de la captura, usando herramientas de geolocalización para trazar rutas eficientes.

Vongpaxa (2024) destaca que la tecnología WebVR documenta espacios patrimoniales, fomentando su conservación y accesibilidad. El recorrido virtual del Bosque Protector Murocomba, desarrollado con imágenes 360° y Pano2VR, se alinea con esta idea al permitir una exploración remota inmersiva sin impactar el ecosistema.

Usando Pano2VR por su compatibilidad multiplataforma, se procesaron imágenes RAW y JPEG, corregidas para eliminar distorsiones y convertidas a formato equirectangular, asegurando una visualización fluida. Las escenas, organizadas por ubicación real, se conectaron con nodos para transiciones suaves, mientras que hotspots interactivos añadieron datos educativos sobre especies vegetales. La interfaz optimizada y la exportación en HTML5/WebVR garantizan accesibilidad universal.

Cabe destacar que, aunque se lograron transiciones fluidas entre panoramas, las limitaciones por la gran cantidad de contenido multimedia que es necesaria para representar de manera fiel al ecosistema fueron una limitante, a diferencia de los entornos simulados que propone el autor antes mencionado, lo que destaca una necesidad de optimización para una virtualización de entornos reales.

Cho y Park (2023) destacan que las redes neuronales en entornos digitales optimizan la identificación visual, potenciando el aprendizaje automatizado. En este marco, el modelo YOLOv8n integrado en el recorrido virtual del Bosque Protector Murocomba demuestra su eficacia al identificar especies vegetales con precisión, enriqueciendo la exploración remota del ecosistema.

La aplicación web combina el modelo de reconocimiento con un recorrido inmersivo, permitiendo a los usuarios visualizar en tiempo real datos sobre especies, como clasificación y distribución, sin impactar el bosque. Esta integración fomenta la conservación y el estudio ecológico. La capacidad del sistema para procesar imágenes rápidamente apoya el monitoreo ambiental, aunque su precisión depende de la calidad del dataset y las condiciones del entorno. Incorporar validación manual o ajustes finos podría reducir errores.

Además, la interfaz intuitiva amplía el uso de la herramienta más allá de la investigación, beneficiando a estudiantes y ecoturistas interesados en la biodiversidad del bosque, alineándose con el potencial educativo y científico señalado por Cho y Park.

Conclusiones

La identificación de senderos ecoturísticos en el Bosque Protector Murocomba se logró exitosamente, asegurando una representación precisa del ecosistema en el recorrido virtual. La selección estratégica de rutas permitió capturar imágenes en 360°, documentando la biodiversidad del bosque y facilitando su posterior digitalización. Esta base sólida contribuirá a futuras iniciativas de conservación y monitoreo ambiental. Sin embargo, el desafío de equilibrar la representatividad del ecosistema con las limitaciones técnicas sugiere la necesidad de refinar las técnicas de captura en futuras expediciones, incorporando métodos que reduzcan la dependencia de condiciones ambientales variables.

La construcción del recorrido virtual inmersivo a través de imágenes 360° y su integración con Pano2VR proporcionó una experiencia interactiva y accesible. La correcta estructuración de escenas y la implementación de hotspots enriquecieron la exploración digital del bosque, optimizando la visualización de su biodiversidad y fomentando su uso educativo y científico. El diseño del recorrido virtual representa un paso adelante en la accesibilidad remota, gracias a ser exportado en formato HTML5. Esta solución multiplataforma permite a los usuarios explorar el bosque de manera inmersiva sin impacto directo. La optimización para una visualización fluida ha sido un logro notable, aunque la carga de contenido multimedia plantea retos de rendimiento, especialmente en dispositivos de baja capacidad. Para superar esta limitación, se propone explorar técnicas de compresión avanzadas y adaptaciones específicas para entornos móviles, asegurando que el recorrido sea una herramienta inclusiva y sostenible a largo plazo.

El entrenamiento del modelo YOLOv8n y su despliegue en la aplicación web han consolidado un sistema efectivo para la identificación de especies vegetales, superando enfoques previos con una mayor precisión y fluidez en la detección. La integración del modelo en el recorrido virtual enriquece la experiencia educativa, ofreciendo información en tiempo real sobre la flora del bosque y apoyando el monitoreo ecológico sin intervención física. A pesar de su éxito, la dependencia de la calidad del dataset y las condiciones del entorno indica la necesidad de expandir la diversidad de especies analizadas y refinar la interfaz para usuarios no expertos. Como siguiente paso, se sugiere incorporar detección de fauna, realizar evaluaciones extensivas con diversos públicos y colaborar con entidades locales para un monitoreo continuo, fortaleciendo así el impacto conservacionista y educativo del proyecto.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Los autores declaran que, en la elaboración del presente artículo, no se ha utilizado herramientas de la IA.

Referencias

Cho, Y., & Park, K. S. (2023). Designing Immersive Virtual Reality Simulation for Environmental Science Education. *Electronics* 2023, 12(2), 315. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12020315>

- Guo, K., Fan, A., Lehto, X., & Day, J. (2021). Immersive Digital Tourism: The Role of Multisensory Cues in Digital Museum Experiences. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 47(6), 1017–1039. <https://doi.org/10.1177/10963480211030319>
- Schöne, B., Kisker, J., Lange, L., Gruber, T., Sylvester, S., & Osinsky, R. (2023). The reality of virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 14. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2023.1093014>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). *Deep Residual Learning for Image Recognition* (pp. 770–778). <http://image-net.org/challenges/LSVRC/2015/>
- Nazare, A.-K., Moldoveanu, A., & Moldoveanu, F. (2024). Virtual Journeys, Real Engagement: Analyzing User Experience on a Virtual Travel Social Platform. *Information*, 15(7), 396. <https://doi.org/10.3390/info15070396>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection* (pp. 779–788). <http://pjreddie.com/yolo/>
- Rodríguez-Lira, D.-C., Córdova-Esparza, D.-M., Álvarez-Alvarado, J. M., Romero-González, J.-A., Terven, J., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2024). Comparative Analysis of YOLO Models for Bean Leaf Disease Detection in Natural Environments. *AgriEngineering*, 6(4), 4585–4603. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040262>
- Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *Journal of Big Data*, 6(1), 1–48. <https://doi.org/10.1186/S40537-019-0197-0/FIGURES/33>
- Vongpaxa, V. (2024). Application of WebVR Technology for 360-Panoramic Heritage Exploration: A Case Study of Wat Phou Heritage, Laos. *Engineering and Technology Journal*, 09(11). <https://doi.org/10.47191/ETJ/V9I11.01>