

Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana basado en Inteligencia Artificial para Áreas Protegidas

Autores:

Fabrizio Martin Contigiani
Gabriel Orlando Da Silva Schmies

Tutor:

Dr. Ing. Sergio Eduardo Moya

27 de diciembre de 2025

Resumen

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y alerta temprana para áreas protegidas de la Selva Misionera, que combina tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) con Inteligencia Artificial (IA) para la detección automática de fauna silvestre, personas y vehículos.

El sistema está compuesto por una red de nodos de captura basados en microcontroladores ESP32 equipados con cámaras, los cuales se comunican mediante el protocolo ESP-MESH para transmitir imágenes hacia un nodo raíz. Este nodo actúa como puerta de enlace, reenviando las imágenes a un servidor remoto a través de Transmission Control Protocol (TCP)/IP.

En el servidor, las imágenes son procesadas por un servicio de inferencia basado en SpeciesNet, un modelo de detección de objetos desarrollado por Google que utiliza YOLOv5. Este modelo permite identificar y clasificar especies de fauna silvestre, así como detectar la presencia de humanos y vehículos, generando alertas automáticas ante posibles intrusiones.

La arquitectura del servidor incluye una aplicación web desarrollada en Django para la gestión de imágenes, un bot de Telegram para el envío de notificaciones en tiempo real, y una base de datos PostgreSQL para el almacenamiento persistente. Todo el sistema está contenedorizado mediante Docker para facilitar su despliegue.

Los resultados demuestran la viabilidad de implementar un sistema de vigilancia inteligente de bajo costo para áreas protegidas, capaz de operar de manera autónoma y alertar a los administradores ante eventos relevantes.

Palabras Clave - Cámaras Trampa, Internet de las Cosas, Inteligencia Artificial, Monitoreo de Fauna, Detección de Intrusos, ESP-MESH, SpeciesNet, Selva Misionera

Índice general

Índice de figuras	5
Índice de cuadros	6
Glosario	7
Siglas	9
1. Introducción	10
1.1. Contexto y motivación	10
1.2. Estructura del documento	11
2. Antecedentes	12
2.1. Trabajos relacionados	12
2.2. Soluciones comerciales existentes	12
2.3. Estado del arte	12
2.4. Análisis comparativo	12
3. Planteamiento del Problema	13
3.1. Contexto regional	13
3.1.1. La Selva Misionera y el Bosque Atlántico	13
3.1.2. Biodiversidad y especies en peligro	13
3.1.3. Importancia ecológica de la región	13
3.2. Problemáticas de conservación en la región	13
3.2.1. Deforestación y fragmentación del hábitat	13
3.2.2. Caza furtiva y tráfico de fauna	13
3.2.3. Intrusión en áreas protegidas	13
3.2.4. Recursos limitados para vigilancia	13
3.3. Sistemas de monitoreo actuales	13
3.3.1. Cámaras trampa convencionales	13
3.3.2. Limitaciones de los sistemas existentes	13
3.4. Justificación del proyecto	13
4. Objetivos y Alcance	14
4.1. Objetivo general	14
4.2. Objetivos específicos	14
4.3. Alcance del proyecto	14

4.4. Limitaciones	14
5. Marco Teórico	15
5.1. Internet de las Cosas (IoT)	16
5.1.1. Arquitecturas IoT	16
5.1.2. Protocolos de comunicación inalámbrica	16
5.2. Redes Mesh	16
5.2.1. Topologías de red	16
5.2.2. ESP-MESH y Mwifi	16
5.3. Inteligencia Artificial aplicada a visión por computadora	16
5.3.1. Redes neuronales convolucionales (CNN)	16
5.3.2. Detección de objetos con YOLO	16
5.3.3. SpeciesNet de Google	16
5.4. Tecnologías de desarrollo	16
5.4.1. Microcontroladores ESP32	16
5.4.2. ESP-IDF y ESP-MDF	16
5.4.3. Contenedorización con Docker	16
5.4.4. Framework Django	16
5.5. Sensores y actuadores	16
5.5.1. Sensores de movimiento PIR	16
5.5.2. Módulos de cámara	16
5.6. Diseño y fabricación digital	16
5.6.1. Modelado 3D	16
5.6.2. Impresión 3D	16
6. Metodología	17
6.1. Enfoque metodológico	17
6.2. Etapas del desarrollo	17
6.3. Herramientas y tecnologías utilizadas	17
6.4. Métricas de evaluación	17
7. Diseño del Sistema	18
7.1. Arquitectura general	19
7.2. Diseño del hardware	19
7.2.1. Selección de componentes	19
7.2.2. Nodo de captura con cámara	19
7.2.3. Sensor de movimiento PIR	19
7.2.4. Carcasa para impresión 3D	19
7.2.5. Nodo raíz	19
7.2.6. Alimentación y consumo energético	19
7.3. Diseño de la red mesh	19
7.3.1. Topología de la red	19
7.3.2. Protocolo de comunicación	19
7.3.3. Formato de datos	19
7.4. Diseño del servicio de detección	19
7.4.1. Servidor de inferencia con SpeciesNet	19
7.4.2. Detección de animales, humanos y vehículos	19

7.4.3.	Anotación de imágenes con bounding boxes	19
7.5.	Diseño del servidor de aplicación	19
7.5.1.	Arquitectura de servicios	19
7.5.2.	Gestión de imágenes	19
7.5.3.	Interfaz web	19
7.5.4.	Bot de Telegram y sistema de alertas	19
8.	Implementación	20
8.1.	Nodo mesh (mesh-node)	21
8.1.1.	Firmware del nodo de captura	21
8.1.2.	Integración del sensor PIR	21
8.1.3.	Captura de imágenes	21
8.1.4.	Compresión y transmisión	21
8.1.5.	Fabricación de la carcasa 3D	21
8.2.	Nodo raíz (root-node)	21
8.2.1.	Firmware del nodo raíz	21
8.2.2.	Conexión con servidor TCP	21
8.2.3.	Gestión de la red mesh	21
8.3.	Servicio de detección (wildlife-detection)	21
8.3.1.	Contenedor Docker con SpeciesNet	21
8.3.2.	API de inferencia con LitServe	21
8.3.3.	Procesamiento de imágenes	21
8.4.	Servidor de aplicación (server)	21
8.4.1.	Aplicación Django	21
8.4.2.	Integración con SpeciesNet	21
8.4.3.	Bot de Telegram y sistema de alertas	21
8.4.4.	Base de datos PostgreSQL	21
8.4.5.	Despliegue con Docker Compose	21
9.	Pruebas y Resultados	22
9.1.	Ambiente de pruebas	22
9.2.	Pruebas de conectividad y red mesh	22
9.2.1.	Alcance de la red	22
9.2.2.	Latencia de transmisión	22
9.2.3.	Estabilidad de la conexión	22
9.3.	Pruebas de detección	22
9.3.1.	Detección de fauna silvestre	22
9.3.2.	Detección de humanos	22
9.3.3.	Detección de vehículos	22
9.4.	Evaluación del modelo de IA	22
9.4.1.	Precisión y recall	22
9.4.2.	Tiempo de inferencia	22
9.5.	Pruebas de consumo energético	22
9.6.	Pruebas del sistema de alertas	22
9.6.1.	Tiempo de respuesta	22
9.7.	Análisis de resultados	22

10. Conclusiones	23
10.1. Conclusiones generales	23
10.2. Aportes del trabajo	23
10.3. Trabajos futuros	23
10.4. Recomendaciones	23
11. Bibliografía	24
A. Esquemáticos del hardware	25
B. Código fuente relevante	26
B.1. Firmware del nodo mesh	26
B.2. Firmware del nodo raíz	26
B.3. Servidor de detección	26
B.4. Aplicación Django	26
C. Manual de instalación y configuración	27
C.1. Configuración del firmware	27
C.2. Despliegue del servidor	27
C.3. Configuración del bot de Telegram	27
D. Manual de usuario	28
E. Especificaciones técnicas	29
F. Análisis de viabilidad económica	30

Índice de figuras

Índice de cuadros

Glosario

- bot de Telegram** Programa automatizado que interactúa con usuarios a través de la plataforma de mensajería Telegram. 1, 10
- cámara trampa** Dispositivo de captura de imágenes activado por movimiento, utilizado comúnmente para monitoreo de fauna silvestre. 10
- caza furtiva** Práctica ilegal de captura o matanza de animales silvestres sin autorización, a menudo de especies protegidas o en peligro de extinción. 10, 11
- código abierto** Software cuyo código fuente está disponible públicamente para que cualquiera pueda estudiarlo, modificarlo y distribuirlo. 11
- detección de objetos** Técnica de visión por computadora que identifica y localiza objetos dentro de una imagen, generalmente mediante bounding boxes. 10
- Django** Framework de desarrollo web de alto nivel escrito en Python, que sigue el patrón modelo-vista-plantilla. 1
- Docker** Plataforma de contenedorización que permite empaquetar aplicaciones junto con sus dependencias para facilitar el despliegue. 1
- ESP-MESH** Protocolo de red mesh desarrollado por Espressif para microcontroladores ESP32, basado en Wi-Fi. 1, 10
- ESP32** Microcontrolador de bajo costo y bajo consumo con Wi-Fi y Bluetooth integrados, fabricado por Espressif Systems. 1, 10
- inferencia** Proceso de utilizar un modelo de aprendizaje automático entrenado para realizar predicciones sobre nuevos datos. 1
- mesh** Topología de red donde cada nodo puede conectarse con múltiples nodos vecinos, permitiendo rutas alternativas para la transmisión de datos. 11
- nodo** Dispositivo individual que forma parte de una red mesh. 1
- nodo raíz** Nodo principal de una red mesh que actúa como puerta de enlace hacia redes externas. 1
- PostgreSQL** Sistema de gestión de bases de datos relacional de código abierto. 1

Selva Misionera Porción argentina del Bosque Atlántico, ubicada principalmente en la Provincia de Misiones, caracterizada por su alta biodiversidad y vegetación subtropical. 1, 10

SpeciesNet Modelo de detección y clasificación de fauna silvestre desarrollado por Google, basado en YOLOv5. 1, 10

tiempo real Procesamiento de datos que ocurre con latencia mínima, permitiendo respuestas inmediatas a eventos. 10, 11

YOLOv5 Versión 5 del modelo You Only Look Once, arquitectura de red neuronal para detección de objetos en tiempo real. 1

Siglas

IA Inteligencia Artificial. 1, 10, 11

IoT Internet de las Cosas. 1, 10, 11

TCP Transmission Control Protocol. 1

Capítulo 1

Introducción

La conservación de la fauna silvestre y la protección de áreas naturales representan desafíos críticos en la actualidad. En regiones de alta biodiversidad como la Selva Misionera, la pérdida de hábitat, la caza furtiva y la intrusión humana en ecosistemas protegidos amenazan el equilibrio ecológico y la supervivencia de numerosas especies. Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar sistemas de monitoreo que permitan vigilar estas áreas de manera continua y eficiente.

Tradicionalmente, el monitoreo de fauna silvestre se ha realizado mediante cámara trampa, dispositivos que capturan imágenes cuando detectan movimiento. Sin embargo, estos sistemas convencionales presentan limitaciones significativas: requieren revisión manual periódica, no permiten alertas en tiempo real, y generan grandes volúmenes de datos que deben ser analizados manualmente por expertos.

El avance de tecnologías como el IoT y la IA ofrece nuevas posibilidades para superar estas limitaciones. La combinación de redes de sensores inalámbricos con algoritmos de detección de objetos permite desarrollar sistemas capaces de identificar automáticamente fauna silvestre, personas y vehículos, generando alertas inmediatas ante eventos relevantes.

El presente trabajo, desarrollado en el marco de la Universidad Nacional de Misiones, propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y alerta temprana para áreas protegidas de la región, que integra una red de nodos de captura basados en ESP32 comunicados mediante ESP-MESH, un servidor de procesamiento con IA basado en SpeciesNet, y un sistema de notificaciones a través de bot de Telegram.

1.1. Contexto y motivación

Las áreas protegidas enfrentan amenazas constantes que van desde la caza ilegal de especies en peligro hasta la intrusión de personas no autorizadas y vehículos en zonas restringidas. Los guardaparques y administradores de estas áreas frecuentemente carecen de los recursos humanos y tecnológicos necesarios para mantener una vigilancia efectiva sobre extensas superficies de terreno, muchas veces en ubicaciones remotas con acceso limitado a infraestructura de comunicaciones.

Las cámaras trampa tradicionales, aunque útiles para la investigación científica, no fueron diseñadas para la vigilancia en tiempo real. Las imágenes capturadas permanecen almacenadas en tarjetas de memoria que deben ser recolectadas físicamente, lo que implica visitas frecuentes al campo y retrasos significativos entre la captura de un evento y su descubrimiento. Para

cuando se detecta una intrusión o un acto de caza furtiva, los responsables ya se encuentran lejos del área.

Es cierto que en la actualidad existen cámaras trampa más modernas que incorporan conectividad celular o satelital, permitiendo el envío remoto de imágenes. Sin embargo, estos dispositivos suelen tener un costo significativamente mayor, lo que limita su adopción masiva especialmente en países en vías de desarrollo, donde paradójicamente se concentra gran parte de la biodiversidad mundial. Además, muchas de estas soluciones comerciales dependen de servicios en la nube propietarios con costos de suscripción recurrentes.

La motivación de este proyecto surge de la necesidad de transformar el paradigma del monitoreo pasivo hacia un sistema activo de vigilancia inteligente, pero de manera accesible y de bajo costo. Un sistema que no solo capture imágenes, sino que las transmita en tiempo real, las analice automáticamente mediante algoritmos de IA, y genere alertas inmediatas cuando se detecten eventos de interés, ya sea la presencia de fauna silvestre para fines de investigación, o la detección de intrusos para fines de seguridad. Todo esto utilizando componentes de hardware económicos y software de código abierto.

1.2. Estructura del documento

El presente documento se organiza en diez capítulos que describen de manera progresiva el desarrollo del sistema propuesto:

Capítulo 1 - Introducción: Presenta el contexto general del proyecto, la motivación y la estructura del documento.

Capítulo 2 - Antecedentes: Revisa trabajos relacionados, soluciones comerciales existentes y el estado del arte en sistemas de monitoreo de fauna y detección de intrusos.

Capítulo 3 - Planteamiento del Problema: Describe la problemática de las áreas protegidas, las limitaciones de los sistemas tradicionales y la justificación del proyecto.

Capítulo 4 - Objetivos y Alcance: Define los objetivos generales y específicos, así como el alcance y las limitaciones del trabajo.

Capítulo 5 - Marco Teórico: Presenta los fundamentos teóricos sobre IoT, redes mesh, IA aplicada a visión por computadora, y las tecnologías utilizadas.

Capítulo 6 - Metodología: Describe el enfoque metodológico, las etapas de desarrollo y las herramientas empleadas.

Capítulo 7 - Diseño del Sistema: Detalla la arquitectura general, el diseño del hardware, la red mesh, el servicio de detección y el servidor de aplicación.

Capítulo 8 - Implementación: Presenta la implementación de cada componente: nodos mesh, nodo raíz, servicio de detección y servidor de aplicación.

Capítulo 9 - Pruebas y Resultados: Documenta las pruebas realizadas y analiza los resultados obtenidos en conectividad, detección, rendimiento y consumo energético.

Capítulo 10 - Conclusiones: Resume las conclusiones generales, los aportes del trabajo, trabajos futuros y recomendaciones.

Capítulo 2

Antecedentes

- 2.1. Trabajos relacionados
- 2.2. Soluciones comerciales existentes
- 2.3. Estado del arte
- 2.4. Análisis comparativo

Capítulo 3

Planteamiento del Problema

3.1. Contexto regional

3.1.1. La Selva Misionera y el Bosque Atlántico

3.1.2. Biodiversidad y especies en peligro

3.1.3. Importancia ecológica de la región

3.2. Problemáticas de conservación en la región

3.2.1. Deforestación y fragmentación del hábitat

3.2.2. Caza furtiva y tráfico de fauna

3.2.3. Intrusión en áreas protegidas

3.2.4. Recursos limitados para vigilancia

3.3. Sistemas de monitoreo actuales

3.3.1. Cámaras trampa convencionales

3.3.2. Limitaciones de los sistemas existentes

3.4. Justificación del proyecto

Capítulo 4

Objetivos y Alcance

- 4.1. Objetivo general
- 4.2. Objetivos específicos
- 4.3. Alcance del proyecto
- 4.4. Limitaciones

Capítulo 5

Marco Teórico

5.1. Internet de las Cosas (IoT)

5.1.1. Arquitecturas IoT

5.1.2. Protocolos de comunicación inalámbrica

5.2. Redes Mesh

5.2.1. Topologías de red

5.2.2. ESP-MESH y Mwifi

5.3. Inteligencia Artificial aplicada a visión por computadora

5.3.1. Redes neuronales convolucionales (CNN)

5.3.2. Detección de objetos con YOLO

5.3.3. SpeciesNet de Google

5.4. Tecnologías de desarrollo

5.4.1. Microcontroladores ESP32

5.4.2. ESP-IDF y ESP-MDF

5.4.3. Contenedorización con Docker

5.4.4. Framework Django

5.5. Sensores y actuadores

5.5.1. Sensores de movimiento PIR

5.5.2. Módulos de cámara

16

5.6. Diseño y fabricación digital

5.6.1. Modelado 3D

Capítulo 6

Metodología

- 6.1. Enfoque metodológico
- 6.2. Etapas del desarrollo
- 6.3. Herramientas y tecnologías utilizadas
- 6.4. Métricas de evaluación

Capítulo 7

Diseño del Sistema

7.1. Arquitectura general

7.2. Diseño del hardware

7.2.1. Selección de componentes

7.2.2. Nodo de captura con cámara

7.2.3. Sensor de movimiento PIR

7.2.4. Carcasa para impresión 3D

7.2.5. Nodo raíz

7.2.6. Alimentación y consumo energético

7.3. Diseño de la red mesh

7.3.1. Topología de la red

7.3.2. Protocolo de comunicación

7.3.3. Formato de datos

7.4. Diseño del servicio de detección

7.4.1. Servidor de inferencia con SpeciesNet

7.4.2. Detección de animales, humanos y vehículos

7.4.3. Anotación de imágenes con bounding boxes

7.5. Diseño del servidor de aplicación

7.5.1. Arquitectura de servicios

7.5.2. Gestión de imágenes

7.5.3. Interfaz web

7.5.4. Bot de Telegram y sistema de alertas

Capítulo 8

Implementación

8.1. Nodo mesh (mesh-node)

8.1.1. Firmware del nodo de captura

8.1.2. Integración del sensor PIR

8.1.3. Captura de imágenes

8.1.4. Compresión y transmisión

8.1.5. Fabricación de la carcasa 3D

8.2. Nodo raíz (root-node)

8.2.1. Firmware del nodo raíz

8.2.2. Conexión con servidor TCP

8.2.3. Gestión de la red mesh

8.3. Servicio de detección (wildlife-detection)

8.3.1. Contenedor Docker con SpeciesNet

8.3.2. API de inferencia con LitServe

8.3.3. Procesamiento de imágenes

8.4. Servidor de aplicación (server)

8.4.1. Aplicación Django

8.4.2. Integración con SpeciesNet

8.4.3. Bot de Telegram y sistema de alertas

8.4.4. Base de datos PostgreSQL₂₁

8.4.5. Despliegue con Docker Compose

Capítulo 9

Pruebas y Resultados

9.1. Ambiente de pruebas

9.2. Pruebas de conectividad y red mesh

9.2.1. Alcance de la red

9.2.2. Latencia de transmisión

9.2.3. Estabilidad de la conexión

9.3. Pruebas de detección

9.3.1. Detección de fauna silvestre

9.3.2. Detección de humanos

9.3.3. Detección de vehículos

9.4. Evaluación del modelo de IA

9.4.1. Precisión y recall

9.4.2. Tiempo de inferencia

9.5. Pruebas de consumo energético

9.6. Pruebas del sistema de alertas

9.6.1. Tiempo de respuesta

9.7. Análisis de resultados

Capítulo 10

Conclusiones

10.1. Conclusiones generales

10.2. Aportes del trabajo

10.3. Trabajos futuros

10.4. Recomendaciones

Capítulo 11

Bibliografía

- [1] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick y A. Farhadi, «You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection,» *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, págs. 779-788, 2016.

Apéndice A

Esquemáticos del hardware

Apéndice B

Código fuente relevante

B.1. Firmware del nodo mesh

B.2. Firmware del nodo raíz

B.3. Servidor de detección

B.4. Aplicación Django

Apéndice C

Manual de instalación y configuración

C.1. Configuración del firmware

C.2. Despliegue del servidor

C.3. Configuración del bot de Telegram

Apéndice D

Manual de usuario

Apéndice E

Especificaciones técnicas

Apéndice F

Análisis de viabilidad económica