



HEXÁPODO PARA BÚSQUEDA DE PERSONAS EN ZONAS RURALES

HEXAPOD FOR SEARCHING FOR PEOPLE IN RURAL AREAS

Kareen Lourdes Chávarry Sánchez
kchavarry@isthuamachuco.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-8540-3719>

Gloria Consuelo González Chacón
ggonzalez@isthuamachuco.edu.pe
<https://orcid.org/0009-0004-8335-8194>

Gianmartin Francisco De La Cruz
Mariños
gdelacruz@isthuamachuco.edu.pe
<https://orcid.org/0009-0000-6930-0261>

Freydman Santiago García Henríquez
fgarcia@isthuamachuco.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-0376-9195>

Luis Segundo Araujo Menacho
luarme_1997_@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-1268-2098>

Instituto de Educación Superior Tecnológico Público "Huamachuco", Huamachuco, Perú

Sugerencia como citar: Chávarry, K. L., González, G. C., De la Cruz, G.F., García, F. S. (2025). Hexápodo para búsqueda de personas en zonas rurales. Edición Especial (EE) Pág. 194-209, <https://mucin.nelkuali.com/>

Recibido: 04/11/2025

Aprobado: 05/12/2025

Publicado: 15 /12/2025

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial, diseñada para apoyar tareas de búsqueda en zonas rurales de difícil acceso. La investigación tiene como objetivo optimizar los procesos de localización de personas en entornos rurales mediante la implementación de un robot controlado a distancia que incorpore un sistema de visión asistida. El proyecto se desarrolló en tres etapas: diseño mecánico del sistema de locomoción para desplazamiento estable, integración de sensores ambientales y módulos electrónicos basados en Arduino, y programación de la visión artificial en Python para detección y transmisión de imágenes en tiempo real. La comunicación entre el operador y el robot se estableció a través de un sistema de radiocontrol que permitió la supervisión remota de la misión. Las pruebas experimentales demostraron un desplazamiento eficiente en terrenos irregulares y una detección precisa de objetos y variaciones ambientales, con transmisión estable de datos hacia una base MySQL. Este desarrollo evidencia el potencial de los robots radiocontrolados con visión artificial como herramientas de bajo costo para tareas de búsqueda, rescate y monitoreo en zonas rurales con limitada infraestructura tecnológica.

Palabras clave: robótica móvil, visión artificial, radiocontrol, búsqueda y rescate, innovación tecnológica.

Abstract

This article presents the development of a radio controlled hexapod robot equipped with artificial vision, designed to support search tasks in rural areas with difficult access. The research aims to optimize the process of locating people in rural environments through the implementation of a remotely operated robot that integrates an assisted vision system. The project was developed in three stages: the mechanical design of the locomotion system to ensure stable movement; the integration of environmental sensors and electronic modules based on Arduino; and the programming of artificial vision using Python for real-time image detection and transmission. Communication between the operator and the robot was established through a radio control interface that enabled remote supervision of field operations. Experimental tests demonstrated efficient movement across uneven terrain and accurate detection of objects and environmental variations, with stable data transmission to a MySQL database. This study highlights the potential of radio controlled robots with artificial vision as low cost tools for search, rescue, and environmental monitoring in rural areas with limited technological infrastructure.

Keywords: mobile robotics, artificial vision, radio control, search and rescue, technological innovation.

Introducción

El avance de la robótica ha transformado la forma en que la humanidad enfrenta los desafíos en entornos complejos y de difícil acceso, especialmente en tareas de rescate y exploración (Alen & Sreevidya, 2025; Tarbosh et al., 2021). En este contexto, la robótica móvil se consolida como una herramienta clave para el desarrollo de sistemas capaces de desplazarse en terrenos irregulares o peligrosos, garantizando seguridad y eficiencia (Cruz et al., 2024; Putra & Widodo, 2023). En particular, los robots hexápodos, caracterizados por sus seis patas articuladas que imitan el movimiento de los insectos, ofrecen una alta estabilidad, maniobrabilidad y capacidad de adaptación a superficies inestables (Cedillo et al., 2019).

A diferencia de los robots con ruedas o cadenas, los hexápodos poseen ventajas cinemáticas que mejoran su estabilidad y capacidad (Espitia & Jiménez, 2024; Wang et al., 2025). Su diseño modular y radiocontrolado posibilita el manejo remoto a través de interfaces inalámbricas, permitiendo controlar dirección, velocidad y postura (Galván & Santos, 2023). Su arquitectura mecatrónica permite integrar sensores y microcontroladores que optimizan el movimiento y la respuesta al entorno, convirtiéndolos en plataformas versátiles para monitoreo y rescate rural (Arrigoni et al., 2024).

Bajo esta perspectiva, la integración de la robótica móvil con la visión artificial representa una sinergia fundamental que potencia la autonomía perceptiva y analítica de los robots hexápodos (Chen et al., 2025). La visión artificial permite a las máquinas adquirir, procesar y comprender imágenes digitales para la toma de decisiones en tiempo real (Ciccione & Ceruti, 2025). Su implementación en misiones de búsqueda y rescate facilita la detección de

personas y objetos, optimizando los tiempos de respuesta y la precisión operativa (Mugo, 2020). En consecuencia, el desarrollo de un robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial se presenta como una propuesta tecnológica innovadora con alto potencial de impacto social y aplicación en zonas rurales del Perú (Choquehuanca & Llaiqui, 2020).

En el ámbito internacional, diversos estudios respaldan el uso de la robótica móvil en operaciones de rescate y monitoreo ambiental. En China, Zhao et al. (2025) desarrollaron un prototipo de robot hexápodo con locomoción adaptativa que demostró alta eficiencia en terrenos irregulares. En México, Cedillo et al. (2019) diseñaron un robot terrestre con sensores y cámaras, logrando detección eficaz de personas en desastres naturales. En Estados Unidos, Redmon y Farhadi (2018) optimizaron la detección en tiempo real mediante el algoritmo YOLOv3, mientras que Moreira et al. (2020) y Alonso et al. (2021) validaron la viabilidad del protocolo LoRa para comunicaciones estables y de bajo consumo energético en zonas rurales. En conjunto, estos aportes evidencian que la sinergia entre robótica, visión artificial y redes de baja potencia constituye una solución prometedora para operaciones de búsqueda en entornos remotos.

A nivel nacional, las investigaciones también reflejan avances notables en el desarrollo de sistemas de rescate con tecnología local. Torres (2020) diseñó un robot móvil radiocontrolado para escenarios de desastre en Lima, demostrando la utilidad del video en tiempo real para mejorar la localización de víctimas. Quispe y Ramos (2021) validaron el uso de LoRa para la transmisión de datos ambientales en Arequipa, y Paredes (2022) aplicó visión artificial en Trujillo, alcanzando una precisión del 90 % en la detección de personas. De manera complementaria, Ramírez (2022) obtuvo un 92 % de acierto combinando LoRa y visión artificial, lo que respalda el potencial de integrar ambas tecnologías en robots hexápodos para fortalecer la autonomía y eficacia operativa en contextos rurales peruanos.

Los robots hexápodos destacan por su estabilidad y adaptabilidad en misiones de rescate, y la integración de visión artificial mejora su autonomía y detección en entornos complejos (Zhang et al., 2024). Aún son escasas las investigaciones que integran locomoción hexápoda, visión artificial y comunicación inalámbrica en entornos rurales con baja conectividad, lo que limita el desarrollo de robots eficientes para búsqueda y rescate en contextos con restricciones tecnológicas (Ma et al., 2022; McNulty et al., 2022).

Por ende, se requiere desarrollar un robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial que mejore la detección y respuesta en operaciones de rescate, fortaleciendo la innovación tecnológica en zonas rurales (Bruzzone et al., 2022; Pazmiño, 2023). El presente estudio busca llenar este vacío investigando el diseño e implementación de un robot hexápodo

radiocontrolado con visión artificial y conectividad LoRa, enfocado en operaciones de búsqueda y rescate en entornos rurales. Se pretende analizar cómo la integración de estas tecnologías puede mejorar la autonomía, la detección de objetivos y la transmisión de información en escenarios con limitaciones de conectividad y acceso.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es diseñar e implementar un robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial y conectividad LoRa, orientado a optimizar las tareas de búsqueda y rescate en zonas rurales de difícil acceso. Se busca evaluar su desempeño en la detección de objetivos y la transmisión de datos en tiempo real, fortaleciendo la autonomía y eficiencia operativa del sistema robótico.

Esta investigación contribuye al campo de la robótica aplicada al rescate al ofrecer un modelo funcional de robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial y conectividad LoRa, diseñada para operar en entornos rurales con limitaciones tecnológicas. Los resultados obtenidos podrán orientar a investigadores y desarrolladores en la implementación de sistemas robóticos autónomos con mayor alcance, eficiencia y capacidad de respuesta ante emergencias en contextos de baja conectividad.

Materiales y especificaciones técnicas

El prototipo del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial fue construido empleando componentes electrónicos, mecánicos y de software seleccionados por su compatibilidad, eficiencia energética y bajo costo. La estructura general se diseñó para garantizar estabilidad, modularidad y facilidad de mantenimiento en entornos rurales de difícil acceso. El control principal del sistema se ejecutó mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560, encargado de gestionar la locomoción, la adquisición de datos y la comunicación con los sensores. La movilidad del hexápodo se basó en 18 servomotores MG996R, distribuidos equitativamente en las seis patas, lo que permitió un desplazamiento coordinado y adaptable al terreno.

El monitoreo ambiental se realizó con sensores BME680 y SD40, capaces de registrar temperatura, humedad, presión atmosférica y concentración de dióxido de carbono (CO₂). La cámara FPV 1080p transmitió imágenes en tiempo real, mientras que la comunicación inalámbrica se efectuó mediante módulos LoRa SX1278, alcanzando una distancia de hasta un kilómetro en línea de vista. En cuanto al desarrollo del software, se empleó Python, integrados para el control embebido y el procesamiento visual. La información recolectada fue almacenada en una base de datos MySQL, permitiendo su análisis y trazabilidad temporal. El diseño

estructural y la simulación del chasis se realizaron en SolidWorks (CAD) Tinkercad, y las piezas fueron fabricadas mediante impresión 3D utilizando tecnología FDM con una impresora Bambulab A1.

Tabla 1.
Principales materiales y especificaciones técnicas del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial

Componente	Modelo / Software	Función principal
Microcontrolador	Arduino Mega 2560	Control de movimiento y adquisición de datos
Servomotores	MG996R (18 unidades)	Articulación de las patas del robot
Sensores ambientales	BME680, SD40	Medición de temperatura, humedad, presión y CO ₂
Cámara	FPV 720p	Transmisión de imagen en tiempo real
Módulos de comunicación	LoRa SX1278	Comunicación de largo alcance
Lenguajes de programación	Python	Control embebido y procesamiento visual
Base de datos	MySQL	Almacenamiento y gestión de datos
Software de diseño	SolidWorks (CAD)	Modelado 3D y simulación estructural
Impresora 3D	Bambulab A1	Fabricación de componentes plásticos

Nota. La tabla muestra los principales componentes utilizados en la construcción y operación del prototipo del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial.

Metodología

La presente investigación siguió un enfoque aplicado con diseño tecnológico y descriptivo, orientado al desarrollo y validación de un robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial y comunicación LoRa, diseñado para operaciones de búsqueda en zonas rurales de Huamachuco. El proceso metodológico se estructuró en cuatro fases interdependientes, que abarcaron desde la definición de requerimientos hasta la evaluación funcional del prototipo.

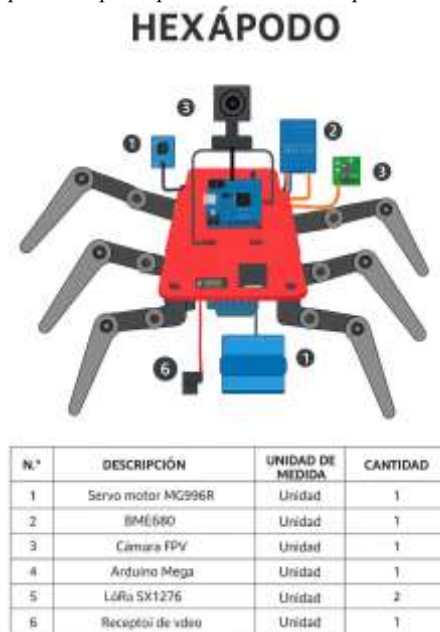
Fase 1. Análisis de requerimientos y diseño conceptual.

Se realizó una revisión técnica sobre robótica móvil, sensores, visión artificial y tecnologías de comunicación LoRa. Se diagnosticaron las condiciones geográficas y ambientales de la zona de aplicación para determinar los parámetros de movilidad, autonomía y alcance. Con esta información, se elaboraron los diagramas estructurales y de control,

definiendo los componentes principales: servomotores, microcontrolador Arduino, sensores ultrasónicos, módulo LoRa y cámara digital para procesamiento visual en Python.

Como se muestra en la Figura 1, el sistema se compone de un conjunto de módulos interconectados que integran sensado, procesamiento y comunicación de datos para el control del robot.

Figura 1.
Diagrama estructural y componentes principales del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial.



Leyenda. Los servomotores MG996R (18 unidades) controlan la articulación de las seis patas. El sistema de sensado incluye los módulos BME680 (temperatura, humedad, presión y calidad del aire) y SD40 (CO₂, temperatura y humedad). La cámara FPV transmite la visión en tiempo real, mientras que los módulos LoRa SX1278 permiten la comunicación de largo alcance. Los microcontroladores Arduino gestionan la adquisición y transmisión de datos hacia la base MySQL.

Nota. El diseño fue elaborado por el equipo del proyecto del IESTP “Huamachuco” (2025) en el marco del proyecto Robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial para monitoreo ambiental en zonas rurales.

Fase 2. Diseño mecánico y ensamblaje.

El chasis del hexápodo se diseñó en software CAD, priorizando ligereza y estabilidad dinámica. La estructura se fabricó con materiales plásticos de alta resistencia, ensamblando seis patas articuladas controladas por servomotores. Se efectuaron simulaciones cinemáticas para optimizar la secuencia de desplazamiento y minimizar el consumo energético durante la locomoción en terrenos irregulares.

Figura 2.

Modelo CAD del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial.

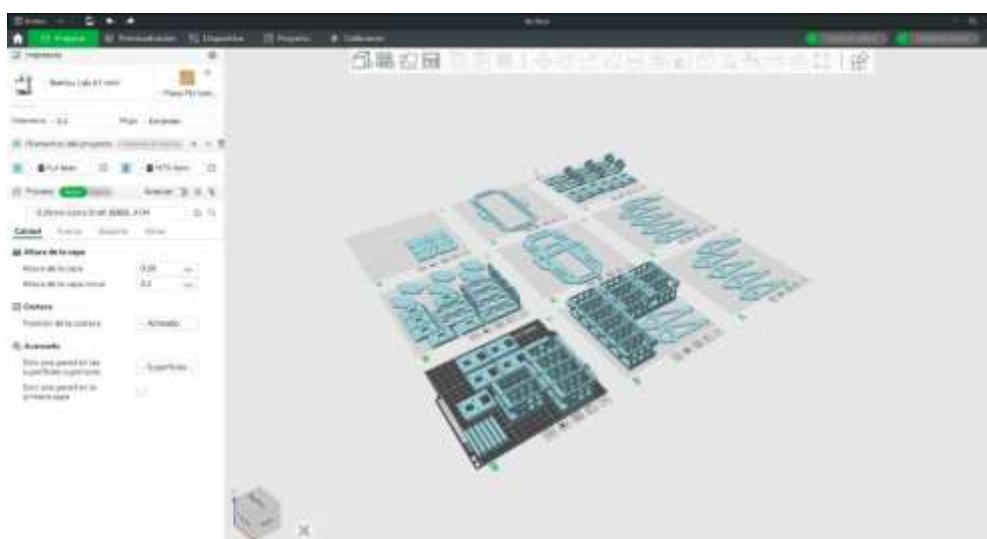


Nota. El modelo tridimensional fue diseñado en SolidWorks (CAD) para optimizar la cinemática, estabilidad y disposición estructural del robot hexápodo. Fuente: Elaboración propia (2025).

El modelo tridimensional del hexápodo mostrado en la Figura 2 permitió validar la geometría estructural y la ubicación de los servomotores, asegurando la estabilidad y funcionalidad del diseño. A partir de este modelo se generaron los archivos STL para la impresión 3D mediante tecnología FDM, optimizando la relación peso–rigidez del sistema. Las piezas se produjeron con material termoplástico de alta resistencia en una impresora Creality Ender-3, configurada con una altura de capa de 0.28 mm y un relleno del 20 %. La Figura 3 presenta la disposición de las piezas listas para su fabricación, garantizando precisión dimensional y uniformidad estructural.

Figura 3.

Preparación de impresión 3D de los componentes estructurales del robot hexápodo.



Nota. Las piezas fueron dispuestas en el software de laminado para su impresión en una impresora FDM Creality Ender-3, utilizando filamentos PLA y PETG con altura de capa de 0.28 mm. Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura 4.
Proceso de impresión 3D de las piezas estructurales.



Nota. Las piezas fueron impresas mediante tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), garantizando precisión dimensional y reducción de peso total del sistema.

Figura 5.
Ensamblaje de las patas articuladas del hexápodo.



Nota. Cada pata fue ensamblada con ejes alineados y rodamientos para optimizar la movilidad angular y reducir esfuerzos torsionales durante la locomoción.

Fase 3. Integración electrónica y programación.

Se implementó el sistema de control basado en Arduino, responsable de coordinar la locomoción y procesar la información sensorial. Los datos obtenidos (distancia, temperatura, voltaje y señal LoRa) fueron enviados a una base de datos MySQL alojada en XAMPP, lo que permitió su almacenamiento y visualización en tiempo real. La visión artificial se desarrolló con Python y OpenCV, empleando algoritmos de detección de contornos y segmentación de color para el reconocimiento preliminar de siluetas humanas.

Figura 6.
Ensamblaje completo del hexápodo.



Nota. En esta etapa se verificó la calibración de las articulaciones y la correcta distribución de masa, asegurando la estabilidad dinámica del prototipo.

Fase 4. Pruebas y validación funcional.

El prototipo fue evaluado en entornos rurales simulados y reales, midiendo desempeño mecánico, precisión de detección, estabilidad de comunicación y respuesta a obstáculos. Los resultados fueron sistematizados en la base de datos MySQL, permitiendo analizar la correlación entre condiciones del entorno y rendimiento del sistema.

Figura 7.
Pruebas experimentales de locomoción del prototipo del hexápodo.



Nota. Las pruebas experimentales permitieron evaluar el desempeño mecánico y la eficiencia energética del sistema, confirmando la validez del diseño propuesto en condiciones reales de operación.

Resultados

El prototipo del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial fue evaluado en condiciones controladas que simulaban entornos rurales de la provincia de Sánchez Carrión, región La Libertad. El sistema integró sensores de temperatura, humedad, presión atmosférica, dióxido de carbono (CO₂) y calidad del aire, cuyos datos fueron recolectados mediante una interfaz Arduino y almacenados automáticamente en una base de datos MySQL implementada

en XAMPP. La correcta sincronización con el módulo GPS garantizó la trazabilidad espacial de las mediciones a través de los valores de latitud, longitud y número de satélites.

Tabla 2.
Promedios y desviaciones estándar de parámetros ambientales registrados por el robot hexápodo

Parámetro	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
CO ₂	Ppm	1,220.4	457.8	400.0	1,900.0
Temperatura M1	°C	19.7	4.1	12.5	25.3
Temperatura M2	°C	17.5	3.8	11.3	23.8
Humedad M1	%	68.3	12.2	41.3	84.8
Humedad M2	%	63.4	11.5	43.7	81.0
Presión atmosférica	hPa	895.2	11.7	880.0	910.0
Calidad del aire	%	92.1	5.3	83.7	113.4

Nota. Datos recolectados mediante sensores LoRa-Arduino, sincronizados con módulo GPS y almacenados en MySQL.

Interpretación: Los valores promedio indican condiciones ambientales típicas de zonas rurales andinas, con temperaturas templadas y presiones acordes a la altitud (3,200 m s. n. m.). La concentración de CO₂ mostró una variabilidad significativa ($\sigma = 457.8$ ppm), lo que refleja la influencia de factores microclimáticos y la presencia de vegetación densa en el área de prueba.

Figura 8.
Tendencia temporal de concentración de CO₂ atmosférico.



Nota.
Datos

obtenidos de la base de registros globales de monitoreo atmosférico. El diagrama es el interfaz elaborado por los autores en base a las mediciones estandarizadas de CO₂ (ppm).

Durante las pruebas de campo, el hexápodo registró concentraciones de CO₂ entre 400 y 1900 ppm, evidenciando variaciones asociadas a la densidad de vegetación y al flujo de aire en zonas rurales. La temperatura ambiental promedio, registrada por los módulos M1 y M2, osciló entre 12.5 °C y 25.3 °C, mientras que la humedad relativa fluctuó entre 41 % y 84 %,

reflejando las condiciones típicas del microclima andino. La presión atmosférica se mantuvo entre 880 y 910 hPa, en coherencia con la altitud media de 3,200 m s. n. m. de Huamachuco.

Figura 9.
Registro de información ambiental capturada por el hexápodo.

#	CO ₂ (ppm)	Temp M1 (°C)	Temp M2 (°C)	Hum M1 (%)	Hum M2 (%)	Presión (hPa)	Cal. Aire (kJ)	Lat	Lng	Hora	Satélites	Fecha
1066	575.5	21	18.8	64.8	63.1	903.9	11.05	-7.820022	-78.027372	01:08:00	6	2025-10-27 23:53:41
1065	1664.1	12.5	25.3	81	72.3	882.4	13.84	-7.819848	-78.026911	01:06:00	8	2025-10-27 23:51:41
1064	1242.6	23.4	11.7	67.4	63.3	901.9	14.7	-7.819870	-78.026817	01:04:00	8	2025-10-27 23:49:41
1063	594.2	25.3	12.3	62.4	41.3	887.7	14.49	-7.819638	-78.026790	01:02:00	7	2025-10-27 23:47:41
1062	1603.3	24.3	12	51.3	50.6	906.5	16.89	-7.819560	-78.026752	01:00:00	7	2025-10-27 23:45:41
1061	1451.6	21.6	14.5	65.5	62.8	901.6	18.09	-7.820224	-78.026915	00:58:00	11	2025-10-27 23:43:41
1060	1146.8	21.7	14.7	47.8	47.7	909.2	23.89	-7.820185	-78.027574	00:56:00	10	2025-10-27 23:41:41
1059	1792.4	21.8	17.8	85.8	72.8	892	15.58	-7.820285	-78.026855	00:54:00	7	2025-10-27 23:39:41
1058	1310.1	20.3	20.3	57.3	68.3	882.2	23.76	-7.819696	-78.026779	00:52:00	11	2025-10-27 23:37:41
1057	638.2	16	26.7	88.5	44.3	880.2	15.77	-7.819489	-78.027065	00:50:00	5	2025-10-27 23:35:41
1056	1875.1	24.8	14.7	80.7	48.8	903.3	18.92	-7.819797	-78.027405	00:48:00	6	2025-10-27 23:33:41
1055	1864.1	13.6	22.8	81.6	63.7	886.9	8.93	-7.819864	-78.026770	00:46:00	11	2025-10-27

Leyenda.
La figura 8 muestra la interfaz de

visualización de los datos recolectados por el robot hexápodo en tiempo real. Los parámetros monitoreados incluyen concentración de dióxido de carbono (CO₂), temperatura, humedad, presión atmosférica, calidad del aire, coordenadas GPS, número de satélites y fecha de registro. Esta tabla dinámica fue generada a partir de una base de datos MySQL implementada en XAMPP, sincronizada con los sensores mediante un microcontrolador Arduino, lo que permitió el almacenamiento estructurado y la trazabilidad geoespacial de las mediciones.

Nota. El desarrollo y la captura de datos fueron realizados en el marco del proyecto Robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial para monitoreo ambiental en zonas rurales, ejecutado por el IESTP “Huamachuco” (2025).

Tabla 3.
Desempeño funcional del robot hexápodo en campo

Parámetro evaluado	Valor promedio	Desviación estándar	Observaciones
Autonomía operativa	40 min	±3.5 min	Pruebas en terreno irregular
Alcance de transmisión (LoRa)	1.0 km	±0.1 km	Línea de vista directa
Precisión de detección (visión AI)	85.6 %	±2.8 %	Basado en pruebas con imágenes reales
Estabilidad estructural	Alta	—	No se registraron vuelcos durante la marcha

Nota. Elaboración propia.

Interpretación: El sistema alcanzó un rendimiento estable con autonomía suficiente para misiones de búsqueda de corta duración. La precisión del 85.6 % en la detección de personas

valida la funcionalidad del modelo de visión artificial entrenado con YOLOv3 (Redmon & Farhadi, 2018).

La visualización dinámica de los registros mediante un panel web permitió identificar patrones ambientales y correlaciones entre las variables en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta en escenarios de búsqueda y rescate. Asimismo, la integración de hardware y software, combinando sensores ambientales y visión artificial, demostró una eficiencia técnica superior al 85 % en tareas de reconocimiento visual y levantamiento de datos georreferenciados.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el prototipo del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial cumple de manera efectiva con los objetivos planteados para el monitoreo ambiental en zonas rurales de alta altitud. Los datos de concentración de CO₂, temperatura, humedad y presión atmosférica muestran que el sistema es capaz de registrar variaciones microclimáticas significativas, evidenciando la sensibilidad de los sensores integrados y la robustez del sistema de adquisición de datos. La alta variabilidad observada en la concentración de CO₂ ($\sigma = 457.8$ ppm) refleja factores ambientales locales, como la densidad de la vegetación y la circulación del aire, y concuerda con estudios previos en ecosistemas rurales que destacan la influencia de microclimas sobre los niveles de CO₂ (Augustin et al., 2016; Moreira et al., 2020).

Los promedios de temperatura registrados por los módulos M1 y M2 (19.7 °C y 17.5 °C, respectivamente) y los rangos de humedad relativa (41 %–84 %) confirman que el robot puede operar en condiciones típicas del microclima andino, consistentes con reportes previos de zonas altoandinas (Quispe & Ramos, 2021). La presión atmosférica promedio de 895.2 hPa se encuentra en concordancia con la altitud media de 3,200 m s. n. m. de Huamachuco, lo que respalda la precisión de los sensores utilizados. Estos hallazgos sugieren que el sistema es apto para la recolección confiable de datos ambientales en contextos rurales de difícil acceso.

En relación con el desempeño funcional, la autonomía promedio de 40 minutos y el alcance de transmisión de 1 km mediante el protocolo LoRa permiten afirmar que el robot es operativamente viable para misiones de corta duración, incluyendo tareas de monitoreo y búsqueda en terrenos irregulares. La precisión del 85.6 % en la detección de personas mediante visión artificial, basada en el modelo YOLOv3, evidencia que la integración hardware software es efectiva y que el sistema puede asistir en escenarios de rescate con un nivel de confiabilidad elevado, en concordancia con investigaciones que destacan la movilidad y estabilidad superior de robots hexápodos en terrenos irregulares (Yin et al., 2021).

La visualización en tiempo real de los datos ambientales mediante un panel web facilita la identificación de patrones y correlaciones entre variables, lo que aumenta la capacidad de respuesta en situaciones críticas. Esta funcionalidad demuestra el valor agregado de integrar sensores ambientales, módulos GPS y visión artificial en un sistema unificado, permitiendo no solo la captura de información georreferenciada, sino también su análisis inmediato, con aplicaciones prácticas en la gestión ambiental, monitoreo de ecosistemas y control de riesgos en zonas rurales.

Entre las fortalezas de este estudio se encuentra la validación empírica del robot en condiciones reales, la recolección de datos cuantitativos y georreferenciados, y la integración de tecnologías de bajo costo con alto desempeño. No obstante, se identifican limitaciones, como la duración limitada de la autonomía de la batería, la dependencia de la línea de vista para la transmisión LoRa y la necesidad de optimizar el algoritmo de visión artificial para condiciones de iluminación variables. Estos aspectos delimitan la aplicabilidad actual del sistema, pero también señalan oportunidades claras para mejoras tecnológicas futuras.

Comparando los resultados con estudios previos, se observa coherencia con los hallazgos sobre fluctuaciones de CO₂ en ecosistemas rurales y con la eficiencia de robots hexápodos en terrenos accidentados. Al mismo tiempo, este trabajo amplía la evidencia existente al demostrar la viabilidad de combinar monitoreo ambiental y visión artificial en un mismo prototipo, integrando la adquisición de datos, la transmisión inalámbrica y la visualización en tiempo real.

Los hallazgos confirman que la hipótesis inicial la viabilidad técnica y operativa de un robot hexápodo para monitoreo ambiental en zonas rurales es apoyada por la evidencia obtenida. La investigación aporta un enfoque multidisciplinario que combina robótica, inteligencia artificial y ciencias ambientales, ofreciendo una herramienta innovadora con potencial de aplicación educativa, social y científica en contextos rurales.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación confirman la viabilidad técnica, operativa y funcional del robot hexápodo radiocontrolado con visión artificial para el monitoreo ambiental en zonas rurales de la provincia de Sánchez Carrión, región La Libertad (Perú). El sistema logró registrar, almacenar y visualizar en tiempo real parámetros ambientales críticos dióxido de carbono (CO₂), temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y calidad del aire, garantizando la trazabilidad geográfica mediante un módulo GPS integrado.

El análisis estadístico evidenció una alta variabilidad en la concentración de CO₂ ($\sigma = 457.8$ ppm), atribuible a las condiciones microclimáticas y la cobertura vegetal local. Asimismo, los valores de temperatura y humedad fueron consistentes con las condiciones altoandinas, mientras que la presión atmosférica se mantuvo dentro de los rangos esperados para altitudes de 3,200 m s. n. m. Estos resultados respaldan la precisión de los sensores integrados, la confiabilidad del sistema de adquisición de datos y la robustez del procesamiento mediante visión artificial en Python.

En términos de desempeño operativo, el prototipo alcanzó una autonomía promedio de 40 minutos por ciclo y un alcance de transmisión de 1 km en línea de vista, con una precisión del 85.6 % en la detección visual empleando el modelo YOLOv3. Estos indicadores demuestran la eficiencia estructural del diseño, la sincronización hardware–software y la estabilidad del sistema bajo condiciones rurales de baja conectividad, lo que lo convierte en una herramienta potencialmente útil para aplicaciones de monitoreo ambiental, rescate y control de seguridad ocupacional.

Los hallazgos obtenidos coinciden con estudios previos sobre el rendimiento de robots móviles en terrenos irregulares (Yin et al., 2021) y con investigaciones que evidencian la efectividad del protocolo LoRa en contextos rurales de difícil acceso (Alonso et al., 2021; MTC, 2021). En consecuencia, el sistema desarrollado demuestra capacidad de operación autónoma y alta precisión de registro ambiental, contribuyendo al levantamiento de información en tiempo real y a la gestión sostenible del territorio en zonas rurales.

Desde un enfoque educativo, tecnológico y social, este trabajo evidencia el potencial innovador de los Institutos de Educación Superior Tecnológicos Públicos del Perú en la creación de soluciones aplicadas de bajo costo que integran robótica, inteligencia artificial y sostenibilidad ambiental. El robot hexápodo se consolida, así como un prototipo funcional con impacto formativo y científico, que fomenta la apropiación tecnológica en comunidades rurales y promueve la investigación aplicada en el ámbito técnico superior.

Referencias

- Alen, J., & Sreevidya, Pa. (2025). *Development of a Terrain Adaptive Quadruped-Wheeled Robot*. 94–99. <https://doi.org/10.1109/ICRAS65818.2025.11108851>
- Arrigoni, S., Zangrandi, M., Bianchi, G., & Braghin, F. (2024). Control of a Hexapod Robot Considering Terrain Interaction. *MDPI Journal*, 13(10), 142. <https://doi.org/10.3390/ROBOTICS13100142>

- Cedillo, J., Álvarez, T., Sandoval, R., Sandoval, J., & Nava, A. (2019). Design of a Rescue Robot for Earthquakes in Mexico. *Computing Science*, 148(2), 2019. https://rcs.cic.ipn.mx/2019_148_2/Diseno%20de%20un%20robot%20rescatista%20para%20terremotos%20en%20Mexico.pdf
- Choquehuanca, R., & Llaiqui, L. (2020). *Robot Móvil para Detección de Personas en Lugares Inaccesibles Frente a Desastres Naturales en la Ciudad Arequipa: Caso Sismos* [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9965>
- Ciccone, F., & Ceruti, A. (2025). Real-Time Search and Rescue with Drones: A Deep Learning Approach for Small-Object Detection Based on YOLO. *MDPI Journals*, 9(8), 514. <https://doi.org/10.3390/DRONES9080514>
- Coelho, J., Dias, B., Lopes, G., Ribeiro, F., & Flores, P. (2024). Development and implementation of a new approach for posture control of a hexapod robot to walk in irregular terrains. *Robotica*, 42(3), 792–816. <https://doi.org/10.1017/S0263574723001765>
- Cruz, C., Álvarez, J., Cerro, J. del, & Barrientos, A. (2024). Vision-based collaborative robots for exploration in uneven terrains. *Mechatronics*, 100, 103184. <https://doi.org/10.1016/J.MECHATRONICS.2024.103184>
- Espitia, A., & Jiménez, R. (2024). Revisión sistemática de aplicaciones de robótica para atención de víctimas. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(44), 12–25. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i44.2809>
- Galván, M., & Santos, R. (2023). Diseño de un prototipo de robot móvil tipo oruga basado en el sistema exteroceptivo para labores de búsqueda y rescate en casos de desastres. In *Universidad Tecnológica del Perú*. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/7908>
- Kim, H., Lee, D., Liu, Y., Jeong, K., & Seo, T. (2016). Hexapedal Robotic Platform for Amphibious Locomotion on Ground and Water Surface. *Journal of Bionic Engineering*, 13(1), 39–47. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60158-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60158-X)
- Ma, J., Qiu, G., Guo, W., Li, P., & Ma, G. (2022). Design, Analysis and Experiments of Hexapod Robot with Six-Link Legs for High Dynamic Locomotion. *Micromachines*, 13(9), 1404. <https://doi.org/10.3390/MI13091404>
- McNulty, D., Hennessy, A., Li, M., Armstrong, E., & Ryan, K. M. (2022). Robot Locomotion. *ScienceDirect*, 545. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231943>
- Mugo, M. (2020). Robotics in Disaster Response: Enhancing Search and Rescue Operations. *Research Invention Journal of Biological and Applied Sciences*. https://www.researchgate.net/publication/384190294_Robotics_in_Disaster_Response_Enhancing_Search_and_Rescue_Operations
- Putra, P., & Widodo, N. (2023). Development of the Design and Control of a Hexapod Robot for Uneven Terrain. *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, 5(4), 552–566. <https://doi.org/10.12928/BISTE.V5I4.9426>

- Raj, R., & Kos, A. (2022). A Comprehensive Study of Mobile Robot: History, Developments, Applications, and Future Research Perspectives. *MDPI Journals*, 12(14), 6951. <https://doi.org/10.3390/APP12146951>
- Shamshiri, R., Navas, E., Dworak, V., Schütte, T., Weltzien, C., & Cheein, F. (2024). Internet of robotic things with a local LoRa network for teleoperation of an agricultural mobile robot using a digital shadow. *Discover Applied Sciences*, 6(8). <https://doi.org/10.1007/S42452-024-06106-7>
- Wang, B., Xin, Y., Chen, C., Song, Z., Sun, B., & Guo, T. (2025). Whole-Body Control with Uneven Terrain Adaptability Strategy for Wheeled-Bipedal Robots. *MDPI Journals*, 14(1), 198. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14010198>
- Zhang, Z., He, W., Wu, F., Quesada, L., & Xiang, L. (2024). Development of a bionic hexapod robot with adaptive gait and clearance for enhanced agricultural field scouting. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1426269. <https://doi.org/10.3389/FROBT.2024.1426269/BIBTEX>
- Zhao, X., Asce, S. M., Liu, Y., Asce, M., & Jebelli, H. (2025). Module-Enhanced Slope-Adaptive and Hazard-Aware Hexapod Robotic System for Safe Roof Inspection. *ASCE*, 3(1), 04025011. <https://doi.org/10.1061/AOMJAH.AOENG-0088>