

Aplicación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la vigilancia vectorial y el análisis del riesgo epidemiológico en regiones tropicales

Leidy Nataly Gómez Rodríguez ^a, Leidy Liseth Núñez Rivera ^b,
Msc. Ing. Esp. Marcos Andrés Ramos Castañeda ^c

^a *Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás.*

^b *Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás.*

^c *Ingeniero ambiental y especialista en higiene, seguridad y salud en el trabajo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magister en tecnologías limpias de la Universidad Santo Tomás.*

Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), conocidos como drones, se han consolidado como herramientas innovadoras para el monitoreo ambiental y el control de vectores en salud pública. Mediante una revisión sistemática de 41 artículos científicos y documentos técnicos complementarios, se identificaron tres líneas de aplicación: detección automatizada de criaderos larvales, apoyo a la vigilancia epidemiológica mediante imágenes aéreas georreferenciadas, y ejecución directa de intervenciones, como la aspersión de larvicidas o la liberación de mosquitos modificados. Estos estudios reportan mejoras significativas en eficiencia operativa, cobertura territorial, precisión del análisis espacial y reducción de índices entomológicos en diversos contextos tropicales, urbanos y rurales.

La necesidad de integrar drones en estos entornos se justifica por el aumento sostenido de enfermedades transmitidas por vectores como dengue, zika, chikunguña y malaria, cuya distribución está influenciada por factores ambientales, sociales y climáticos. Variables como temperatura, humedad relativa y precipitación acumulada favorecen la reproducción de vectores y han provocado desplazamientos altitudinales y expansión territorial de estas enfermedades en países como Colombia, donde los eventos asociados a El Niño y La Niña agravan la exposición poblacional.

Como propuesta metodológica desde la ingeniería ambiental, se plantea el diseño e implementación de sistemas UAV adaptados al territorio colombiano, dotados de sensores ópticos, térmicos y algoritmos de inteligencia artificial, con capacidad para identificar criaderos invisibles desde tierra, ejecutar intervenciones aéreas focalizadas y alimentar modelos predictivos. La viabilidad técnica está documentada, pero su adopción requiere inversión sostenida, fortalecimiento de capacidades locales, adecuación normativa y estrategias de comunicación comunitaria. El artículo concluye que la incorporación de drones representa una oportunidad estratégica para modernizar la gestión ambiental y epidemiológica de enfermedades vectoriales en entornos tropicales.

Palabras clave: *Drones, UAV, vigilancia vectorial, Colombia.*

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAV), commonly known as drones, have emerged as innovative tools for environmental monitoring and vector control in public health. Through a systematic review of 41 scientific articles and complementary technical documents, three main application areas were identified: automated detection of larval breeding sites, support for epidemiological surveillance through georeferenced aerial imagery, and direct implementation of interventions such as larvicide spraying or release of genetically modified mosquitoes. These studies report significant improvements in operational efficiency, territorial coverage, spatial analysis accuracy, and reductions in entomological indices across various tropical, urban, and rural settings.

The integration of drones in these environments is justified by the sustained increase in vector-borne diseases such as dengue, Zika, Chikungunya, and malaria, whose distribution is influenced by environmental, social, and climatic factors. Variables such as temperature, relative humidity, and accumulated precipitation favor vector reproduction and have led to altitudinal shifts and territorial expansion of these diseases in countries like Colombia, where El Niño and La Niña events exacerbate population exposure.

From an environmental engineering perspective, a methodological proposal is made for the design and implementation of UAV systems adapted to Colombian territory, equipped with optical and thermal sensors and artificial intelligence algorithms capable of identifying breeding sites invisible from the ground, executing targeted aerial interventions, and feeding predictive models. Although technical feasibility is documented, successful adoption requires sustained investment, strengthening of local capacities, regulatory adaptation, and community communication strategies. The article concludes that incorporating drones represents a strategic opportunity to modernize environmental and epidemiological management of vector-borne diseases in tropical settings.

Keywords: *Drones, UAV, vector surveillance, Colombia.*

1. Introducción

Las enfermedades transmitidas por vectores han adquirido relevancia crítica dentro de la salud pública global, especialmente en regiones tropicales donde las condiciones ambientales favorecen la persistencia de estos organismos y el aumento de casos clínicos. Según la Organización Mundial de la Salud (2023), América Latina registra millones de episodios de dengue cada año, teniendo a Colombia como uno de los países más afectados. Villar et al. (2015) documentaron que entre 2000 y 2011 el dengue circuló en todo el territorio nacional, con presencia simultánea de los cuatro serotipos y reemergencia de DENV-3. Asimismo, Freitas et al. (2025) señalaron que en Colombia coexisten brotes de dengue, Chikunguña y Zika, concentrados en zonas cálidas, densamente urbanizadas y con vulnerabilidad estructural, lo que demanda respuestas integrales para mitigar su expansión territorial.

El comportamiento ecológico de los vectores está fuertemente condicionado por factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa y la precipitación acumulada. González, Paz y Ferro (2014) evidenciaron que especies como *Lutzomyia longipalpis* y *Lutzomyia evansi*, principales

vectores de la leishmaniasis visceral y cutánea, modifican su distribución bajo escenarios de cambio climático, desplazándose hacia zonas de mayor altitud. Este desplazamiento es crítico, dado que la dinámica de transmisión de la leishmaniasis está estrechamente ligada a la degradación de hábitats y cambios en el uso del suelo. Por su parte, Siraj et al. (2014) demostraron que la malaria también asciende ecológicamente en años más cálidos, afectando comunidades previamente libres de transmisión. En Bangladesh, Chowdhury et al. (2018) establecieron correlaciones entre variables climáticas y enfermedades sensibles al clima como malaria, diarrea, meningitis y fiebre entérica, mostrando cómo las lluvias intensas, las altas temperaturas y los cambios de estación influyen directamente en la dinámica epidemiológica. En el caso colombiano, los informes de la Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA, 2023; 2024) advierten que fenómenos como El Niño y La Niña alteran los patrones de precipitación y temperatura en el país, ampliando la ventana de riesgo para brotes vectoriales, especialmente en la región Caribe, los Andes y el piedemonte.

Ante esta problemática, diversas investigaciones han explorado alternativas tecnológicas para fortalecer la vigilancia epidemiológica y ambiental. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), comúnmente conocidos como drones, han sido propuestos como herramientas para superar las barreras físicas, geográficas y operativas que dificultan el monitoreo tradicional. Bouyer et al. (2020) validaron en Brasil el uso de drones DJI M600 para liberar mosquitos estériles, logrando cobertura homogénea del 69 % y eficiencia reproductiva mantenida mediante control térmico. En Zanzíbar, el uso de drones Agras MG-1S logró una reducción larvaria del 99,4 % en arrozales tras la aplicación aérea de larvicidas. (Mukabana et al., 2022) Asimismo, algoritmos como *YOLOv3* y *SAM* han permitido automatizar la detección de criaderos y cuerpos de agua a partir de imágenes UAV, con precisiones que superan el 70 % (Bhutad & Patil, 2023; Trujillano et al., 2024).

La aplicabilidad de esta tecnología en Colombia es especialmente relevante en contextos urbanos como Bogotá, donde la densidad poblacional, la irregularidad en la planificación y la expansión de zonas periurbanas favorecen la presencia de vectores aún en altitudes elevadas. El sistema SIVIEN AEDES ha sido un avance en vigilancia vectorial digital, combinando entomología, modelos predictivos y georreferenciación a escala de manzana (Guagliardo et al., 2019). Sin embargo, los estudios revisados demuestran que la incorporación de drones permitiría mejorar la cobertura cartográfica, identificar criaderos ocultos, optimizar el uso de larvicidas y reducir la exposición del personal sanitario en campo.

En este contexto, el presente artículo de revisión analiza el uso de UAV como herramienta innovadora en salud ambiental para la vigilancia y el control vectorial en entornos tropicales, proponiendo una perspectiva desde la ingeniería ambiental con enfoque territorial colombiano.

2. Metodología de revisión sistemática

Para la elaboración de este artículo de revisión, se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica en la base de datos Scopus, seleccionada por su cobertura multidisciplinaria y rigor académico. El objetivo fue identificar, analizar y sintetizar la evidencia disponible relacionada con el uso de drones en el monitoreo de criaderos de vectores transmisores de enfermedades en contextos

tropicales, considerando su relación con variables ambientales y su aplicabilidad en el modelo de salud pública colombiano.

2.1. Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo utilizando la base de datos Scopus como fuente de consulta. Se estableció un rango de búsqueda entre los años 2013 y 2025, basado en criterios de actualidad, pertinencia y evolución científica del tema.

Tal como señala Moncada (2014), los periodos de búsqueda pueden clasificarse en tres categorías:

- Últimos 20 años: si bien ofrecen un espectro amplio, implican un alto riesgo de incluir información desactualizada o poco relevante frente a los avances recientes en el campo.
- Últimos 10 años: representan un rango intermedio que puede ser útil en caso de no alcanzar el volumen esperado de publicaciones actuales.
- Últimos 5 años: son los más adecuados para capturar literatura reciente, relevante y alineada con los desarrollos tecnológicos más recientes, especialmente en temas como drones y salud ambiental.

Con base en lo anterior, se priorizaron los artículos de los últimos cinco años, aunque también se incluyeron estudios más antiguos, 2013 en adelante, cuando su contenido aporta valor teórico o contextual al tema.

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo utilizando ecuaciones de búsqueda específicas, asegurando la inclusión de estudios pertinentes al tema de investigación. Las ecuaciones utilizadas fueron:

- "vectors AND epidemiology"
- "vectors AND epidemiology AND drones"
- "unmanned AND aerial AND vehicles AND UAV AND salud"

Para robustecer la búsqueda, se incluyeron sinónimos y variantes terminológicas, asegurando que la variabilidad climática, aunque no fuera un término principal se analizara como una variable transversal dentro de los estudios epidemiológicos y ambientales seleccionados.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Para la selección de los diferentes artículos, se aplicaron los siguientes criterios para una mejor calidad en la búsqueda:

Criterios de inclusión:

- Artículos publicados entre 2013 y 2025.
- Documentos con acceso completo al texto.
- Estudios sobre UAV aplicados al monitoreo de vectores.
- Investigaciones en países tropicales o con condiciones climáticas comparables a Colombia.

- Artículos con aplicación en salud pública, epidemiología y enfermedades transmitidas por vectores.
- Estudios disponibles en español, inglés y portugués.

Criterios de exclusión:

- Estudios sin acceso a texto completo.
- Artículos duplicados.
- Investigaciones teóricas sin aplicación en campo.
- Estudios en idiomas distintos a los mencionados.
- Estudios en países con condiciones climáticas no comparables con Colombia.

2.3. Proceso de selección, análisis y organización de la información

El proceso de selección se llevó a cabo en dos etapas: En primer lugar, se identificaron 120 artículos en la base de datos Scopus, de los cuales, Tras la lectura de títulos y resúmenes, se descartaron aquellos que no cumplieran con los criterios de aplicación técnica en campo. Para la selección definitiva, Se consolidó una muestra de 40 artículos para el análisis integral. De estos, se extrajeron datos sobre tecnología utilizada (sensores, modelos de drones), especies de vectores analizadas y resultados de precisión en la identificación de criaderos.

Para la clasificación inicial, se empleó una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se registraron los siguientes campos básicos por cada artículo:

- Título
- Autores
- Año de publicación
- Revista o editorial
- Resumen

Posteriormente, se construyó un filtrado más detallado, incluyendo columnas adicionales como:

- Palabras clave
- Título en inglés y español
- Base de datos de origen
- Enlace de acceso al artículo
- Nombre de la revista o publicación
- Filtros temáticos: vectores, epidemiología y drones (UAV)

Los artículos fueron categorizados mediante un sistema de codificación por colores, donde los colores primarios se asignaron a estudios que abordaban únicamente una temática (por ejemplo, solo vectores, solo drones o solo epidemiología).

En cambio, los colores secundarios identificaban aquellos artículos que integraban dos o más ejes temáticos en combinación, tales como:

- "UAV y vectores"
- "UAV y epidemiología"
- "UAV, epidemiología y vectores"

Una vez seleccionados los artículos, se procedió a su lectura crítica y análisis sistemático, organizando la información en ejes temáticos para estructurar el presente documento. En el desarrollo de estos capítulos, se priorizó la síntesis de datos sobre el impacto de los drones en la identificación de criaderos y su relación con variables ambientales. Si bien el cambio climático no se empleó como término de búsqueda inicial, emergió como un factor determinante en la literatura seleccionada, permitiendo analizar cómo la tecnología UAV facilita el monitoreo de vectores en escenarios de variabilidad climática y su aplicabilidad dentro del enfoque epidemiológico en países tropicales.

En cuanto a las herramientas utilizadas, se empleó Microsoft Excel para la organización, codificación y filtrado de los documentos. La gestión fue manual y supervisada, lo que garantizó trazabilidad, claridad en las decisiones y coherencia metodológica durante todo el proceso.

A continuación, se presenta una selección de los estudios más representativos de la muestra de 40 artículos, priorizando aquellos con mayor relevancia técnica, aplicaciones y resultados en contextos tropicales:

Tabla 1. Sintetización de hallazgos representativos en el uso de UAV para vigilancia vectorial (Muestra seleccionada n=40).

Autores	País	Aplicación	Tecnología	Resultado	Tecnología complementaria o IA
Bouyer et al. (2020)	Brasil	Liberación de mosquitos estériles	DJI M600 con control térmico	Cobertura del 69%, viabilidad conservada	No aplica
Lee et al. (2021)	Ecuador	Mapeo de brote de dengue	UAV RGB + censos comunitarios	OR: 11.3 por vegetación cercana	SIG
Muñiz-Sánchez et al. (2022)	México	Índice de riesgo vectorial	UAV RGB de 20MP	Clasificación por vivienda de riesgo	Modelos multivariados
Bhutad & Patil (2023)	India	Detección automática de criaderos	YOLOv3 optimizado con UAV	+14% en precisión, georeferenciación	MLOps / Visión computacional
Trujillano et al. (2024)	Malaria en 5 países	Segmentación de cuerpos de agua	Modelo SAM sobre imágenes UAV	Precisión: 73% cuerpos de agua	Segment Anything Model
Freitas et al. (2025)	Colombia	Modelado espacial de epidemias	UAV sugerido para integración	Correlación de enfermedades con clima	Modelos espaciales conjuntos

Guagliardo et al. (2019)	Colombia	Sistema SIVIEN AEDES	UAV sugerido para fortalecer SIG	Escala manzana, georreferenciación precisa	SIG + bioensayos vectoriales
Teitelbaum et al. (2024)	Varios países	Investigación ecológica de enfermedades	UAV con sensores térmicos e hiperspectrales	Mejora en resolución y frecuencia de muestreo	Sensores remotos / SIG
Amarasinghe et al. (2017)	Sri Lanka	Identificar criaderos de mosquitos del dengue capaces de retener agua	UAV RGB de 20MP	Un nivel satisfactorio de precisión en la identificación de posibles zonas de retención de agua que depende del ángulo de inclinación de la cámara del dron y del efecto de las sombras.	No Aplica
Aragão et al., 2020	Brasil	Identificación de criaderos de mosquitos	Vehículos aéreos no tripulados (VANT)	Identificación eficaz de sitios de cría de mosquitos	No especificado
González et al., 2014	Colombia	Predicción de cambios altitudinales en la distribución de vectores de Leishmania	Modelos predictivos	Predicción de cambios en la distribución de vectores de Leishmania bajo escenarios de cambio climático	No especificado
Gustavo et al., 2021	Brasil	Identificación automática de criaderos de Aedes aegypti utilizando visión por computadora	Sistema de visión por computadora	Identificación automática de criaderos de <i>Aedes aegypti</i> utilizando drones y visión por computadora	No especificado
Hardy et al., 2017	Gambia	Mapeo de hábitats de vectores de malaria utilizando drones de bajo costo	Drones de bajo costo	Mapeo efectivo de hábitats de vectores de malaria	No especificado
Król-Calkowska & Walczak, 2022	Polonia	Minimización del riesgo sanitario durante la epidemia de COVID-19	Drones	Uso de drones para minimizar el riesgo sanitario durante la epidemia de COVID-19	No especificado
Muvunyi et al., 2025	Ruanda	Estrategia multisectorial One Health para la fiebre del Valle del Rift	No especificado	Mejora en la seguridad sanitaria global a través de una estrategia multisectorial One Health	No especificado
Marubini et al., 2025	Sudáfrica	Caracterización de hábitats larvales de <i>Anopheles arabiensis</i>	No especificado	Caracterización detallada de hábitats larvales de <i>Anopheles arabiensis</i> en KwaZulu-Natal	No especificado

Mukabana et al., 2022	Tanzania	Manejo de fuentes larvales de mosquitos en áreas amplias utilizando drones	Drones	Manejo efectivo de fuentes larvales de mosquitos utilizando drones	No especificado
Rosser et al., 2024	Estados Unidos	Clasificación de basura para mapear posibles criaderos de <i>Aedes aegypti</i>	VANT con imágenes aéreas	Desarrollo de un sistema de clasificación de basura utilizando imágenes aéreas desde VANT	No especificado
Siraj et al., 2014	Etiopía/Colombia	Cambios altitudinales en la incidencia de malaria	No especificado	Estudio sobre cambios altitudinales, como inciden en enfermedades como la malaria.	No especificado

Fuente: Propia.

3. Marco conceptual sobre vectores, clima y vigilancia epidemiológica

Las enfermedades transmitidas por vectores representan un desafío persistente en salud pública mundial, particularmente en regiones tropicales donde las condiciones ambientales favorecen su proliferación. Géneros como *Aedes* y *Anopheles* son responsables de transmitir arbovirus como dengue, zika, chikunguña y parásitos del género *Plasmodium*, causantes de la malaria. El ciclo de vida de estos insectos abarca una fase acuática (huevo, larva, pupa) y una fase adulta, con una fuerte dependencia de variables como temperatura, humedad, calidad del agua y vegetación circundante.

Desde la perspectiva de la salud pública, la vigilancia epidemiológica se define como el proceso sistemático de recolección, análisis e interpretación de datos sobre enfermedades o eventos de salud en una población, con el fin de detectar brotes, identificar factores de riesgo y orientar intervenciones preventivas y de control. En el caso de enfermedades vectoriales, esta vigilancia permite anticipar zonas de riesgo, evaluar la efectividad de campañas sanitarias y diseñar estrategias focalizadas basadas en evidencia geoespacial (Freitas et al., 2025).

En Sudáfrica, Marubini et al. (2025) evidenciaron que los criaderos larvales más productivos de *Anopheles arabiensis* se concentran en cuerpos de agua temporales con características fisicoquímicas específicas: pH neutro-alcalino, turbidez moderada y baja salinidad. Por su parte, en Brasil, Fonseca Júnior et al. (2019) analizaron la expansión de *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* durante tres décadas, destacando su capacidad adaptativa en contextos urbanos, con coocurrencia superior al 93 % de los municipios evaluados. Este comportamiento se relacionó directamente con el aumento de la temperatura media y la estacionalidad, siendo el primer trimestre del año el más favorable para su desarrollo.

En Colombia, Talbot et al. (2021) identificaron que, en ciudades como Ibagué, la densidad de mosquitos *Aedes* está asociada con factores microambientales como vegetación decorativa, número de ocupantes por vivienda y puntos de entrada abiertos. Freitas et al. (2025) demostraron que la temperatura media fue el principal predictor ambiental del riesgo epidémico de dengue, zika y

chikunguña en el país, seguida por la vegetación y el acceso a salud. En un análisis conjunto entre Etiopía y Colombia, Siraj et al. (2014) señalaron que en años más cálidos la malaria se desplazó altitudinalmente hacia zonas previamente libres de transmisión, evidenciando la sensibilidad climática del vector *Anopheles* y la necesidad de reforzar la vigilancia en regiones montañosas.

A nivel internacional, la tecnología ha emergido como una aliada clave. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), comúnmente denominados drones, se han incorporado progresivamente al monitoreo ambiental y a la vigilancia entomológica. Teitelbaum et al. (2024) plantean que estas plataformas permiten integrar datos ópticos, térmicos e hiperspectrales en estudios espaciales de enfermedades infecciosas, mejorando la resolución y la frecuencia del muestreo frente a métodos convencionales. Trujillano et al. (2024) utilizaron el modelo *SAM* para segmentar automáticamente imágenes UAV en zonas endémicas, logrando valores de precisión del 73 % para cuerpos de agua y 67 % para viviendas. Esta capacidad de reconocimiento asistido contribuye a acelerar la digitalización de mapas de riesgo. En ambientes urbanos, Bhutad y Patil (2023) desarrollaron un sistema de detección de criaderos con *YOLOv3*, mejorando la precisión en un 14 % y optimizando el tiempo de procesamiento de imágenes georreferenciadas.

En Brasil, Bouyer et al. (2020) validaron la liberación aérea de mosquitos estériles desde drones DJI M600, alcanzando cobertura homogénea en áreas urbanas amplias. El control de temperatura durante el vuelo y la precisión en la dispersión evidencian la viabilidad técnica para aplicar estrategias de manejo biológico desde UAV. En México, Muñoz-Sánchez et al. (2022) desarrollaron un índice de riesgo por vivienda usando imágenes RGB captadas por drones, clasificando zonas según riesgo entomológico larval, pupal y adulto. En Ecuador, Lee et al. (2021) mapearon un brote de dengue mediante drones, censos comunitarios y vigilancia activa, estableciendo correlaciones entre vegetación cercana y riesgo de infección sintomática.

En América Latina, la integración de esta tecnología ha adoptado enfoques interdisciplinarios. En Colombia, Guagliardo et al. (2019) desarrollaron el sistema SIVIEN AEDES, que combina datos entomológicos, SIG y bioensayos de resistencia a insecticidas. La aplicación móvil Aedes INSpector permitió georreferenciar criaderos y generar mapas de riesgo a escala de manzana, demostrando que la inclusión de UAV podría ampliar la cobertura en zonas de difícil acceso. En ciudades como Bogotá, donde la urbanización acelerada genera barreras físicas para el monitoreo, el uso de drones permite inspeccionar patios, techos y quebradas inaccesibles, optimizando tiempos y reduciendo la exposición directa del personal sanitario en campo.

En síntesis, los drones no solo ofrecen mejoras en resolución y cobertura, sino que permiten integrar datos ambientales, sociales y epidemiológicos en tiempo real. Su aplicabilidad en Colombia, especialmente en regiones urbanas y rurales con alta carga vectorial, representa una oportunidad estratégica para fortalecer los sistemas de salud pública mediante soluciones de ingeniería ambiental, geoespacial y biotecnológica.

4. Aplicaciones de UAV en vigilancia y control vectorial

La vigilancia epidemiológica ante el aumento de enfermedades transmitidas por vectores ha impulsado el uso de drones como herramienta clave para el análisis del entorno. Su principal ventaja radica en la capacidad de generar productos cartográficos de alta precisión como ortomosaicos bidimensionales, modelos tridimensionales (3D) y modelos digitales de elevación (MDE) con una resolución espacial y temporal superior a la de los sensores satelitales convencionales. Esta tecnología permite la reconstrucción detallada del paisaje urbano y rural a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y fotogrametría digital, facilitando la identificación de micro-criaderos de mosquitos en zonas de difícil acceso, como techos, canales pluviales o áreas de vegetación densa. En escenarios donde la precisión geoespacial es crítica, los drones ofrecen una ventaja operativa al cubrir mayores áreas con cámaras estabilizadas de alta resolución, asegurando la calidad métrica de los insumos generados (Zulfadli et al., 2024).

Sin embargo, las regulaciones actuales limitan significativamente su operatividad, especialmente en entornos urbanos o sobre aglomeraciones de personas. En diversos países donde se implementa esta tecnología, existen normativas que restringen los vuelos más allá de la línea de vista visual (*BVLOS*, por sus siglas en inglés), requiriendo autorizaciones específicas y prohibiendo el sobrevuelo de áreas densamente pobladas sin permisos especiales de la autoridad aeronáutica. El hecho de que muchas legislaciones aún no contemplen de forma explícita las aplicaciones en salud pública representa un vacío legal y administrativo que ralentiza su adopción sistemática (Steven et al., 2024). En el contexto nacional, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) regula la operación de estas aeronaves mediante el Reglamento Aeronáutico de Colombia (RAC 100). Esta normativa establece requisitos estrictos para el registro, la capacitación de operadores y la obtención de permisos para vuelos en áreas pobladas, lo cual constituye un desafío técnico-administrativo que los proyectos de salud ambiental en Colombia deben integrar desde su fase de planeación para garantizar la viabilidad jurídica de las misiones de vigilancia.

A pesar de estas limitaciones, se han documentado avances significativos a nivel global. En Polonia, se registró el uso de drones para detectar focos de reproducción de *Aedes aegypti* mediante el uso de sensores térmicos y multiespectrales, lo que permitió refinar los mapas de riesgo epidemiológico. Asimismo, se han empleado plataformas aéreas para la dispersión de biocidas y larvicidas en zonas geográficamente complejas, reduciendo la exposición del personal sanitario a productos químicos y optimizando la eficiencia operativa en las jornadas de control (Król-Całkowska & Walczak, 2022).

4.1. Monitoreo de criaderos

El monitoreo de criaderos mediante imágenes aéreas permite detectar significativamente más puntos clave de criadero como aquellas zonas de acumulación de desechos, en comparación con los métodos tradicionales de inspección en tierra, con un incremento de hasta 4,4 veces más sitios detectados, especialmente en áreas inaccesibles a pie, como patios cerrados (Tarpenning et al., 2025). Para la fase de monitoreo de criaderos, los drones permiten la captura de imágenes aéreas de alta resolución, incluyendo sensores térmicos y RGB, para detectar hábitats larvarios en áreas inaccesibles como asentamientos informales, techos, quebradas o zonas selváticas (Trujillano et al., 2024).

En entornos de urbanización desordenada o vegetación densa, esta tecnología ha demostrado eficacia para detectar hábitats invisibles desde la superficie. Lee et al. (2021) emplearon imágenes aéreas en Esmeraldas, Ecuador, identificando una asociación significativa entre la vegetación próxima a las viviendas y el riesgo de infección por dengue (OR = 11.3). Por su parte, Muñiz-Sánchez et al. (2022) en México construyeron un índice de riesgo vectorial por vivienda usando ortomosaicos RGB con resolución de 5 cm/píxel, integrando variables como el tipo de techo y la presencia de recipientes.

De esta forma las limitaciones de imágenes satelitales han sido superadas en la evolución de esta tecnología espacial, en Australia del Sur permitieron la identificación de charcos someros y áreas inundadas clave para *Aedes vigilax* a partir de sensores como MicaSense RedEdge que hace posible la vigilancia de la vegetación de agua mediante diferencias de reflectancia en el NIR, facilitando la clasificación de criaderos (Sarira TV et al., 2020). En Loreto, Perú, se identificaron con drones cuerpos de agua positivos para larvas de *Nyssorhynchus darlingi*, usando clasificación con *Random Forest* y sensores RGB y multiespectrales, priorizando intervenciones de manejo de fuentes larvarias como la aplicación de larvicidas o cebos tóxicos, con efectividad entre el 87 % y el 97 % (Carrasco-Escobar et al., 2019).

La integración de cámaras RGB y multiespectrales permite generar modelos digitales de elevación que facilitan la ubicación de cuerpos de agua temporales. Esta capacidad resultó estratégica durante la emergencia sanitaria por COVID-19, ya que el uso de drones evitó la exposición del personal de salud al eliminar la necesidad de ingresar físicamente a las viviendas, mejorando la seguridad operativa y manteniendo la vigilancia epidemiológica en periodos de confinamiento (Stanton et al., 2021).

A nivel computacional, Bhutad y Patil (2023) desarrollaron un sistema basado en *YOLOv3* para detectar criaderos urbanos en tiempo real, logrando una mejora del 14 % en precisión. Asimismo, Trujillano et al. (2024) aplicaron el modelo *Segment Anything (SAM)* para segmentar cuerpos de agua en regiones endémicas de malaria, con precisiones superiores al 70 %. Finalmente, en Kenia, vuelos con UAV sobre 768 km² permitieron clasificar residuos según su riesgo entomológico, demostrando que la simbiosis entre tecnología y conocimiento comunitario permite identificar no solo criaderos actuales, sino también zonas de riesgo potencial en obras civiles o áreas de vegetación densa (Rosser et al., 2024).

4.2. Vigilancia epidemiológica

La vigilancia epidemiológica se define como el proceso sistemático y continuo de recolección, análisis e interpretación de datos sobre eventos de salud, esencial para la planificación, ejecución y evaluación de las prácticas de salud pública. En el contexto de las enfermedades transmitidas por vectores, esta vigilancia busca no solo el registro de casos clínicos, sino la identificación temprana de factores de riesgo ambientales y la monitorización de las poblaciones de insectos para orientar intervenciones oportunas. La integración de imágenes aéreas con Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha permitido que esta vigilancia avance hacia modelos de análisis espaciales más precisos.

El estudio de Freitas et al. (2025), basado en datos municipales de Colombia, aplicó un modelado multinomial conjunto para mapear simultáneamente dengue, chikunguña y zika, revelando patrones diferenciados por zona climática y acceso a salud. El uso de drones potenciaría estos modelos al incorporar variables microambientales captadas desde el aire que los sensores satelitales no logran detectar debido a su resolución.

Ciertas plataformas permiten la identificación de zonas de riesgo detalladas debido a su capacidad para adaptar sensores que miden la calidad del aire y el estado de la vegetación (Altamira-Colado et al., 2024). En la isla de Unguja, Zanzíbar, se usaron drones DJI Phantom 3 para mapear hasta 30 hectáreas en 30 minutos, identificando criaderos omitidos por inspecciones terrestres. Esto evidencia que el monitoreo tradicional puede presentar deficiencias en zonas de difícil acceso, donde la planificación de campañas se ve limitada. En este sentido, la generación de ortomosaicos sirve para optimizar la eficiencia logística en la distribución de medicamentos y mosquiteros tratados (Hardy et al., 2017).

Teitelbaum et al. (2024) propusieron que los UAV, en conjunto con sensores ópticos e hiperespectrales, mejoran la investigación ecológica al detectar cambios sutiles en la humedad y la acumulación de agua superficial. Esta perspectiva fortalece sistemas como el SIVIEN AEDES en Colombia (Guagliardo et al., 2019), el cual integra datos entomológicos y SIG. La inclusión de UAV mejoraría la cobertura espacial de estos sistemas, especialmente en zonas periféricas y asentamientos informales.

Para el análisis fotogramétrico, herramientas como *Agisoft Metashape* (anteriormente *Photoscan Pro*) permiten construir ortomosaicos georreferenciados con corrección topográfica. Estas ortoimágenes son esenciales para la modelación espacial en entornos selváticos y periurbanos colombianos (Zulfadli et al., 2024). Por ejemplo, González, Paz y Ferro (2014) modelaron desplazamientos altitudinales de *Lutzomyia* spp. en Colombia, sugiriendo que los drones pueden asistir en el seguimiento de vectores en regiones montañosas afectadas por el cambio climático.

Finalmente, las limitaciones logísticas de los muestreos terrestres se ven superadas mediante el uso de visión computacional. En São Paulo, el sistema *YOLOv4* logró una clasificación del 92 % de criaderos, integrando los resultados en mapas interactivos con una resolución de hasta 3 cm/píxel (Tarpennig et al., 2025). Esta precisión geoespacial proporciona un insumo fundamental para el análisis de la distribución del vector en contextos urbanos complejos.

4.3. Control directo

El desarrollo de sistemas de drones que integren inspección aérea, procesamiento automatizado de imágenes, georreferenciación y aplicación de larvicidas biológicos es fundamental para tecnificar el manejo químico de vectores (Amarasinghe et al., 2017). En el control directo, los UAV han sido utilizados para la aspersión aérea en reservorios naturales y artificiales, logrando en Brasil y Ghana una reducción de entre el 40 % y el 70 % en la densidad larvaria. Estos resultados se han validado mediante el análisis de imágenes pre y post-intervención, herramientas necesarias para cuantificar el impacto real en las comunidades atendidas (Trujillano et al., 2024).

En Zanzíbar, se demostró la eficacia de drones de precisión, como el modelo Agras MG-1S, para aplicar larvicidas biodegradables basados en *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) en arrozales. Esta intervención redujo hasta en un 99.4 % la densidad larvaria en un periodo de cuatro semanas. La adaptación de bombas mecánicas y la programación de planes de vuelo autónomos permitieron cubrir un área de 7.400 m² en menos de 23 minutos, demostrando ser entre 2 y 6 veces más rápido que la aplicación manual convencional (Mukabana et al., 2022). Esta eficiencia operativa representa una oportunidad clave para la optimización de los recursos públicos y la reducción de los tiempos de respuesta ante brotes.

Por otro lado, Torres et al. (2022) evidenciaron que en la Amazonía peruana y brasileña la persistencia de la malaria está asociada con factores antrópicos como la deforestación y la minería ilegal. En estos territorios, el uso de UAV facilita la identificación de cuerpos de agua positivos, permitiendo el uso focalizado de larvicidas o la liberación aérea de mosquitos modificados. En México, por ejemplo, se han utilizado drones para liberar machos infectados con la bacteria *Wolbachia*, los cuales mantienen su funcionalidad reproductiva hasta por 72 horas tras el proceso de enfriamiento necesario para el transporte aéreo.

Finalmente, Muvunyi et al. (2025) proponen incorporar drones en la estrategia One Health para realizar liberaciones dirigidas y supervisión ganadera, validando su utilidad en zonas rurales con alta exposición zoonótica. En conjunto, estas aplicaciones demuestran que los UAV representan herramientas eficaces y adaptables para el manejo de vectores, especialmente en contextos tropicales como el colombiano, donde la complejidad geográfica y social exige soluciones de ingeniería de alta precisión y bajo riesgo operativo.

5. Ventajas operativas y limitaciones técnicas

La incorporación de drones en programas de vigilancia vectorial ha evidenciado ventajas estratégicas en entornos tropicales. A diferencia de los métodos tradicionales, los UAV permiten ampliar la cobertura espacial, reducir riesgos para el personal sanitario y optimizar los tiempos de intervención.

5.1. Eficiencia y procesamiento de datos

Una de las ventajas más destacadas es la capacidad de realizar vuelos automatizados sobre zonas inaccesibles, con una eficiencia que supera entre 2 y 6 veces el rendimiento de las intervenciones manuales. Bouyer et al. (2020) respaldan esta capacidad operativa al reportar que la liberación aérea de mosquitos estériles desde UAV permite cubrir 20 hectáreas en solo 12 minutos, conservando la viabilidad reproductiva de los insectos mediante control térmico durante el vuelo.

En términos de procesamiento de información, Trujillano et al. (2024) evidenciaron que los modelos de segmentación automática como *SAM* permiten acelerar significativamente la digitalización de mapas epidemiológicos. El sistema fue capaz de identificar cuerpos de agua y viviendas en imágenes UAV con precisiones superiores al 70 %, lo que representa una ventaja frente a la segmentación

manual, especialmente en zonas rurales con baja conectividad. Igualmente, Bhutad y Patil (2023) desarrollaron un sistema basado en *YOLOv3* que detecta criaderos urbanos en tiempo real, con una mejora del 14 % en precisión y georreferenciación automática, favoreciendo la integración con sistemas públicos de vigilancia.

5.2. Limitaciones técnicas y económicas

El despliegue de drones también enfrenta limitaciones importantes que deben ser abordadas antes de su adopción masiva en salud pública. El costo inicial de adquisición es elevado, especialmente cuando se requiere integrar cámaras térmicas o multiespectrales, como las utilizadas por Muñoz-Sánchez et al. (2022) para generar ortomosaicos RGB en Tapachula. A esto se suman los gastos de mantenimiento, software especializado y capacitación técnica del personal, que pueden representar una barrera para municipios con recursos limitados.

Factores como la resolución de las cámaras debe tenerse en cuenta ya que en estudios como el de Tapachula (con cámaras de 20 MP) no permitió distinguir con precisión si los contenedores observados contenían agua, elemento fundamental para confirmar un criadero. Por ello, se ha sugerido el uso de tecnologías como visión computacional, algoritmos tipo *YOLOv4* o redes neuronales convolucionales, así como cámaras multiespectrales para mejorar la detección de criaderos potenciales, complementándose con inspecciones y datos locales, así como repetir vuelos en distintas estaciones para evaluar la estabilidad temporal de las condiciones de la zona (Valdez-Delgado et al., 2021) (Rosser et al., 2024)

Esto afianza el concepto de un costo elevado para la adquisición de drones, ya que también, la compra de cámaras multiespectrales y térmicas, así como los sistemas de análisis, necesarios para el correcto resultado del estudio de zonas de alto impacto representa un incremento adicional al equipo. Además, para campañas donde se integre la aspersión de larvicidas especializados como el AMF puede ser una barrera en contextos con presupuestos restrictivos. Asimismo, en zonas donde no se cuenta con talleres o servicios técnicos locales, las reparaciones pueden resultar complejas y costosas. (Mukabana et al., 2022)

En cuanto al procesamiento de imágenes, el uso de software como *Agisoft Metashape* y el manejo de grandes volúmenes de datos (en algunos casos más de 6 GB por vuelo) requiere equipos de alto rendimiento, conexión a internet robusta y personal capacitado en fotogrametría y análisis espacial, lo cual no está disponible en todos los municipios del país. Si bien se han desarrollado alternativas locales como drones de bajo costo y centros de formación (como el African Drone and Data Academy en Malawi), en Colombia aún se requieren iniciativas similares para consolidar esta tecnología dentro de las capacidades institucionales (Stanton et al., 2021).

Se sabe que día a día la tecnología se encamina al avance en diferentes áreas para facilitar tareas que requieran de intervenciones humanas complejas, por esto la clasificación automática de imágenes es prometedora. Sin embargo, aún enfrenta desafíos de precisión, especialmente cuando se aplican algoritmos entrenados en zonas con coberturas distintas a las del nuevo entorno. Por ejemplo, se encontró en el estudio que la precisión bajó significativamente al extrapolar modelos fuera del área

de entrenamiento, lo que implica que cada zona endémica en Colombia podría requerir su propio modelo calibrado para asegurar resultados confiables (Stanton et al., 2021).

5.3. Factores ambientales, legales y sociales

Las condiciones climáticas también afectan la efectividad de los drones como la presencia de vientos fuertes, lluvia o interferencias electromagnéticas que pueden comprometer la calidad de las imágenes captadas y la seguridad del vuelo. Torres et al. (2022) destacan que, en zonas amazónicas con alta humedad y vegetación densa, la presencia de copas arbóreas puede disminuir la precisión del monitoreo aéreo, especialmente en la detección de cuerpos de agua ocultos.

Además, si consideramos factores como las condiciones de iluminación, el reflejo en superficies brillantes, y la presencia de objetos de tamaño pequeño o parcialmente ocultos puede ser determinante y afectar la precisión de los modelos de detección automática. En particular, los algoritmos pierden efectividad a altitudes superiores a 30 metros, como sucede en zonas con edificaciones elevadas, lo que plantea la necesidad de calibración específica para cada escenario urbano (Yafoz, 2024).

La presencia de vegetación sobre el agua puede aumentar artificialmente la reflectancia NIR, llevando a clasificarlas como áreas secas. Esto ocurre incluso cuando el agua está presente bajo las copas vegetales, lo que afecta la precisión de los mapas y puede derivar en subestimación de zonas de riesgo (Sarira TV et al., 2020).

Con base en esto es necesario pensar sobre el ajuste de los parámetros como temperatura, tiempo de enfriamiento y manipulación según las condiciones locales de temperatura y humedad, no solo para reducir errores en la identificación de zonas con alto potencial para criaderos larvarios, si no, que al tenerse dentro del plan de manejo la liberación de machos con condiciones modificadas a favor para reducir la eficiencia en la reproducción de estos individuos, el estrés térmico puede afectar momentáneamente la capacidad de copulación. Aunque los resultados mostraron que los machos recuperan su funcionalidad entre las 24 y 48 horas post-liberación, este factor puede retrasar el impacto esperado en campo (Valdez-Delgado et al., 2023).

En el aspecto operativo, la autonomía de las baterías (generalmente de 20 minutos) restringe el alcance por misión, obligando a una planificación segmentada. A esto se suma la incertidumbre normativa en ciudades como Bogotá, donde las restricciones para vuelos en áreas pobladas y la prohibición de operaciones más allá de la línea de vista (*BVLOS*) frenan el monitoreo de techos y patios cerrados. A esto se suma la interferencia de señal en áreas urbanas con muchas torres de telecomunicaciones lo que hace que el resultado final tenga mayores contratiempos ya que las baterías empleadas en estos dispositivos suelen permitir vuelos de corta duración, que en promedio no superan los 20 minutos por vuelo, lo que podría restringir el alcance de cada operación (Amarasinghe et al., 2017) (Valdez-Delgado et al., 2021).

Finalmente, la resistencia social es una barrera crítica. El uso de UAV puede percibirse como una invasión a la privacidad, lo que exige estrategias de sensibilización y diálogo con líderes comunitarios para garantizar la aceptación de la tecnología (Gustavo A et al., 2021).

6. Evidencia científica en entornos tropicales

Los estudios recientes han demostrado que el uso de drones en vigilancia entomológica y epidemiológica puede generar resultados concretos en términos de detección de criaderos, reducción de índices larvarios y disminución del riesgo clínico. Esta evidencia proviene de entornos urbanos densamente poblados, zonas rurales de difícil acceso y territorios tropicales con alta carga vectorial, lo que confirma la versatilidad de esta tecnología.

6.1. Precisión en la identificación de hábitats

En Tapachula, México, Muñiz-Sánchez et al. (2022) construyeron un índice de riesgo por vivienda mediante imágenes aéreas RGB con resolución de 5 cm/píxel. El análisis multivariado permitió identificar hasta 30 variables de riesgo, con precisión suficiente para clasificar viviendas en función de su exposición a criaderos larvales, pupales o adultos. Este modelo fue capaz de discriminar entre entornos urbanos de alto y bajo riesgo con base en estructuras observables desde UAV.

Los estudios donde se realizan mapas basado únicamente en el infrarrojo cercano (NIR) se ha registrado una exactitud global de 66.2 %, mientras que el mapa que combinó NIR y NDVI alcanzó una exactitud significativamente mayor de 80.3 % y un coeficiente de Kappa de 0.5, lo cual representa un acuerdo moderado entre los datos clasificados por el dron y las observaciones en tierra. Este aumento en precisión demostró que la integración de múltiples bandas espectrales mejora la capacidad de discriminación de hábitats potenciales de cría (Sarira TV et al., 2020).

En Ecuador, el análisis espacial de Lee et al. (2021) evaluaron un brote de dengue en una comunidad rural, aplicando drones para mapear zonas de vegetación, acumulación de residuos y proximidad a espacios públicos. Se encontró que la vegetación inmediata incrementaba el riesgo de infección (OR: 11.3) y que las viviendas cercanas al campo de fútbol tenían una probabilidad 13.9 veces mayor de reportar casos sintomáticos. El análisis espacial permitió priorizar zonas para intervención, mejorando la eficiencia en la distribución de recursos sanitarios.

6.2. Impacto en el control de vectores

Hasta la fecha se tienen numerosos estudios que respaldan el potencial de los drones en programas de control vectorial. En un proyecto desarrollado en Tanzania (2020), se utilizaron drones para identificar cuerpos de agua durante la temporada de lluvias y realizar aplicaciones selectivas de larvicida biológico. Como resultado, se reportó una reducción del 61 % en los índices larvarios y una disminución del 22 % en los casos de malaria en las zonas intervenidas. (Trujillano et al., 2024) De manera complementaria, la implementación experimental de drones para la aplicación aérea de larvicidas en arrozales del distrito de Cheju (Zanzíbar) aportó evidencia científica robusta sobre su efectividad en la reducción de poblaciones de *Anopheles arabiensis*, un vector clave de malaria en la región. Este estudio demostró que una única aplicación de AMF (monomolecular film biodegradable) a 1 mL/m² fue suficiente para lograr reducciones superiores al 90 % en densidades larvarias y pupales, con efectos residuales que persistieron hasta por seis semanas. (Mukabana et al., 2022)

En cuanto a la eficacia, esta fue cuantificada, arrojando reducciones máximas del 94.7 % con 1 mL/m² y del 99.4 % con 5 mL/m² en las semanas cinco y cuatro, respectivamente, antes de comenzar

a decaer por la degradación del producto bajo exposición UV. Esta tendencia refuerza la necesidad de una re-aplicación en ciclos de seis semanas si se desea mantener la supresión poblacional del vector (Mukabana et al., 2022).

A su vez, el estudio comparó esta estrategia con antecedentes de aplicación manual del mismo producto en Kenia, donde los efectos fueron similares, demostrando que el método de aplicación aérea no compromete la eficacia biológica del larvicida, y en cambio mejora el rendimiento operativo. El hecho de que tanto la baja como la alta dosis lograran reducciones semejantes en la emergencia de adultos sugiere que, desde una perspectiva de salud pública y economía, la dosis de 1 mL/m² es óptima (Mukabana et al., 2022).

Asimismo, una de las investigaciones más representativas, llevada a cabo en arrozales de Zanzíbar, demostró que la aplicación aérea de larvicida AMF (Aceite Mineral Formulado) mediante drones logró reducir en más del 90% la densidad larval en un periodo de cuatro a cinco semanas, alcanzando un pico de 99.4% de reducción con la dosis más alta utilizada (5 mL/m²). Aun así, el estudio también reveló que una dosis más baja de 1 mL/m² resultó igualmente efectiva para reducir la emergencia de mosquitos adultos, haciendo de esta una alternativa más rentable (Hardy et al., 2017).

De manera consistente, la eficacia observada fue sostenida a lo largo de distintas etapas del ciclo de vida del mosquito, con disminuciones significativas en las fases larval, pupal y adulta, lo cual respalda su uso dentro de una estrategia integral de Manejo Integrado de Vectores (MIV). Además, los efectos residuales del AMF aplicados con drones se mantuvieron hasta por seis semanas, alineándose con resultados obtenidos en aplicaciones manuales realizadas en estudios anteriores en Kenia (Hardy et al., 2017).

Del mismo modo, en Sri Lanka, un sistema completo basado en drones integró la inspección aérea, selección de imágenes, georreferenciación y liberación de la bacteria *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti), usada como biocida. Esta metodología no solo permitió la identificación precisa de sitios de acumulación de agua, sino también su tratamiento inmediato sin contacto humano, un beneficio crucial durante situaciones de emergencia sanitaria. Además, la incorporación de herramientas de aprendizaje automático como el algoritmo HOG (Histogram of Oriented Gradients) permitió mejorar la precisión en la identificación de criaderos potenciales, incluso en zonas con obstáculos visuales (Valdez-Delgado et al., 2021).

6.3. Integridad biológica y liberación aérea

En Brasil, Bouyer et al. (2020) liberaron mediante UAV un total de 50,400 mosquitos estériles, logrando una cobertura homogénea del 69 % en áreas monitoreadas y recapturas efectivas que validan la dispersión aérea como estrategia reproductiva controlada. Este enfoque fue particularmente útil en entornos urbanos amplios con estructuras cerradas y baja accesibilidad para el personal en tierra.

Durante el estudio realizado en Tapachula (Chiapas, México), se evaluaron diversos aspectos del proceso de liberación, desde el enfriamiento de los mosquitos hasta la recuperación de su capacidad copulativa tras la liberación con drones. Los resultados revelan que temperaturas de 3 ± 1 °C durante

30 minutos permitieron un manejo adecuado sin comprometer significativamente la calidad sexual de los machos. Específicamente, después de 48 horas post-liberación, el 100 % de las hembras fueron inseminadas, confirmando que el UAV no afecta negativamente la competitividad sexual de los ejemplares (Valdez-Delgado et al., 2023).

Estos hallazgos validan que los UAV son plataformas viables que mantienen la integridad biológica de los vectores, incluso tras procesos prolongados de enfriamiento y transporte. Este caso resalta la importancia de adaptar los procedimientos de manejo a las condiciones locales; aunque las bajas temperaturas reducen temporalmente la eficiencia sexual, la recuperación biológica observada refuerza la viabilidad de las liberaciones masivas programadas (Valdez-Delgado et al., 2023).

En el contexto colombiano, Freitas et al. (2025) aplicaron el modelo espacial conjunto a más de 439,000 casos reportados, incluyendo dengue, chikunguña y zika. La incorporación de variables climáticas como temperatura, humedad y vegetación permitió identificar patrones diferenciados entre enfermedades. La posibilidad de integrar imágenes captadas por drones en este tipo de modelos representa una línea futura de mejora en la precisión de los mapas de riesgo.

Por otra parte, diversas investigaciones recientes han documentado la utilidad de drones combinados con redes neuronales (CNN) y visión computacional para tareas de vigilancia entomológica. En São Paulo, el entrenamiento de una red *YOLOv4* (denominada RNC_Obj+Cen) demostró una tasa de acierto del 92.94 % y un mAP-50 de 93.62 % en la identificación de criaderos urbanos, cifras que superan significativamente los resultados de versiones anteriores (Gustavo A et al., 2021). Otros modelos alcanzaron precisiones entre el 67 % y el 80 %, validando el uso de algoritmos avanzados para optimizar el control vectorial en entornos complejos (Valdez-Delgado et al., 2021).

En consecuencia, este tipo de evidencia valida el uso de algoritmos como *YOLOv4* para optimizar el control vectorial en entornos urbanos complejos, y sugiere la viabilidad de replicar estos resultados en zonas tropicales y rurales, ajustando los modelos a condiciones locales y diferentes tipos de criaderos (Gustavo A et al., 2021).

Complementariamente, Trujillano et al. (2024) reportaron que el uso de segmentación automática permite identificar criaderos en cuerpos de agua con una precisión del 73 %, reduciendo el tiempo de digitalización y facilitando la generación de ortomosaicos georreferenciados. La implementación de drones para este mapeo es fundamental: casi el 50 % de los criaderos identificados mediante teledetección aérea no habían sido registrados en inspecciones terrestres debido a la vegetación densa o estructuras urbanas. De hecho, en estudios comparativos, los drones detectaron tres veces más criaderos potenciales que los recorridos manuales, alcanzando una eficacia de identificación del 94 % en la verificación posterior en campo (Hardy et al., 2017).

6.4. Comparativa: Vigilancia terrestre vs. UAV

En la detección de residuos críticos como neumáticos, los UAV detectaron más de cinco veces los puntos identificados manualmente, subrayando su ventaja competitiva para el reconocimiento aéreo de criaderos discretos y dispersos. La combinación de imágenes UAV con datos GPS permitió construir mapas precisos y categorizados por tipo de residuo, facilitando la interpretación espacial del riesgo. Asimismo, la validación en campo mediante métodos de *ground truthing* (verificación de

terreno) robusteció los resultados al confirmar la ubicación y clasificación de los depósitos, permitiendo una evaluación cualitativa basada en precisión visual, exactitud espacial y eficiencia logística (Tarpenning et al., 2025).

Por su parte, Talbot et al. (2021), en un análisis regional que incluyó a Colombia, Ecuador y Argentina, demostraron que la densidad de *Aedes aegypti* se asocia estrechamente con variables microambientales y socioeconómicas. El uso de UAV, integrado con sensores y Sistemas de Información Geográfica (SIG), ofrece la posibilidad de mapear estos determinantes en tiempo real, fortaleciendo las intervenciones focalizadas en sectores vulnerables. Para efectos de visualización técnica, se recomienda la incorporación de mapas de calor de densidad, gráficos de reducción larvaria e indicadores climáticos (temperatura media, humedad y precipitación) para contextualizar los hallazgos epidemiológicos.

En línea con lo anterior, una investigación desarrollada en Maringá, Brasil, utilizó el método *Fuzzy TOPSIS* para seleccionar el modelo de dron más adecuado para la identificación de focos de cría, evaluando criterios técnicos, de costo y desempeño. Los resultados indicaron que el modelo analizado fue superior en cuatro de seis escenarios de sensibilidad, demostrando la estabilidad del método y la confiabilidad del equipo para el trabajo de campo. Este tipo de estudios permite integrar datos ambientales y epidemiológicos a través de modelos multivariados y mapas geoespaciales (Aragão et al., 2020).

Finalmente, en Tapachula (México), se realizó una comparación directa entre los métodos de vigilancia terrestre (Ground Surveillance, GS) y vigilancia con drones (Drone Surveillance, DS) en 216 viviendas. Mientras la inspección terrestre detectó 2752 contenedores distribuidos en 26 categorías, los drones identificaron 983 contenedores correspondientes a 10 tipos, con una concordancia general del 64.9 % entre ambos métodos. La principal ventaja estratégica observada fue la capacidad de los UAV para detectar criaderos en techos y patios traseros que resultaban inaccesibles para el personal de campo (Valdez-Delgado et al., 2021).

7. Innovación tecnológica y perspectivas desde la ingeniería ambiental

La evolución tecnológica en salud pública ha transformado las estrategias de vigilancia vectorial al incorporar Inteligencia Artificial (IA), sensores avanzados y enfoques interdisciplinarios. Estas innovaciones permiten automatizar procesos y adaptar soluciones a entornos complejos. Las perspectivas futuras apuntan hacia una integración de modelos de *Deep Learning* y sensores especializados para un monitoreo epidemiológico de alta precisión.

7.1. Automatización y Visión Computacional

Uno de los avances más notables es la automatización de la detección de criaderos a partir de algoritmos de visión computacional. Bhutad y Patil (2023) desarrollaron un sistema inteligente con *YOLOv3* optimizado, capaz de identificar criaderos urbanos en objetos como latas, botellas y recipientes, con una precisión mejorada en 14 % y tiempo de ejecución reducido a 10 segundos. Esta eficiencia permite su integración en sistemas públicos de vigilancia, con capacidad de georreferenciar riesgos en tiempo real.

Una de las innovaciones más relevantes es el uso de modelos de aprendizaje profundo (*deep learning*), como *YOLOv7* y *YOLOv8*, integrados en UAV capaces de operar en tiempo real con bajo consumo energético. Estos modelos permiten identificar con mayor precisión objetos pequeños, como recipientes plásticos, llantas, o charcos con acumulación de agua, incluso en escenarios de iluminación variable y alta densidad visual, lo cual los hace ideales para zonas urbanas densas como las localidades de Kennedy o Bosa en Bogotá (Yafoz, 2024).

La tendencia actual también explora el uso de modelos de segmentación como *Segment Anything (SAM)*, que ha alcanzado precisiones del 73 % en la identificación de cuerpos de agua (Trujillano et al., 2024). Asimismo, el uso de herramientas como *Google Earth Engine* y *RapidMiner* permite la clasificación automática de sitios de reproducción mediante máquinas de vectores de soporte (SVM) y redes neuronales convolucionales (CNN), permitiendo predecir brotes de dengue antes de que surjan casos clínicos (Król-Całkowska & Walczak, 2022).

7.2. Sensores Avanzados y Análisis Multicriterio

Se proyecta el desarrollo de nuevas tecnologías de sensores, incluyendo térmicos, multiespectrales y LIDAR, capaces de captar información sobre temperatura superficial, humedad relativa, acumulación de agua y densidad de biomasa. Estos sensores, integrados en drones multirrotor o de ala fija, facilitan la vigilancia en entornos selváticos donde la visibilidad aérea es reducida (Steven et al., 2024). Teitelbaum et al. (2024) sugieren que esta sensorización permite capturar indicadores ambientales y reflectancia de la vegetación directamente asociados a la presencia de hábitats larvarios.

En este ámbito, Trujillano et al. (2024) aplicaron el modelo *Segment Anything (SAM)* sobre imágenes UAV en zonas tropicales, alcanzando una precisión del 73 % para cuerpos de agua y 67 % para viviendas. Esta automatización redujo los tiempos de digitalización y facilitó la generación de ortomosaicos georreferenciados para el mapeo rápido de riesgos. Complementariamente, Talbot et al. (2021) demostraron que variables microambientales (vegetación decorativa o apertura estructural de la vivienda) influyen en la densidad de *Aedes aegypti*, permitiendo que los sistemas de IA anticipen brotes por barrio o vivienda.

En México, Muñoz-Sánchez et al. (2022) utilizaron cámaras RGB para crear un índice de riesgo por vivienda, aunque notaron limitaciones para confirmar la presencia de agua en recipientes. Para superar esto, se propone el uso de sensores multiespectrales como el MicaSense RedEdge, que alcanza resoluciones espaciales subdecimétricas antes limitadas por el alto costo de imágenes satelitales (Sarira TV et al., 2020). Asimismo, en ambientes rurales de difícil acceso, Torres et al. (2022) y González et al. (2014) plantean que los sensores NIR y modelos ecológicos apoyan la detección de cuerpos de agua someros en hábitats modificados por deforestación o cambio climático.

7.3. Procesamiento en la nube y optimización de recursos

Uno de los avances más prometedores es la incorporación de modelos de aprendizaje automático y visión computacional que permiten procesar grandes volúmenes de imágenes en corto tiempo, identificando patrones ambientales que favorecen la reproducción vectorial. Con herramientas como

QGIS, Orfeo Toolbox y Agisoft Metashape. Estos permiten automatizar la segmentación y extracción de variables (elevación, vegetación, turbidez) sin depender de sensores NIR costosos, abriendo el camino para tecnologías de bajo costo en municipios con recursos limitados (Stanton et al., 2021).

En paralelo, el desarrollo de plataformas de procesamiento en la nube como *Google Earth Engine* o *DroneDeploy* facilita el análisis remoto de datos, lo que reduce la necesidad de equipos especializados en campo. Estos avances podrían integrarse en tiempo real con sistemas de alerta temprana para brotes de dengue o malaria, especialmente si se combinan con información meteorológica y reportes entomológicos (Stanton et al., 2021).

7.4. Innovación en control directo y autonomía operativa

La transición hacia la aspersión automatizada representa una visión de futuro donde la intervención humana directa se minimiza. Una innovación clave fue la modificación estructural del dron DJI Agras MG-1S, adaptado con bombas mecánicas especiales para manejar la viscosidad del AMF, junto con la reprogramación del software de vuelo. Esto permitió controlar de forma milimétrica la liberación del larvicida a razón de hasta 33 mL/s, con velocidades de operación de entre 2 y 5 m/s y autonomía de vuelo suficiente para cubrir más de 7.400 m² en menos de 23 minutos. El desarrollo de bombas más potentes podría aumentar en un 50 % la velocidad de aplicación, permitiendo cubrir áreas aún mayores en menos tiempo y con menor requerimiento logístico (Mukabana et al., 2022).

En términos de capacidad de carga, modelos como el DJI T30 superan ampliamente a sus predecesores, facilitando la aplicación de biolarvicidas como *Bti* en grandes extensiones de cultivos (ej. arrozales en el Magdalena Medio o el Valle del Cauca), mejorando la cobertura y minimizando el contacto humano con químicos (Hardy et al., 2017).

7.5. Perspectivas desde la ingeniería ambiental y sostenibilidad

Desde la ingeniería ambiental, existe la oportunidad de diseñar prototipos adaptados a diferentes entornos, como drones más ligeros para zonas urbanas densas, o de largo alcance para áreas rurales extensas. También se proyecta el desarrollo de plataformas que combinan drones con estaciones meteorológicas móviles y sensores in situ, promoviendo un enfoque holístico del monitoreo ambiental (Trujillano et al., 2024).

Así mismo se contempla el desarrollo de prototipos de drones adaptados a entornos urbanos y rurales, resistentes a condiciones climáticas adversas y equipados con software de código abierto que facilite su implementación por gobiernos locales, universidades o instituciones de salud pública. Esta visión promueve un enfoque holístico y territorializado del control vectorial, aprovechando el potencial de las tecnologías emergentes (Gustavo A et al., 2021).

Finalmente, la sostenibilidad institucional en Colombia requiere un enfoque territorializado que aproveche el software de código abierto (Gustavo A et al., 2021). Esto implica:

- Formación técnica: Capacitación de operadores bajo estándares de la Aeronáutica Civil (RAC 100).
- Actualización normativa: Liderada por el Ministerio de Salud.
- Ciencia ciudadana: Articulación con redes de vigilancia comunitaria para fortalecer el monitoreo descentralizado del riesgo vectorial.

8. Conclusiones técnicas y recomendaciones

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en estrategias de control vectorial representa una innovación disruptiva con alto potencial de transformación para los sistemas de salud ambiental en Colombia. Desde la ingeniería ambiental, esta tecnología permite integrar vigilancia entomológica, el monitoreo territorial y el manejo focalizado con una precisión y cobertura inalcanzables mediante métodos convencionales.

Los estudios revisados confirman que los drones son altamente efectivos para identificar criaderos en zonas inaccesibles, clasificar riesgos ambientales y optimizar intervenciones mediante datos geoespaciales de alta resolución. La capacidad de generar ortomosaicos, aplicar técnicas de clasificación supervisada y emplear sensores multiespectrales o térmicos ha mejorado significativamente la caracterización de hábitats larvarios. En regiones colombianas donde el control convencional presenta limitaciones logísticas, el uso de UAV permite priorizar cuerpos de agua mediante procesamiento multiespectral y modelos hidrológicos, promoviendo campañas más sostenibles y costo-efectivas.

Sin embargo, esta tecnología no debe concebirse como una solución autónoma, sino como un complemento estratégico a las acciones presenciales y comunitarias. Se requiere fortalecer la triangulación entre datos remotos, validación de campo y conocimiento ecológico local, especialmente en ecosistemas complejos o con cobertura vegetal densa. La incorporación de UAV debe alinearse con protocolos estandarizados, respaldados por normativa técnica clara (como el RAC 100) y mecanismos de verificación en terreno.

Para avanzar hacia una implementación sostenible, se recomienda:

1. Desarrollar pilotos regionales: Integrar UAV con plataformas SIG y herramientas de análisis en la nube para validar la eficacia en diferentes pisos térmicos de Colombia.
2. Fortalecer la formación técnica: Capacitar personal local en análisis multiespectral y procesamiento de imágenes para reducir la dependencia de servicios externos.
3. Consolidar un banco nacional de datos: Crear un repositorio de imágenes etiquetadas y algoritmos entrenados con datos locales para adaptar modelos predictivos al comportamiento específico de los vectores en el país.
4. Articulación interinstitucional: Fomentar la colaboración entre la academia, autoridades de salud (INS), entes ambientales y comunidades rurales.

Finalmente, la integración de UAV en los planes territoriales de salud pública y ordenamiento ambiental debe oficializarse como una herramienta de apoyo para la vigilancia, la liberación de

biolarvicidas y el monitoreo de zonas críticas. En un contexto de cambio climático y urbanización acelerada, los drones ofrecen una vía proactiva y territorializada para innovar en la gestión ambiental de la salud, donde la ingeniería ambiental actúa como el puente esencial entre la tecnología y la realidad ecológica de los territorios.

10. Referencias bibliográficas

1. Amarasinghe, A., Suduwella, C., Niroshan, L., Elvitigala, C., De Zoysa, K., & Keppetiyagama, C. (2017). Suppressing dengue via a drone system. En 2017 International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTER.2017.8257797>
2. Altamira-Colado, E., Cuevas-González, D., Reyna, M. A., García-Vázquez, J. P., Avitia, R. L., & Osornio-Vargas, A. R. (2024). Drone-assisted particulate matter measurement in air monitoring: A patent review. *Atmosphere*, 15(5), 515. <https://doi.org/10.3390/atmos15050515>
3. Amarasinghe, A., Suduwella, C., Niroshan, L., Elvitigala, C., De Zoysa, K., & Keppetiyagama, C. (2017). Suppressing dengue via a drone system. 2017 Seventeenth International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer).
4. Aragão, F. V., Cavicchioli Zola, F., Nogueira Marinho, L. H., De Genaro Chiroli, D. M., Braghini Junior, A., & Colmenero, J. C. (2020). Choice of unmanned aerial vehicles for identification of mosquito breeding sites. *Geospatial Health*, 15(1). <https://doi.org/10.4081/gh.2020.810>
5. Bouyer, J., Culbert, N. J., Dicko, A. H., Gomez Pacheco, M., Virginio, J., Pedrosa, M. C., Garziera, L., Macedo Pinto, A. T., Klaptocz, A., Germann, J., Wallner, T., Salvador-Herranz, G., Argiles Herrero, R., Yamada, H., Balestrino, F., & Vreysen, M. J. B. (2020). Field performance of sterile male mosquitoes released from an uncrewed aerial vehicle. *Science Robotics*, 5(43), eaba6251. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aba6251>
6. Bhutad, S., & Patil, K. (2023). A novel system for potential mosquito breeding hotspot intimation and monitoring using MLOps and improved YOLOV3. *Instrumentation Mesure Métrologie*, 22(1), 35–40. <https://doi.org/10.18280/i2m.220105>
7. Chowdhury, F. R., Ibrahim, Q. S. U., Bari, M. S., Alam, M. M. J., Dunachie, S. J., Rodriguez-Morales, A. J., & Patwary, M. I. (2018). The association between temperature, rainfall and humidity with common climate-sensitive infectious diseases in Bangladesh. *PLOS ONE*, 13(6), e0199579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199579>

a.

8. Carrasco-Escobar, G., Manrique, E., Ruiz-Cabrejos, J., Saavedra, M., Alava, F., Bickersmith, S., Prussing, C., Vinetz, J. M., Conn, J. E., Moreno, M., & Gamboa, D. (2019). High-accuracy detection of malaria vector larval habitats using drone-based multispectral imagery. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 13(1), e0007105. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007105>
9. Freitas, L. P., Carabali, M., Schmidt, A. M., Salazar Flórez, J. E., Ávila Monsalve, B., García-Balaguera, C., Restrepo, B. N., Jaramillo-Ramirez, G. I., & Zinszer, K. (2025). A nationwide joint spatial modelling of simultaneous epidemics of dengue, chikungunya, and zika in Colombia. *BMC Infectious Diseases*, 25, Article 406. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-10782-0>
10. Fonseca Júnior, D. P., Serpa, L. L. N., Barbosa, G. L., Pereira, M., Holcman, M. M., Voltolini, J. C., & Marques, G. R. A. M. (2019). Vectors of arboviruses in the state of São Paulo: 30 years of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Revista de Saúde Pública*, 53, Article 84. <https://doi.org/10.11606/s1518-8787.2019053001264>
11. Guagliardo, S. A. J., Ardila Roldán, S. C., Santacoloma, L., Luna, C., Cordovez Álvarez, J. M., Rojas Gacha, J. D., Mansur, M., Levine, R. S., Lenhart, A., & Oviedo, P. F. (2019). Enhanced vector surveillance to control arbovirus epidemics in Colombia. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 43, e50. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2019.50>
12. González, C., Paz, A., & Ferro, C. (2014). Predicted altitudinal shifts and reduced spatial distribution of *Leishmania infantum* vector species under climate change scenarios in Colombia. *Acta Tropica*, 129, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2013.08.014>
13. Gustavo A, Rafael O, Peterson A, Sidnei A. (2021). Computer Vision System for Automatic Identification of Potential *Aedes aegypti* Mosquito Breeding Sites Using Drones. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*.
14. Hardy, A., Makame, M., Cross, D., Majambere, S., & Msellem, M. (2017). Using low-cost drones to map malaria vector habitats. *Parasites & Vectors*, 10(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s13071-017-1973-3>
15. Król-Całkowska, E. J., & Walczak, D. (2022). The use of drones in the area of minimizing health risk during the COVID-19 epidemic. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 106(2), 40. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01729-7>
16. Lima-Camara, T. N. (2024). Dengue is a product of the environment: An approach to the impacts of the environment on the *Aedes aegypti* mosquito and disease cases. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, 27, e240048. <https://doi.org/10.1590/1980-549720240048>
17. Lee, G. O., Vasco, L., Márquez, S., Zuniga-Moya, J. C., Van Engen, A., Uruchima, J., Ponce, P., Cevallos, W., Trueba, G., Trostle, J., Berrocal, V. J., Morrison, A. C., Cevallos, V., Mena,

- C., Coloma, J., & Eisenberg, J. N. S. (2021). A dengue outbreak in a rural community in Northern Coastal Ecuador: An analysis using unmanned aerial vehicle mapping. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 15(9), e0009679. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009679>
18. Moncada S, (2014), Cómo realizar una búsqueda de información eficiente. Foco en estudiantes, profesores e investigadores en el área educativa, *Investigación en Educación Médica*, Volume 3, Issue 10, 2014, Pages 106-115, ISSN 2007-5057.
 19. Muvunyi, C. M., Ngabonziza, J. C. S., Siddig, E. E., & Ahmed, A. (2025). Rift Valley Fever in Rwanda is urging for enhancing global health security through multisectoral One Health strategy. *Microorganisms*, 13(1), 91. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010091>
 20. Muñoz-Sánchez, V., Valdez-Delgado, K. M., Hernández-López, F. J., Moo-Llanes, D. A., González-Farías, G., & Danis-Lozano, R. (2022). Use of Unmanned Aerial Vehicles for Building a House Risk Index of Mosquito-Borne Viral Diseases. *Machines*, 10(12), 1161. <https://doi.org/10.3390/machines10121161>
 21. Marubini, E., Musekiwa, A., Maposa, I., Mazarire, T., Sekgele, W., Mabaso, N., Dlamini, D., Mdose, H., Kuonza, L., & Munhenga, G. (2025). *Anopheles arabiensis* larval habitats characterization and *Anopheles* species diversity in water bodies from Jozini, KwaZulu-Natal Province. *Malaria Journal*, 24, Article 52. <https://doi.org/10.1186/s12936-025-05287-9>
 22. Mukabana, W., Welter, G., Ohr, P., Tingitana, L., Makame, M., Ali, A., & Knols, B. (2022). Drones for area-wide larval source management of malaria mosquitoes. *Drones*, 6(7), 180. <https://doi.org/10.3390/drones6070180>
 23. Organización Mundial de la Salud. (2023, 21 de diciembre). Dengue – Situación mundial. *Disease Outbreak News*. <https://www.who.int/es/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON498>
 24. Organización Mundial de la Salud. (2024, 26 de septiembre). Enfermedades transmitidas por vectores. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>
 25. Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA). (2024, 27 de septiembre). Exposición a riesgos e impactos por el Fenómeno de La Niña en Colombia. <https://www.unocha.org/publications/report/colombia/colombia-exposicion-riesgos-e-impactos-por-el-fenomeno-de-la-nina-en-colombia>
 26. Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA). (2023, 24 de octubre). Colombia: Exposición a riesgos e impactos por Fenómeno de El Niño – Proyecciones finales de 2023 e inicios de 2024. <https://www.unocha.org/publications/report/colombia/colombia-exposicion-riesgos-e-impactos-por-fenomeno-de-el-nino-proyecciones-finales-de-2023-e-inicios-de-2024-publicacion-24-de-octubre-de-2023>

27. Rosser, J. I., Tarpenning, M. S., Bramante, J. T., Tamhane, A., Chamberlin, A. J., Mutuku, P. S., De Leo, G. A., Ndenga, B., Mutuku, F., & LaBeaud, A. D. (2024). Development of a trash classification system to map potential *Aedes aegypti* breeding grounds using unmanned aerial vehicle imaging. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(28), 41107–41117. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33801-0>
28. Siraj, A. S., Santos-Vega, M., Bouma, M. J., Yadeta, D., Ruiz Carrascal, D., & Pascual, M. (2014). Altitudinal changes in malaria incidence in highlands of Ethiopia and Colombia. *Science*, 343(6175), 1154–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1244325>
29. Sarira TV, Clarke K, Weinstein P, Koh LP, Lewis M. Rapid identification of shallow inundation for mosquito disease mitigation using drone-derived multispectral imagery. *Geospat Health*. 2020 Jun 17;15(1).
30. Stanton, M. C., Kalonde, P., Zembere, K., Hoek Spaans, R., & Jones, C. M. (2021). The application of drones for mosquito larval habitat identification in rural environments: a practical approach for malaria control? *Malaria Journal*, 20(1), 244. <https://doi.org/10.1186/s12936-021-03759-2>
31. Steven, M. C., Solomon, P. D., Arumugam, P., Rasali, R., Dominic, A. C., Md Ideris, H., & Peter Marius, D. F. A. (2024). Short report: unmanned aerial vehicle for wide area larvicide spraying (WALS) using Vectobac® WG at Kota Kinabalu, Sabah. *Journal of Infection in Developing Countries*, 18(2), 299–302. <https://doi.org/10.3855/jidc.18292>
32. Teitelbaum, C. S., Ferraz, A., De La Cruz, S. E. W., Gilmour, M. E., & Brosnan, I. G. (2024). The potential of remote sensing for improved infectious disease ecology research and practice. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(20241712). <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.1712>
33. Trujillano, F., Jimenez, G., Manrique, E., Kahamba, N. F., Okumu, F., Apollinaire, N., Carrasco-Escobar, G., Barrett, B., & Fornace, K. (2024). Using image segmentation models to analyse high-resolution earth observation data: New tools to monitor disease risks in changing environments. *International Journal of Health Geographics*, 23(1), Article 13. <https://doi.org/10.1186/s12942-024-00371-w>
34. Torres, K., Ferreira, M. U., Castro, M. C., Escalante, A. A., Conn, J. E., Villasis, E., da Silva Araujo, M., Almeida, G., Rodrigues, P. T., Corder, R. M., Fernandes, A. R. J., Calil, P. R., Ladeia, W. A., Garcia-Castillo, S. S., Gomez, J., do Valle Antonelli, L. R., Gazzinelli, R. T., Golenbock, D. T., Llanos-Cuentas, A., Gamboa, D., & Vinetz, J. M. (2022). Malaria resilience in South America: Epidemiology, vector biology, and immunology insights from the Amazonian International Center of Excellence in Malaria Research Network in Peru and Brazil. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 107(4 Suppl), 168–181. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.22-0127>

35. Talbot, B., Sander, B., Cevallos, V., González, C., Benítez, D., Carissimo, C., Carrasquilla Ferro, M. C., Gauto, N., Litwiński, S., López, K., Ortiz, M. I., Ponce, P., Villota, S. D., Zelaya, F., Espinel, M., Wu, J., Miretti, M., & Kulkarni, M. A. (2021). Determinants of Aedes mosquito density as an indicator of arbovirus transmission risk in three sites affected by co-circulation of globally spreading arboviruses in Colombia, Ecuador and Argentina. *Parasites & Vectors*, 14, Article 482. <https://doi.org/10.1186/s13071-021-04984-z>
36. Tarpenning, M. S., Bramante, J. T., Coombe, K. D., Woo, K. E., Chamberlin, A. J., Mutuku, P. S., De Leo, G. A., LaBeaud, A. D., Ndenga, B. A., Mutuku, F. M., & Rosser, J. I. (2025). Comparison of unmanned aerial vehicle imaging to ground truth walkthroughs for identifying and classifying trash sites serving as potential Aedes aegypti breeding grounds. *Parasites & Vectors*, 18(1), 93. <https://doi.org/10.1186/s13071-025-06706-1>
37. Trujillano, F., Jimenez, G., Manrique, E., Kahamba, N. F., Okumu, F., Apollinaire, N., Carrasco-Escobar, G., Barrett, B., & Fornace, K. (2024). Using image segmentation models to analyse high-resolution earth observation data: new tools to monitor disease risks in changing environments. *International Journal of Health Geographics*, 23(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12942-024-00371-w>
38. Villar, L. A., Rojas, D. P., Besada-Lombana, S., & Sarti, E. (2015). Epidemiological trends of dengue disease in Colombia (2000–2011): A systematic review. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 9(3), e0003499. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003499>
39. Valdez-Delgado, K. M., Moo-Llanes, D. A., Danis-Lozano, R., Cisneros-Vázquez, L. A., Flores-Suarez, A. E., Ponce-García, G., Medina-De la Garza, C. E., Díaz-González, E. E., & Fernández-Salas, I. (2021). Field effectiveness of drones to identify potential Aedes aegypti breeding sites in household environments from Tapachula, a dengue-endemic city in southern Mexico. *Insects*, 12(8), 663. <https://doi.org/10.3390/insects12080663>
40. Valdez-Delgado, K. M., Ríos-Delgado, J. C., Nettel-Cruz, J. A., Angulo-Kladt, R., & Villarreal-Treviño, C. (2023). Aerial release of Aedes aegypti male mosquitoes using an unmanned aerial vehicle: a novel control strategy. *Salud Publica de Mexico*, 65(4, jul-ago), 387–393. <https://doi.org/10.21149/14466>
41. Yafoz, A. (2024). Drones in action: A comprehensive analysis of drone-based monitoring technologies. *Data and Metadata*, 3. <https://doi.org/10.56294/dm2024.364>
42. Zulfadli, M., Nazri, C. D., Hasber, S., & Nopadol, P. (2024). A conceptual framework for assessing the field efficiency of drones in identifying potential breeding sites of the aedes mosquito. *ALAM CIPTA International Journal Of Sustainable Tropical Design & Practice*, 17(1), 49–56. <https://doi.org/10.47836/ac.17.1.paper06>

