

Explorando las Profundidades: Reconstrucción de Cuevas y Detección de Murciélagos mediante Imágenes Infrarrojas

Exploring the Depths: Cave Reconstruction and Bat Detection Using Infrared Imaging

Explorando as Profundezas: Reconstrução de Cavernas e Detecção de Morcegos Usando Imagens Infravermelhas

Israel Cruz Rangel^{1(*)}, José-Ángel Arroyo-Romero², Isabel Bárcenas-Reyes³, José-Joel González-Barbosa⁴, Juan Bautista Hurtado-Ramos⁵, Francisco-Javier Ornelas-Rodríguez⁶, Alfonso Ramírez-Pedraza⁷

Recibido: 11/10/2024

Aceptado: 26/01/2025

Resumen. - Nuestro objetivo es proporcionar información detallada y precisa sobre las cuevas y la dinámica de la población de quirópteros (murciélagos) que las habitan nos permite comprender las dimensiones y requerimientos del hábitat, monitorear tamaños de poblaciones, desarrollar planes de manejo y conservación específicos. Por tanto, aumentamos nuestro entendimiento de los murciélagos con su entorno y mejoramos la prevención de enfermedades zoonóticas. En este artículo presentamos el desarrollo de una plataforma portátil multisensor, compuesta por una cámara RGB, dos cámaras infrarrojas, sensores inerciales y un par de luces infrarrojas. Esta plataforma permite la detección de quirópteros y la reconstrucción de las cuevas donde habitan. Ejecuta un algoritmo en tiempo real, generando un mapa de nube de puntos y facilitando la observación y detección de los quirópteros. La plataforma fue probada en condiciones reales en diferentes cuevas del estado de Guanajuato por personal del “Comité Estatal para el Fomento y la Protección Pecuaria”.

Palabras clave: murciélago, reconstrucción 3D, YOLO, conteo automático.

(*) Autor de correspondencia

¹ Maestría en Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, México, icruzr1900@ipn.alumno.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-9112-7025>

² Maestría en Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, México, jarroyor2100@alumno.ipn.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-9185-4307>

³ Doctorado en Educación de Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, México, ibr.mvz@hotmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8386-6560>

⁴ Doctorado en Ciencias de la Computación y Telecomunicaciones, Instituto Politécnico Nacional, México, jgonzalezba@ipn.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6720-8282>

⁵ Doctorado en Óptica, Instituto Politécnico Nacional, México, jbautistah@ipn.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2663-2463>

⁶ Doctorado en Óptica, Instituto Politécnico Nacional, México, fornelasr@ipn.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2465-188X>

⁷ Doctorado en Tecnología Avanzada, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI, México, aramirez_ixm@ipn.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0366-6249>

Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 28 (2025). pp. 110-125

<https://doi.org/10.36561/ING.28.9>

ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106 – Universidad de Montevideo, Uruguay

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de una licencia de uso y distribución CC BY-NC 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Summary. - Our objective is to bring detailed and precise information about caves and the bat's population dynamics which allows to comprehend the habitat's shapes and dimensions, monitor population size, and development of conservation and specific control plans. And facilitate the study of the relations between bats and their environment. Thus, increasing prevention and understanding of zoonotic diseases. In this article we present the development of a portable multi-sensor platform, integrated by a RGB depth camera, two Infra-Red (IR) cameras, and IR illuminators. With an autonomy of two hours. This platform can detect chiroptera (bats) and reconstruct their nesting caves. Performing real time algorithm, to transform the caves into a point cloud, helping in observation and detection of chiroptera. This platform was tested in real conditions with different caves of the Guanajuato state by the personnel of "Comité Estatal para el Fomento y la Protección Pecuaría".

Keywords: Bat, 3D reconstruction, YOLO, Automated Counting.

Resumo. - Nosso objetivo é trazer informações detalhadas e precisas sobre cavernas e a dinâmica populacional de morcegos, o que permite compreender as formas e dimensões do habitat, monitorar o tamanho populacional e desenvolver planos de conservação e controle específicos. E facilitar o estudo das relações entre morcegos e seu ambiente. Assim, aumentando a prevenção e a compreensão de doenças zoonóticas. Neste artigo, apresentamos o desenvolvimento de uma plataforma multissensor portátil, integrada por uma câmera de profundidade RGB, duas câmeras de infravermelho (IR) e iluminadores IR. Com autonomia de duas horas, esta plataforma pode detectar quirópteros (morcegos) e reconstruir suas cavernas de nidificação. Executando um algoritmo em tempo real, para transformar as cavernas em uma nuvem de pontos, auxiliando na observação e detecção de quirópteros. Esta plataforma foi testada em condições reais com diferentes cavernas do estado de Guanajuato pelo pessoal do "Comité Estatal para o Fomento e a Proteção Pecuaría".

Palavras-chave: Morcego, reconstrução 3D, YOLO, Contagem Automatizada.

1. Introducción. - El estudio de quirópteros abarca diversos aspectos biológicos utilizados para el desarrollo de la humanidad como la medicina, modelos bio-inspirados en áreas como la robótica [1] y ecológicos como las cadenas tróficas, los ciclos de polinización [2] y como reservorios microbiológicos. Los quirópteros intervienen en numerosos ciclos biológicos. Los quirópteros en ocasiones son los únicos polinizadores de varias especies de plantas [3]. Es conocido que los quirópteros usan refugios artificiales como túneles, puentes y minas abandonadas, así como los huecos de los árboles [4]. Sin embargo, algunos estudios ecológicos han demostrado que las características del refugio artificial suelen ser no aptas para la supervivencia de sus colonias, lo cual representa una desventaja para su ciclo reproductivo [5]. Las cuevas son refugios naturales que cuentan con la temperatura y humedad favorable para la supervivencia de los quirópteros, por lo que son hábitats clave para muchas especies de murciélagos durante el tiempo de crianza [6]. En la reciente década y más aún derivado de la pandemia COVID-19, estudiar el estado actual de conservación y las tendencias de población de los quirópteros representa un desafío, principalmente en sus refugios naturales que son entornos de investigación valiosos para mejorar la comprensión sobre la ecología, comportamiento, fisiología y evolución de estas especies y su biodiversidad [7]. Este monitoreo se dificulta más debido a que este tipo de refugios son oscuros y poseen escondrijos, como grietas, cavidades, rocas y paredes con poca inestabilidad estructural, lo que limita el acceso del personal de vigilancia epidemiológica de enfermedades transmitidas por vectores y del personal operativo de vigilancia para la preservación y conservación de los murciélagos. Esto es un factor condicionante para la planificación de las estrategias diagnósticas, preventivas y de control de enfermedades en la salud humana y animal, principalmente la de fauna silvestre como los murciélagos de México [6].

En la reciente década y más aún derivado de la pandemia COVID-19, estudiar el estado actual de conservación y las tendencias de población de los quirópteros representa un desafío, principalmente en sus refugios naturales que son entornos de investigación valiosos para mejorar la comprensión sobre la ecología, comportamiento, fisiología y evolución de estas especies y su biodiversidad [7]. Este monitoreo se dificulta más debido a que este tipo de refugios son oscuros y poseen escondrijos, como grietas, cavidades, rocas y paredes con poca inestabilidad estructural, lo que limita el acceso del personal de vigilancia epidemiológica de enfermedades transmitidas por vectores y del personal operativo de vigilancia para la preservación y conservación de los murciélagos. Esto es un factor condicionante para la planificación de las estrategias diagnósticas, preventivas y de control de enfermedades en la salud humana y animal, principalmente la de fauna silvestre como los murciélagos de México [6]. El monitoreo de los quirópteros y los tipos de refugios que habitan puede ser optimizado con el uso de técnicas de reconstrucción tridimensional como herramientas de planificación de la conservación útiles para detectar refugios naturales con las características estructurales óptimas para el establecimiento o hábitat potencial para los quirópteros [8]. Por ejemplo, el trabajo presentado en [9] muestra cómo se pueden implementar soluciones más tecnificadas a estas problemáticas.

En [10] presentan un estudio tridimensional de cuevas en la naturaleza, los autores buscan la adquisición simplificada de la topografía de cuevas comparando un escáner láser terrestre, un portátil basado en SLAM y una cámara fotográfica. En [11] muestran la importancia de la investigación de cuevas. Los esfuerzos cartográficos tradicionales consumen mucho tiempo y son subjetivos, motivando el desarrollo de técnicas utilizando escáneres terrestres y sistemas LiDAR móviles para la generación de mapas precisos similares a la cartografía tradicional. En [12] muestran dispositivos móviles autónomos en entornos confinados, sistemas de túneles subterráneos y cuevas. Los escenarios sin GPS, requieren técnicas de mapeo foto realistas, realizando simulaciones con un sistema de túneles subterráneos realistas y en escenarios representativos del mundo real. Algunos trabajos realizan aplicaciones terrestres subterráneas y marinas como muestra algunos trabajos realizan aplicaciones terrestres subterráneas y marinas como muestra en [13] evalúa un sistema portátil de mapeo con LiDAR, llamado PoLiMap, que usa un sensor Livox Avia y un algoritmo modificado de FAST-LIO-SLAM. Usado para aplicaciones de entornos como túneles, muestran la importancia y aplicaciones de este tipo de mapas. En [14] presenta el levantamiento arqueológico de una cueva subterránea mediante mapeo tridimensional utilizando 62 escaneos TLS, generando 1.5 mil millones de puntos, y se utilizó el algoritmo Poisson para reconstruir el modelo 3D. utilizando la nube de puntos para un análisis detallado de interés arquitectónico. En [15] presenta el diseño, implementación de un sistema para explorar minas subterráneas inundadas. Utilizando un mapa topológico generado por un módulo de SLAM. Dado que el mapa puede contener errores e incertidumbres, se define una métrica de distancia para la correspondencia de nodos, permitiendo al robot localizarse y moverse en el mapa.

La visión por computadora ha incrementado notablemente su potencial debido a los avances en aprendizaje automático, convirtiéndose en una herramienta cada vez más utilizada por biólogos e investigadores para el estudio de poblaciones animales. Por ejemplo, investigadores en Israel han implementado esta tecnología para contabilizar el número de grullas comunes, utilizando imágenes termográficas captadas desde vehículos aéreos no tripulados (UAVs) [16]. El plumaje de las grullas, al presentar una reflectividad distinta a los cultivos circundantes facilita el conteo mediante el procesamiento de imágenes en infrarrojo lejano (TIR) antes de ser analizadas por la red neuronal YoLo V3. Aunque nuestro enfoque es similar, existen diferencias notables en cuanto al tipo de fauna estudiada y la metodología aplicada. Las grullas son animales de mayor tamaño, y no se ven afectadas significativamente por la presencia de los UAVs, los murciélagos que son objeto de nuestro estudio, su comportamiento se ve alterado ante la presencia de estos dispositivos.

Por otro lado, otro grupo de investigadores ha utilizado imágenes termográficas TIR para observar primates en las copas de los árboles, quienes son visibles debido a la temperatura de sus cuerpos [17]. Este método muestra la utilidad de estudiar la fauna mediante tecnología avanzada, aunque resaltamos que el uso de equipos TIR es considerablemente más costoso en comparación con los equipos NIR más económicos, como las Arducam IR que emplea nuestro sistema.

Un estudio realizado en Nebraska, Estados Unidos, por Hu et al. aborda la complejidad del uso de técnicas de visión por computador y aprendizaje automático para el estudio de ecosistemas, centrándose específicamente en aves de estuario [18]. Este estudio es particularmente interesante debido a su enfoque en el desarrollo de software destinado a facilitar la utilización de la visión por computadora a investigadores de vida silvestre, implementando tecnologías de etiquetado automático y la detección de áreas extensas. Sin embargo, los autores concluyen que es posible que su tecnología no funcione con la misma precisión en diferentes escenarios.

Una aplicación de software para el conteo de murciélagos desarrollada en MatLab fue presentada por Bentley et al. [19]. Sin embargo, esta herramienta también se basa en la colocación de una cámara de imágenes termografías (TIR) en una posición fija, operando bajo el supuesto de que los murciélagos cruzarán su campo visual. McFarlane [20] hace un estudio sobre las poblaciones de murciélagos en las cuevas de Guangtong en Borneo. McFarlane escoge específicamente dichas cuevas porque había estudios previos en ellas, realizan escaneos 3D de las cavernas con un equipo FARO. A partir de estimar el número de murciélagos que pueden estar presentes en función de la densidad de murciélagos por unidad de área, y luego multiplicar esta densidad por el área o volumen total del refugio. También implica contar el número de murciélagos que salen de un refugio. Generalmente, los observadores cuentan manualmente los murciélagos que salen en un periodo de tiempo determinado y luego extrapolan para estimar el tamaño total de la colonia.

Los investigadores en [21] han desarrollado un sistema automatizado de respuesta conductual que integra experimentos de reproducción sonora en estudios con cámaras trampa, las cuales se activan mediante un sensor de movimiento. Esta estrategia, que también activa bocinas, es crucial para observar el comportamiento de los animales salvajes ante sonidos asociados a la caza furtiva, representando una excelente estrategia de ahorro de baterías. En [22] proponen un diseño de hardware específico para el estudio de libélulas en cuerpos de agua, utilizando cámaras trampa centradas en estructuras como postes, facilitando la observación de animales pequeños y rápidos. Esta tecnología es relevante para entender el desempeño de cámaras trampa en la detección de animales pequeños y escurridizos, como los murciélagos, dado que ambos comparten la dificultad de ser detectados debido a su reducido tamaño. En cuanto al conteo de quirópteros, en [23] han diseñado un dispositivo que produce barreras de luz infrarroja, situadas en las oquedades que permiten el ingreso y salida de los murciélagos de sus refugios. Este estudio, realizado en Alemania, se centró en poblaciones hibernantes, una condición que no se aplica a las especies de nuestro estudio, como *Desmodus rotundus*. Además, el uso de estas barreras luminosas exige un equipo que pueda cubrir completamente la entrada del refugio y que sea adaptable a las variaciones de cada uno, especialmente en entornos silvestres.

Las cámaras tradicionales que proporcionan imágenes RGB presentan problemas de adquisición en el hábitat natural de los quirópteros, ya que estas cámaras tradicionales no funcionan eficazmente en escenarios con ausencia de luz. El uso de sistemas combinados como las cámaras de infrarrojas pueden proporcionar una respuesta en entornos visuales desafiantes. La detección de quirópteros, así como la reconstrucción de las cuevas que son habitadas por estos mamíferos exige que el equipo sea liviano, compacto y portátil.

Este estudio propone un sistema autónomo, ligero y fácil de transportar que cuente con dos funcionalidades principales: 1) la adquisición de imágenes infrarrojas para la detección de murciélagos y 2) la reconstrucción tridimensional de su hábitat que destaque por su capacidad para generar mapas virtuales sin necesidad de referencias.

1.1 Objetivos. -

- Evaluar la efectividad de una cámara infrarroja (IR) en expediciones en cuevas y otros espacios naturales para la detección de quirópteros.
- Obtener imágenes infrarrojas (IR) que puedan ser utilizadas en el entrenamiento de redes neuronales para el conteo automático de quirópteros.
- Obtener imágenes de profundidad que posibiliten la realización de reconstrucciones tridimensionales de las cuevas habitadas por quirópteros.

Dentro de este trabajo, la pregunta de investigación que respondemos es la siguiente: ¿Cómo pueden las tecnologías de imagen infrarroja y de profundidad, junto con redes neuronales, mejorar la detección, monitoreo y modelado de los hábitats de quirópteros en cuevas y otros espacios naturales, asegurando una tasa de detección correcta mínima del 85% en condiciones de funcionamiento?

2. Desarrollo. -

2.1 Descripción del área de estudio. - Un desafío importante en el estudio de cuevas habitadas por quirópteros es la capacidad de acceder a ellas. En el municipio de Xichú en el estado de Guanajuato, México. El Comité Estatal para el Fomento y Protección Pecuaria responsables del control biológico de estas especies necesitan caminar grandes distancias de hasta 14 km, como se muestra en la Figura XII. Regularmente el personal carga con redes de niebla, equipo de seguridad, por lo que el peso del equipo es una condicionante importante. Por esta razón el equipo proporcionado debe ser un sistema de adquisición pequeño, estable y de poco peso que faciliten el trabajo del personal.

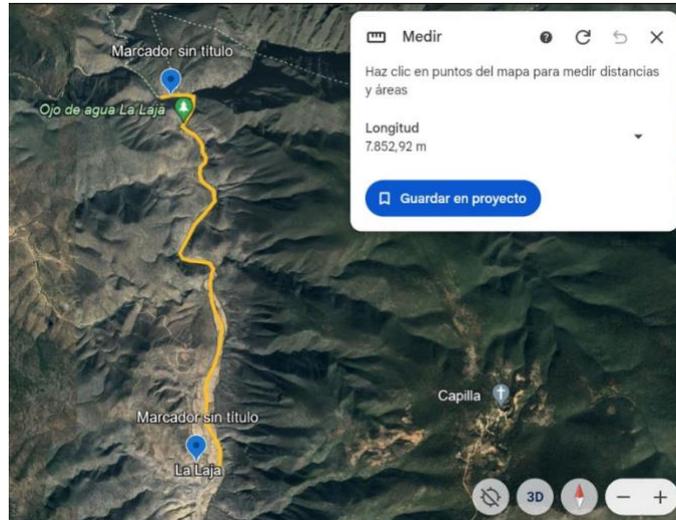


Figura I. Recorrido realizado para llegar al nicho de los murciélagos desde el ultimo acceso vehicular y hasta la entrada a la cueva con la ayuda de un mapa de Google.

Los refugios de anidación de los murciélagos son en su mayor parte de difícil acceso. Aunque se trata en algunos casos de excavaciones a pie de carretera, principalmente minas abandonadas, también hay minas muy internadas en zonas naturales. Muchas veces hay que atravesar caminos irregulares, así como obstáculos peculiares, llámense ríos, arenales, formaciones rocosas, maleza, entre muchos otros. Así mismo, cuando se trata de excavaciones mineras la orografía dentro de las cuevas suele ser bastante transitable. Pero en ocasiones nos topamos con túneles, rocas afiladas y caminos sinuosos e irregulares (ver Figuras II y XII). En el caso de esta expedición, nos topamos además con condiciones de alta humedad en las cuevas, y calor sofocante, por lo que el equipo a utilizar opera correctamente en esas condiciones. El equipo debe estar protegido para soportar golpes y pinchazos puesto que en determinadas zonas de la cueva los espacios son sumamente reducidos, como se muestra en la Figura III. Utilizando un equipo de adquisición equipado con una cámara de profundidad para una reconstrucción tridimensional, un par de cámaras infrarrojas para la detección de quirópteros, un par de luces IR (infrarrojo) proyectando hacia adelante y hacia arriba y sensores inerciales. El estudio de cuevas requiere atención y es peligroso debido al riesgo de lesiones al operar en la oscuridad y la inestabilidad estructural del entorno. Este trabajo compacta las necesidades de realizar observaciones de quirópteros con el análisis del entorno obteniendo un mapa tridimensional de dimensiones conocidas de una cueva, así como la detección de especies que en esta habitan.



Figura II Imágenes de la orografía de Xichú hacia la cueva



Figura III. Las imágenes muestran ejemplos de las condiciones de trabajo dentro de las cuevas de Xichú

2.2 Materiales. - Para el desarrollo de este trabajo construimos un sistema portátil. Se utilizó una estructura equipada con una cámara Intel D435i (es una cámara estereoscópica utiliza dos sensores de profundidad y una cámara RGB para capturar imágenes tridimensionales e IMU integrada). La cámara estereoscópica tiene una resolución de hasta 1280x720 y puede alcanzar hasta 90 FPS en modo de profundidad y hasta 30 fps en modo RGB. La arquitectura multisensor propuesta también cuenta con dos cámaras IR que se conectan a través de un puerto USB 3.0. con una configuración estereoscópica para la detección de quirópteros. Al sistema portátil le incluimos un par de luces infrarrojas. El sistema cuenta con un mini pc Intel i7 a 3.6 GHz con 16 g de memoria RAM con un sistema operativo Ubuntu 20.04 utilizando el entorno de trabajo de ROS (*Robot Operating System*). ROS es una modular que permite crear componentes de software para diferentes tareas, los nodos de software se ejecuten de manera independiente y se comunican entre sí de manera eficiente. La imagen mostrada en la Figura IV muestra un esquema de nuestro sistema. El dispositivo funciona con un banco de energía portátil, asegurando hasta 2 horas de uso continuo. El peso total del dispositivo es 3 kilogramos, y está diseñado para ofrecer adaptabilidad, puede integrar sensores adicionales como se muestra en la Figura. La Figura V muestra la arquitectura propuesta, los componentes utilizados son:

- Monitor touch screen. Esta pantalla nos permite a través del tacto, seleccionar una de las dos funcionalidades propuestas, además de visualizar en tiempo real los resultados tanto de la grabación de imágenes infrarrojas o la reconstrucción tridimensional de la caverna
- Cámara de profundidad D435i. Es una cámara de profundidad que combina sensores IR, una cámara RGB de alta resolución y una unidad de medición inercial (IMU) para capturar datos tridimensionales. Proporciona información detallada de profundidad y movimiento en tiempo real, (ver Figura VI(a)).
- Iluminación IR. La iluminación infrarroja permite iluminar los objetos dentro de la cueva, asegurando que los tipos de objetos sean visibles en la imagen infrarroja capturada con la mejor calidad posible. • Cámaras NIR. El sistema cuenta con un par de cámaras NIR, que nos permiten capturar imágenes en entornos oscuros, como cuevas, sin necesidad de iluminación en el rango visible.
- Convertidor. El sistema de alimentación es de corriente continua (DC) a 12 voltios. Sin embargo, algunos dispositivos funcionan con este voltaje, otros, como la PC, requieren 19 voltios. El convertidor nos permite realizar las adaptaciones de voltaje necesarios.
- Tres bancos de baterías. Las baterías utilizadas son de litio. Un banco de baterías alimenta el sistema de iluminación infrarroja, otro banco suministra energía a la PC, y el último se encarga del monitor. Es importante destacar que el sistema una vez configurado puede funcionar sin necesidad de conectar el monitor.
- PC.: Un equipo de cómputo responsable de almacenamiento y procesamiento de la información adquirida por los sensores, equipada con un procesador AMD Ryzen 7 3750H y 16 GB DDR4 con un sistema operativo Linux.

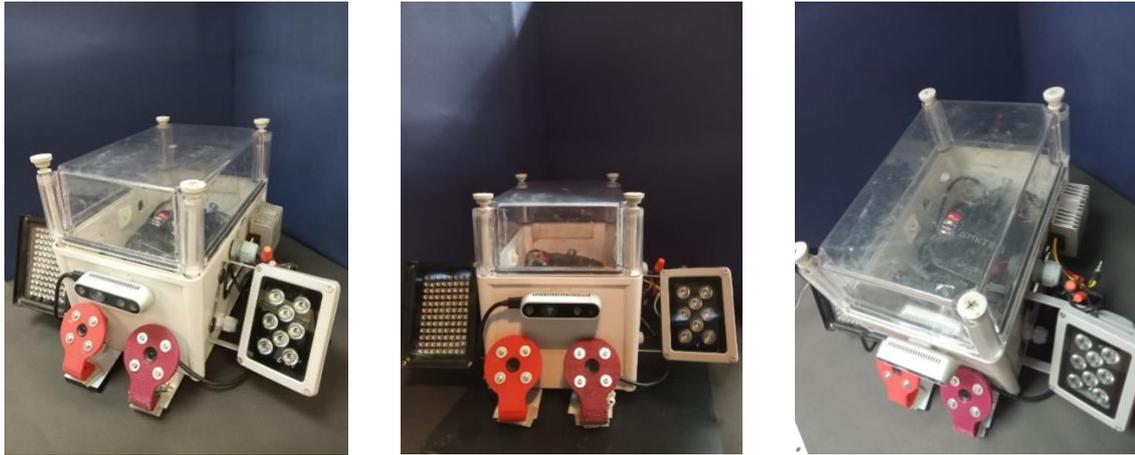


Figura IV Principales componentes del sistema

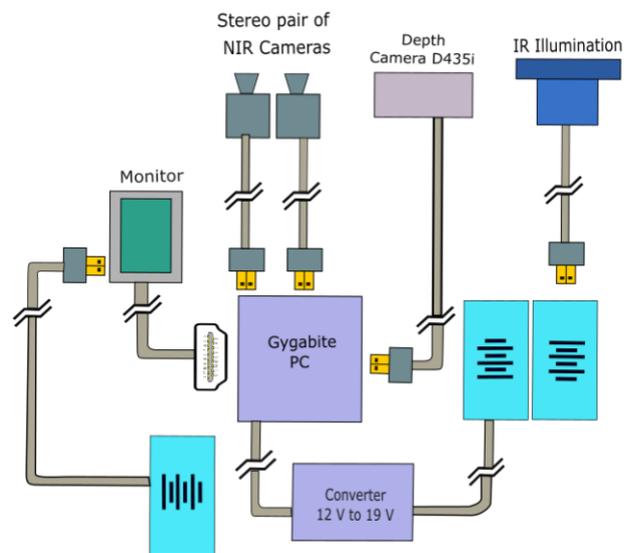


Figura V. Sistema de mapeo tridimensional y detección de Quirópteros



a)



b)



c)

Figura VI. Principales componentes del sistema a) cámara de profundidad que combina sensores IR, una cámara RGB de alta resolución y una unidad de medición inercial (IMU) para capturar datos tridimensionales. b) muestra una computadora GMXTEC con un procesador AMD Ryzen 7 3750H y 16 GB DDR4 con un sistema operativo Linux.

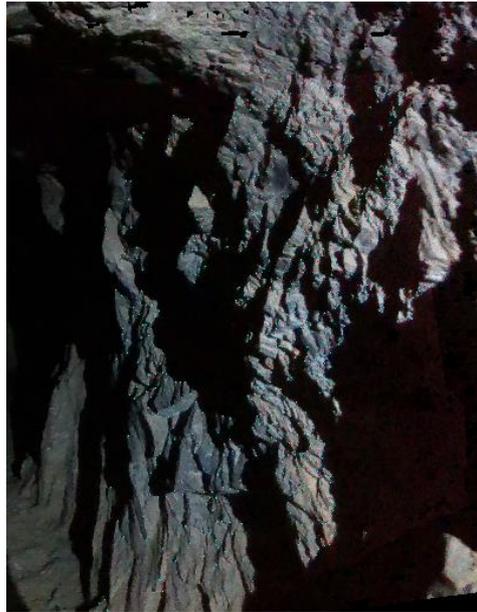


Figura VII. Posiciones de descriptores, puntos en verde, generados para la reconstrucción 3D. Un descriptor en una imagen es una representación matemática de características visuales específicas que permite identificar y comparar partes de la imagen.

2.3 Métodos. - Los métodos seleccionados para el análisis de imágenes fueron elegidos por su afinidad con los sensores utilizados. El Algoritmo 1 describe las etapas de la adquisición de los datos hasta la reconstrucción y detección de quirópteros en cuevas.

La cámara Intel RealSense D435i se calibra utilizando el software Intel RealSense SDK (*Software Development Kit*). La calibración se compone de dos etapas: la calibración intrínseca y extrínseca. La calibración intrínseca corrige las características geométricas y ópticas de la cámara y calibración extrínseca determina la relación espacial entre la cámara y otros sensores o dispositivos lo que garantiza que los datos de la cámara y los sensores estén correctamente alineados. Se capturan imágenes de patrones de calibración del tipo tablero de ajedrez identificado bordes y esquinas. Esto permiten hacer una comparación entre el plano imagen obtenida por la cámara a partir de mundo real. Mientras para los parámetros extrínsecos se realizan rotaciones controladas variando los ángulos del patrón, permitiendo encontrar relaciones de posición en el mundo con las imágenes obtenidas. Para la calibración extrínseca el software de RealSense procesa la información y ajusta para mejorar la precisión y la calidad de los datos capturados.

La reconstrucción 3D es una técnica utilizada para reconstruir un entorno tridimensional a partir de estimar la posición y orientación de una cámara, cambiando la perspectiva con una secuencia de imágenes extraídas a partir de las poses de la cámara. Mediante la calibración de la cámara es posible determinar la posición de la cámara en el mundo a partir de la superposición de fotogramas utilizando como referencia los puntos de interés en las imágenes llamados descriptores. El descriptor en un fotograma es un conjunto de píxeles con valores específicos. Las posiciones de los píxeles en la imagen se utilizan para comparar las intensidades y buscar coincidencias entre fotogramas consecutivos. Posteriormente, se optimiza la nube de puntos utilizando un punto en profundidad proporcionado por la cámara infrarroja, aplicando el método de Levenberg-Marquardt para actualizar la posición de la cámara. En la Figura VII se muestran los descriptores generados sobre la superficie de la cueva.

Para la reconstrucción del entorno tridimensional se realiza lo siguiente: Se captura información de la cámara infrarroja y los sensores inerciales mientras se desplaza el sistema por la cueva por la cueva. Se utilizan herramientas de software como OpenCV, para escalar la imagen. También se utiliza la biblioteca realsense2 para generar descriptores a partir de las esquinas y bordes para poder encontrar las relaciones entre fotogramas consecutivos conociendo. Utilizando los parámetros intrínsecos de la cámara infrarroja, podemos encontrar la dirección de cada descriptor en el mundo real. Los descriptores extraídos tienen como particularidad que puede identificar el mismo descriptor en adquisiciones consecutivas. La identificación del mismo descriptor en dos admisiones consecutivas nos permite calcular la coordenada en profundidad para generar una nube de puntos tridimensional donde D es un valor en profundidad que corresponde a las coordenadas (x, y) consideradas como coordenadas del plano imagen en píxeles como se muestra a continuación $(D(x, y))$. La ecuación 1 muestra las relaciones entre estos tres parámetros permitiendo un punto que en conjunto formará la nube de puntos que permite reconstruir el objeto tridimensional Punto es $= (X, Y, Z)$.

$$X = \frac{x - c_x \cdot D(x, y)}{f_x}, \quad Y = \frac{y - c_y \cdot D(x, y)}{f_y}, \quad Z = D(x, y)$$

Los siguientes algoritmos describen la funcionalidad del software desarrollado en el prototipo

Algoritmo 1 Algoritmo de reconstrucción de cuevas y adquisición de datos para el conteo de quirópteros

```
1: init ← Encendido de la computadora
2: while batería OK o Computadora encendida do
3:   Opción ← Selección reconstrucción 3D o detección de quiópteros
4:   if Opción = reconstrucción 3D then
5:     3D_RECONSTRUCCIÓN() usando SLAM (ver algoritmo 2)
6:   else
7:     MURCEILAGOS_DETECCIÓN() (ver algoritmo 3)
8:   end if
9:   end ← parar el proceso
10: end while
```

Algoritmo 2 3D RECONSTRUCCIÓN. SLAM usando Descriptores de Imágenes Infrarrojas

```
1:  $M$  ← Inicializar mapa vacío
2:  $x_0$  ← Inicializar posición inicial de la cámara
3: Obtener la primera imagen infrarroja  $I_0$  y extraer descriptores  $D_0$ 
4: Guardar  $D_0$  en  $M$ 
5: for cada iteración  $t$  do
6:   Capturar nueva imagen infrarroja  $I_t$ 
7:   Extraer descriptores  $D_t$  de la imagen  $I_t$ 
8:   Estimación de Movimiento:
9:   Usar el sistema inercial y sensores del sistema construido para estimar el movimiento  $x_t^*$ 
10:  Asociación de Características:
11:  Comparar los descriptores  $D_t$  con los descriptores guardados en  $M$ 
12:  Si se encuentran características coincidentes, actualizar posición estimada del sistema construido  $x_t$ 
13:  Actualización del Mapa:
14:  if nuevas áreas no mapeadas son observadas then
15:    Actualizar el mapa  $M$  con los nuevos descriptores  $D_t$ 
16:
17:    Corrección de la Trayectoria:
18:    Usar técnicas de optimización (Filtro de Kalman) para corregir la estimación de la trayectoria del sistema construido  $x_t$ 
19:  end if
20: end for
21: Retornar mapa final  $M$  y trayectoria estimada del sistema construido
```

Algoritmo 3 MURCEILAGOS_DETECCIÓN. Reforzamiento del aprendizaje y detección de murciélagos en imágenes infrarrojas con YOLO

```
1: Inicializar modelo YOLO preentrenado  $model$ 
2: Definir porcentaje de imágenes infrarrojas con murciélagos etiquetados para entrenamiento  $p_{train}$  y detección  $p_{detect}$ 
3: Cargar conjunto de imágenes infrarrojas con murciélagos etiquetados  $infrared\_dataset$ 
4: División del Conjunto de Datos:
5: Dividir  $infrared\_dataset$  en  $train\_set$  y  $detect\_set$  según  $p_{train}$  y  $p_{detect}$ :
6:  $train\_set$  ←  $p_{train} \times infrared\_dataset$ 
7:  $detect\_set$  ←  $p_{detect} \times infrared\_dataset$ 
8: Entrenamiento del Modelo:
9: for cada imagen  $I$  en  $train\_set$  do
10:  Obtener la anotación de murciélagos para  $I$ 
11:  Usar  $I$  y su anotación para entrenar el modelo YOLO
12:  Actualizar pesos del modelo  $model$ 
13: end for
14: Detección de Murciélagos en Imágenes Infrarrojas:
15: Inicializar contador de imágenes con murciélagos detectados  $correct\_detections = 0$ 
16: Inicializar contador total de imágenes procesadas  $total\_infrared\_images = 0$ 
```

```
17: for cada imagen infrarroja Iir en detect_set do
18:     Obtener predicciones de YOLO sobre Iir
19:     if YOLO detecta murciélagos en Iir then
20:         Incrementar correct_detections
21:     end if
22:     Incrementar total_infrared_images
23: end for
24: Evaluación de Resultados:
25: Calcular la tasa de detección como:
```

$$Detection\ Rate = \frac{correct\ detections}{total\ infrared\ images}$$

```
26: Retornar Detection Rate como métrica de detección en imágenes infrarrojas
```

2.4 Resultados. - En esta sección se muestran los resultados generados del escaneo tridimensional de la cueva y la detección automática de murciélagos. El escaneo permite reconstruir el interior de la cueva, ofreciendo ventajas para los interesados en control y preservación de los quirópteros. Por ejemplo, permite explorar el refugio desde cualquier parte del mundo de forma virtual. El mapeo se genera a partir de una nube de puntos extraída de los fotogramas en tiempo real, se aportan las propiedades de textura y dimensiones. La Figura VIII muestra la reconstrucción basada en una nube de puntos a partir de los fotogramas obtenidos, en ella se muestra una textura bastante buena que permite al usuario darse una idea de lo accidentada que puede estar la cueva, así como las herramientas que podrían implementarse como las redes de niebla por mencionar alguna. En el caso de la imagen, se observa un terreno transitable que permitiría desplazarse de forma convencional manteniendo precauciones en el uso de equipo de protección personal, como cascos para evitar golpes y guantes derivados de la proximidad de las paredes al extraer las dimensiones de la cueva.

La reconstrucción del entorno virtual permite no solo conocer las dimensiones internas de los túneles habitados por quirópteros, también permite conocer algunas características en el que se encuentran los quirópteros, así como conocer las posibles rutas internas e incluso establecer el recorrido óptimo ya que muchos de estos lugares se encuentran conectados entre sus túneles. La Figura IX muestra la cueva sobre un mallado de un metro por un metro permitiendo encontrar la longitud de la cueva explorado aproximadamente 17 m de longitud. A partir del escaneo de la nube de puntos procesada hemos reconstruido el mapa 3D que contiene un total de 74 fotogramas a partir de imágenes RGB sobrepuestas con la misma cantidad de imágenes IR. El tiempo de procesamiento fuera de línea de aproximadamente 15 segundos.

La Figura X es un ejemplo de imágenes adquiridas por el sistema, se llevó fuera de línea un reforzamiento con YOLO como se muestra en el algoritmo 3. El porcentaje de detección (*Detection_rate*) es de 70%.



Figura VIII. Reconstrucción 3D de las cuevas

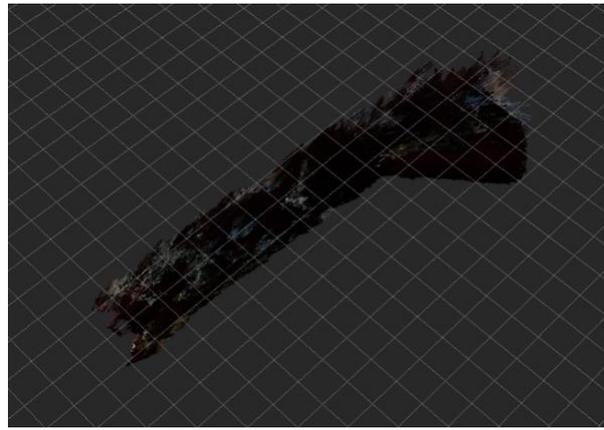


Figura IX. Cueva montada sobre un mallado de 1 m x 1 m a partir de los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara

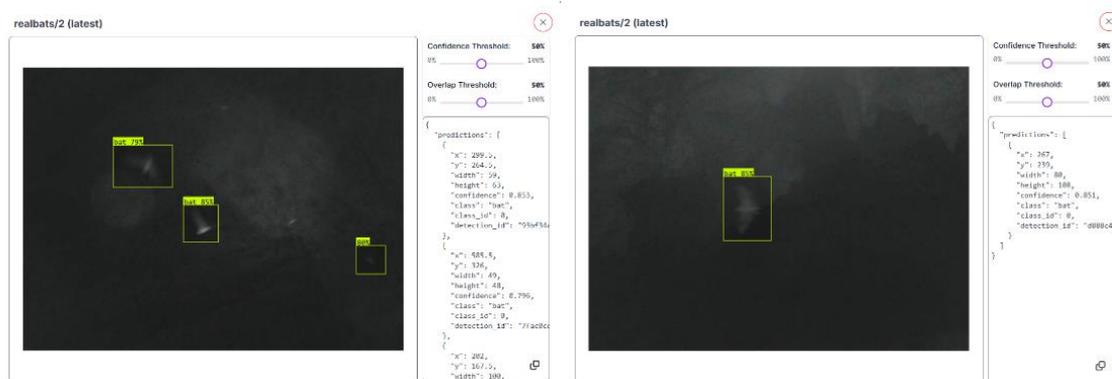


Figura X. Detección automática de murciélagos usando imágenes IR (infra rojas)

2.4.1 Análisis Estadístico. - Para evaluar el desempeño del mapeo y reconstrucción 3D, se tomó en cuenta la precisión de la reconstrucción mediante la reconstrucción del mapa virtual. Se realizó un mapa del entorno sensor láser HER-430, con las siguientes dimensiones 2.5m * 2.5m. En los resultados del mapa obtenido se aprecia mucha similitud con el mapa de referencia del entorno, se realizó un cálculo del RMSE obteniendo un valor de en 11.22mm lo que se considera insignificante para labores de mapeo.

Para evaluar la factibilidad del conteo automático de murciélagos, se entrenaron múltiples versiones de redes neuronales convolucionales con la plataforma Roboflow. Esta plataforma a través de Ultralytics mantiene las versiones más actuales de YOLO, así como modelos propios y basados en la COCO database. Se evaluaron 238 imágenes capturadas de murciélagos en sus refugios naturales capturadas bajo iluminación infrarroja, las cuales fueron aumentadas hasta formar un conjunto de entrenamiento de 840 imágenes. Es decir, procesadas para crear imágenes modificadas que ayudan a no sesgar el entrenamiento, en el sentido de que no se entrene la red con imágenes iguales, sino que hagan acercamientos, cambios en los colores, y agreguen ruido. Lo cual nos permite formar un modelo de inteligencia artificial mucho más robusto. De las 3754 imágenes, conforman: el conjunto de entrenamiento 630, el conjunto de validación 30 y el conjunto de pruebas 54. De esto obtenemos con una precisión de 98.0% para el modelo Roboflow 3.0 Object Detection (Accurate) luego de ser entrenado por 300 épocas. Y dando como resultado la matriz de la figura [F 10] que muestra que se clasificaron correctamente (a través de todas las épocas de entrenamiento) 3754 imágenes, hubo 117 Falsos Negativos y 9 Falsos Positivos.

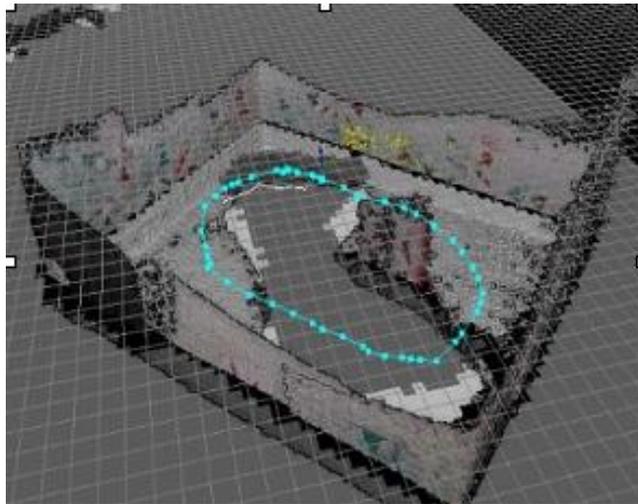


Figura XI. Reconstrucción de una trayectoria

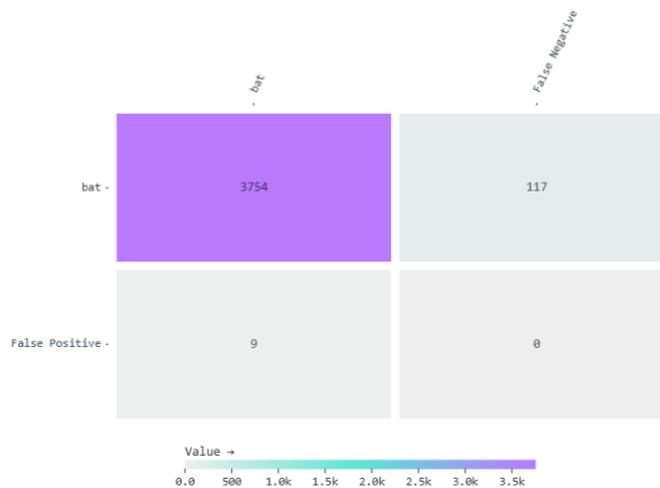


Figura XII. Matriz de confusión de YOLO para detección automática de quirópteros

2.4.2 Trabajos futuros. - En el presente trabajo se busca una arquitectura de adquisición confiable con el propósito de establecer una base de datos de cuevas habitadas por quirópteros, con el objetivo de identificar en el futuro posibles relaciones entre las características de las cuevas y las zonas seleccionadas por estos animales para habitar. Además, se pretende en un futuro cercano explorar la conexión entre el tipo de cueva y las especies de quirópteros que la ocupan. También se proyecta aumentar la cantidad de información disponible mediante la inclusión de mediciones sobre los niveles de oxígeno y otros gases presentes en cada cueva, lo que proporcionará datos más completos y útiles para el Comité Estatal para el Fomento y Protección Pecuaría del estado de Guanajuato, así como para otras entidades del país. Los dispositivos de medición deben ser de bajo consumo y portátiles como el presentado en [24]. Las redes neuronales profundas han demostrado ser eficientes en la clasificación [25], por lo que en trabajos futuros se detectarán murciélagos y serán clasificados.

3. Conclusiones. - El enfoque propuesto se distingue de las soluciones convencionales existentes ya que integra un sistema de detección basado en una configuración estéreo de cámaras infrarrojas funcionando como una cámara trampa que permite conocer dos aspectos funcionales de suma importancia para biólogos y veterinarios. De la experiencia tomada en las visitas a los refugios de los quirópteros, sean cuevas, minas u oquedades, podemos darnos cuenta observamos que el sistema de visión debe ser lo más portátil posible, debido a que los refugios de los murciélagos son de difícil acceso. Los murciélagos son muy veloces, la tasa de cuadros por segundo de captura de las fotografías debe ser alta. Por lo tanto, el sistema podría saturarse fácilmente de fotografías, especialmente considerando que se usaron cámaras en configuración estéreo, entonces, la cantidad de imágenes almacenadas se duplica con cada captura. El prototipo debe contar con discos duros deben ser de gran capacidad de almacenamiento. Al situarse en lugares remotos, todo el sistema debe ser sumamente autónomo. Es decir, debe tener un bajo consumo de baterías, y debe ser fácil de utilizar. Puesto que el tiempo para la captura de imágenes y de la expedición en general suele ser muy limitado. Así como debe de estar perfectamente aislado de agua y polvo y protegido contra golpes y caídas debido a lo accidentado

del terreno. El mapeo 3D es importante ya que facilita el trabajo de biólogos y veterinarios encargados del monitoreo y control de quirópteros. En este trabajo buscamos dar una solución utilizando el equipo portátil que diseñamos. Este paquete permite la reconstrucción de un entorno hostil y la detección de murciélagos por su versatilidad en convertirse un sistema de vigilancia (cámara trampa). Nuestros experimentos muestran que nuestro sistema puede reconstruir las cuevas habitadas por quirópteros y brindar información del entorno para la instalación de redes de niebla y equipo necesario para misiones futura, también nuestro experimento muestra que podemos detectar quirópteros con precisión, aunque actualmente requiere un procesamiento fuera de línea empleando una red YOLO con entrenamiento reforzado para la detección y etiquetado. Sin embargo, la detección de murciélagos está más allá del alcance de este trabajo, pero promete simplificar el trabajo de conteo e identificación de especies de quirópteros generando relaciones con el entorno en el que estas especies habitan en condiciones del mundo real. Consideramos que nuestra propuesta del sistemas y algoritmos puede servir como conjuntos de datos valiosos para futuros trabajos de investigación.

Fondos: Instituto Politécnico Nacional, SIP 20240650

Glosario

- Cuevas (Caves): Espacios subterráneos naturales que sirven como hábitats para diversas especies, incluyendo murciélagos, proporcionando protección y un ambiente ideal para la reproducción.
- Murciélagos (Bats): Quirópteros que desempeñan roles significativos en la ecología, como la polinización y el control biológico de plagas. Habitan en cuevas y son esenciales para el funcionamiento de diversos ecosistemas, a menudo enfrentando condiciones de vida desafiantes.
- Tecnología Infrarroja (Infrared Technology): Tecnología utilizada en el estudio para detectar murciélagos y reconstruir cuevas en condiciones de poca luz, lo que permite la observación y recolección de datos incluso cuando la visibilidad es escasa.
- Reconstrucción 3D (3D Reconstruction): Un proceso que crea un modelo tridimensional de los entornos de las cuevas mediante la captura y el procesamiento de imágenes de diversos sensores.
- Plataforma Multisensores (Multisensor Platform): Un sistema portátil diseñado para combinar cámaras RGB, cámaras infrarrojas, sensores inerciales y luces infrarrojas para detectar murciélagos y mapear las estructuras de las cuevas.
- Algoritmo en Tiempo Real (Real-Time Algorithm): Un algoritmo que procesa los datos a medida que se recopilan para generar un mapa de nubes de puntos con fines de análisis y monitoreo inmediatos.
- Nube de Puntos (Point Cloud): Una colección de puntos de datos en el espacio producida por el proceso de reconstrucción 3D, utilizada para analizar las dimensiones espaciales y las características de la cueva.
- Visión por Computadora (Computer Vision): Un campo interdisciplinario que consiste en permitir que las computadoras interpreten y procesen información visual del mundo, aplicado al estudio de las poblaciones animales.
- Sensor Inercial (Inertial Sensor): Un dispositivo que mide la fuerza específica, la tasa angular y, a veces, el campo magnético que rodea el sensor, contribuyendo al seguimiento de los movimientos y la orientación de la plataforma portátil.
- Cámara Estereoscópica (Stereoscopic Camera): Un sistema de cámaras que utiliza dos o más lentes para capturar imágenes que simulan la visión binocular humana, permitiendo la percepción de profundidad.
- Zoonosis (Zoonotic Diseases): Enfermedades que se transmiten de los animales a los humanos, destacando la importancia de entender las poblaciones de murciélagos para gestionar los riesgos para la salud pública.
- Batería de Litio (Lithium Battery): Baterías recargables utilizadas en la plataforma portátil multisensor, elegidas por su ligereza y alta densidad de energía.

Referencias

- [1] J. Colorado, A. Barrientos y C. Rossi, «Músculos inteligentes en robots biológicamente inspirados: Modelado, control y actuación,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 8, n° 4, p. 385–396., 2011.
- [2] K. F. Darras, M. Balle, W. Xu, Y. Yan, V. G. Zakka, M. Toledo-Hernández, D. Seng, W. Lin, B. Zhang y Z. Lan, «Eyes on nature: Embedded vision cameras for terrestrial biodiversity monitoring,» *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 15, n° 12, pp. 2262-2275, 2024.
- [3] S. J. Ghanem y C. C. Voigt, «Increasing Awareness of Ecosystem Services Provided by Bats,» *Advances in the Study of Behavior*, vol. 44, pp. 279-302, 2012.
- [4] D. Ortiz-Ramírez, C. Lorenzo, E. Naranjo y L. León-Paniagua, «elección de refugios por tres especies de murciélagos frugívoros (Chiroptera: Phyllostomidae) en la Selva Lacandona, Chiapas, México,» *Revista mexicana de biodiversidad*, vol. 77, n° 2, pp. 261-270, 2006.
- [5] R. Brigham y B. Fenton, «The influence of roost closure on the roosting and foraging behaviour of *Eptesicus fuscus* (Chiroptera: Vespertilionidae),» *Canadian Journal of Zoology*, vol. 64, pp. 1128-1133, 2011.
- [6] M. Labadie, N. Morand, R. Fabien, G. F. Nguilili, T. N’Kaya, A. Caron y H. De Nys, «Habitat sharing and interspecies interactions in caves used by bats in the Republic of Congo,» *PeerJ*, vol. 13, 2025.
- [7] S. Platto, Z. Jinfeng, W. Yanqing, W. Huo y E. Carafoli, «Biodiversity loss and COVID-19 pandemic: The role of bats in the origin and the spreading of the disease,» *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 538, pp. 2-13, 2021.
- [8] W. Tabib, K. Goel, J. Yao, C. Borium y N. Michael, «Autonomous Cave Surveying With an Aerial Robot,» *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, n° 2, pp. 1016-1032, 2022.
- [9] L. Espinasa, R. Tatarsky, M. Girard y M. Sandone, «Population Size and Spatial Distribution of the Mexican Blind Cavefish (*Astyanax*) within the Caves,» *Fishes MDPI*, vol. 9, n° 9, p. 334, 2024.
- [10] D. Giordan, D. Godone, M. Baldo, M. Piras, N. Grasso y R. Zerbetto, «Survey Solutions for 3D Acquisition and Representation of Artificial and Natural Caves,» *Applied Sciences*, vol. 11, n° 14, 2021.
- [11] H. Bravo, E. Lo, H. Moyes, D. Rissolo, S. Montgomery y F. Kuester, «A methodology for cave floor basemap synthesis from point cloud data: a case study of slam-based LiDAR at Las cuevas, Belize,» *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vols. 1 de 2X-M-1-2023, pp. 179-186, 2023.
- [12] H. Azpúrua, A. Rezende, G. Potje, G. Júnior, R. Fernandes, V. Miranda, L. Filho, J. Domingues, F. Rocha, F. Sousa, L. G. Barros, E. Nascimento, M. Douglas, G. Pessin y G. Freitas, «Towards Semi-autonomous Robotic Inspection and Mapping in Confined Spaces with the EspeleoRobô,» *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 101, 2021.
- [13] P. Trybała, P. Kujawa, K. Romańczukiewicz, A. Smentek y F. Remondino, «Designing and evaluating a portable lidar-based SLAM system,» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vols. 1 de 2XLVIII-1/W3-2023, pp. 191-198, 2023.
- [14] I. Marini, C. Caradonna, M. Melis y C. Nardinocchi, «Terrestrial laser scanning for 3D archaeological documentation. The prehistoric Cave of Sa Miniera de Santu Josi (Sardinia, Italy),» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2204, 2022.
- [15] C. Rossi, A. Caro Zapata, Z. Milosevic, R. Suarez y S. Dominguez, «Topological Navigation for Autonomous Underwater Vehicles in Confined Semi-Structured Environments,» *Sensors*, vol. 23, n° 5, 2023.
- [16] A. Chen, J. Moran, G. Shoshiani y M. Chater, «Using computer vision, image analysis and UAVs for the automatic recognition and counting of common cranes (*Grus grus*),» *Journal of Environmental Management*, vol. 328, 2023.

- [17] E. Gazagne, R. Gray, R. Ratajszczak, F. Brotcorne y A. Hambuckers, «Unmanned aerial vehicles (UAVs) with thermal infrared (TIR) sensors are effective for monitoring and counting threatened Vietnamese primates,» *Primates Springer*, vol. 64, n° 4, pp. 407-413, 2023.
- [18] H. Qiao, L. Zhang, J. Drahota, W. Woldt, D. Varner, A. Bishop, T. LaGrange, C. Neale y Z. Tang, «Combining Multi-View UAV Photogrammetry, Thermal Imaging, and Computer Vision Can Derive Cost-Effective Ecological Indicators for Habitat Assessment,» *Remote Sensing*, vol. 16, n° 6, p. 1081, 2024.
- [19] I. Bentley, V. Kuczynska, V. M. Eddington, M. Armstrong y L. N. Kloepper, «BatCount: A software program to count moving animals,» *Public Library of Science San Francisco, CA USA*, vol. 18, n° 3, 2023.
- [20] D. McFarlane, G. Van Rentergem, A. Ruina, J. Lundberg y K. Christenson, «Estimating colony size of the wrinkle-lipped bat, *Chaerephon plicatus* (Chiroptera: Molossidae) at Gomantong, Sabah, by quantitative image analysis,» *Acta Chiropterologica*, vol. 17, n° 1, pp. 171-177, 2015.
- [21] J. P. Suraci, M. Clinchy, B. Mugerwa, M. Delsey, D. W. Macdonald, J. Smith, C. C. Wilmers y L. Y. Zanette, «A new Automated Behavioural Response system to integrate playback experiments into camera trap studies,» *Methods in Ecology and Evolution Wiley Online Library*, vol. 8, n° 8, pp. 957-964, 2017.
- [22] A. Yoshioka, A. Shimizu, H. Oguma, N. Kumada, K. Fukasawa, S. Jingu y T. Kadoya, «Development of a camera trap for perching dragonflies: a new tool for freshwater environmental assessment,» *PeerJ*, vol. 8, 2020.
- [23] G. Krivek, E. Mahecha, F. Meier, G. Kerth y J. van Schaik, «Counting in the dark: estimating population size and trends of bat assemblages at hibernacula using infrared light barriers,» *Animal Conservation Wiley Online Library*, vol. 26, n° 5, pp. 701-713, 2023.
- [24] J. A. Tovar-Sánchez, J. F. Arias-Molina, H. A. Milquez-Sanabria y M. A. Mayorga-Castellanos, «Technical Design of a Low-Cost, Portable Methane Quantification System,» *Ingeniería*, vol. 28, 2023.
- [25] A.-M. Hernández-Ponce, F.-J. Ornelas-Rodríguez, J.-B. Hurtado-Ramos, P.-A. Ramírez-Pedraza y J.-J. González-Barbosa, «A Semi-Supervised Deep Learning Model for Defective lime Classification,» *Ingeniería e Investigación*, vol. 44, n° 3, pp. 1-14, 2024.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

ICR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JAAR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

IBR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JJGB ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

JBHR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

FJOR ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

ARP ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Gobertti.