

Aplicación de las aeronaves no tripuladas (U.A.S.) para el monitoreo de contaminantes en cuerpos de agua

C. D. Rincon - Salcedo & J. A Moyano - Martínez

Facultad de Ingeniería Ambiental/ Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C., Colombia

Resumen

Este trabajo reúne y analiza diferentes estudios recientes sobre cómo se están utilizando drones para vigilar la calidad del agua en ríos, lagos y otros cuerpos hídricos. A partir de una revisión detallada de investigaciones, se identifican los tipos de sensores más usados, como los ópticos, multiespectrales y térmicos, y se explica qué contaminantes pueden detectarse con ellos, desde partículas en suspensión hasta metales pesados. También se presentan ejemplos concretos de cómo se ha aplicado esta tecnología en distintos países, mostrando que los drones pueden ser una herramienta muy útil, sobre todo en zonas de difícil acceso. Al final, se destaca que los sistemas que combinan sensores con mecanismos de recolección de muestras son los más eficaces. El artículo propone fortalecer el uso de estas tecnologías en contextos locales, como Colombia, donde podrían contribuir a mejorar el monitoreo ambiental y la gestión del agua.

Abstract

This article compiles and analyzes various recent studies on how drones are being used to monitor water quality in rivers, lakes, and other bodies of water. Based on a detailed review of research, it identifies the most commonly used types of sensors, such as optical, multispectral, and thermal sensors, and explains what pollutants they can detect, from particulate matter to heavy metals. It also presents specific examples of how this technology has been applied in different countries, demonstrating that drones can be a very useful tool, especially in hard-to-reach areas. Finally, it highlights that systems that combine sensors with sample collection mechanisms are the most effective. The article proposes strengthening the

use of these technologies in local contexts, such as Colombia, where they could contribute to improving environmental monitoring and water management. Keywords: Drones, water pollution, UAV, remote sensing, pollution, environmental monitoring

Introducción

En muchas partes del mundo, los ecosistemas acuáticos están siendo cada vez más afectados por distintas actividades humanas. El crecimiento urbano, la transformación del paisaje y el mal manejo de sustancias químicas están dejando huellas claras en la calidad del agua en varias regiones se ha visto cómo la deforestación, los cambios en los cauces de los ríos y el uso constante de productos como fertilizantes, detergentes o aceites han provocado un deterioro acelerado de los ríos y lagos (Ojeda-Bustamante, Flores-Velázquez, & Ontiveros-Capurata, 2016).

Estos contaminantes, cuando llegan al agua sin un tratamiento adecuado, pueden generar desequilibrios importantes, como es común que aparezca una acumulación de materia orgánica, que aumente la clorofila-a, y que haya un crecimiento fuera de control del fitoplancton y la vegetación acuática, todo esto impacta no solo a los ecosistemas, sino también a las personas que viven cerca y dependen del agua en su vida diaria.

Ante esta situación, cada vez se hace más necesario contar con alternativas modernas de monitorear lo que ocurre, aquí es donde entran en juego los drones, o como también se les conoce, sistemas aéreos no tripulados. Estos dispositivos, cuando están equipados con sensores, pueden volar sobre zonas de difícil acceso y recolectar información en tiempo real de la presencia de contaminantes en el agua, lo cual permite el correcto diagnóstico de impactos y una reacción oportuna.

Hoy en día, muchas instituciones y grupos de investigación están usando esta tecnología para hacer seguimiento ambiental, ya que es más eficiente que otras formas tradicionales, sino también porque reduce riesgos y mejora la capacidad de tomar decisiones rápidas para cuidar el agua y los ecosistemas (Kumar, Kumar, & Singh, 2022).

Aunque su uso en monitoreos ambientales es relativamente nuevo, los vehículos aéreos no tripulados (o UAS, por sus siglas en inglés) han demostrado ser muy útiles en varios países. Gracias a sensores multiespectrales, ópticos y térmicos, estos equipos pueden identificar parámetros clave como turbidez, sólidos suspendidos totales, colorantes artificiales, aceites y derivados del petróleo, índice de permanganato, nitrógeno total e incluso la demanda química de oxígeno (DQO) (Zhang, Wang, Li, She, & Wang, 2023). Todos estos son indicadores clave para evaluar la salud de un ecosistema acuático.

Una gran ventaja de esta tecnología es que permite monitoreos rápidos y detallados sin necesidad de instalar infraestructura compleja. Además, al no poner en riesgo al personal humano, se convierte en una alternativa eficiente y segura, especialmente en zonas remotas o con problemas de orden público.

En contextos como el colombiano, donde la contaminación por problemáticas como la minería ilegal, los ataques terroristas y los vertimientos fuera de norma, es común, difusa y cambia constantemente de ubicación, los drones ofrecen una forma práctica de hacer seguimiento con sobrevuelos sistemáticos y datos en alta resolución, se puede tener un panorama claro del impacto que estas actividades pueda tener en las fuentes hídricas del país.

Se destaca entonces, que el uso de drones para detectar contaminantes en cuerpos de agua no es solo una tendencia tecnológica; es una necesidad estratégica. Permite avanzar hacia un modelo de monitoreo más inteligente, económico y sostenible, que realmente proteja los recursos naturales y las comunidades que dependen de ellos.

Metodología

Para desarrollar esta revisión, se realizó una búsqueda sistemática de información con el fin de conocer cómo se están utilizando las aeronaves no tripuladas (UAS) para detectar y monitorear la presencia de aceites, derivados del petróleo, sólidos suspendidos totales y nitrógeno total en cuerpos de agua, escogidos como contaminantes de los cuales se obtendría

mayor información debido a su generalidad y a que son mayormente estudiados. La idea principal fue recopilar estudios que ofrecieran datos relevantes sobre este tipo de tecnologías, sus aplicaciones reales y los resultados que se han obtenido hasta la fecha.

Imagen 1. Fases para el análisis bibliométrico



Fuente: Elaboración propia

("unmanned aerial vehicles" OR UAV OR drone OR "remotely piloted aircraft system" OR UAS) AND (" petroleum-derived oils " OR " suspended solids " OR "Total Nitrogen") AND ("water bodies" OR "rivers" OR "lakes" OR "aquatic ecosystems") AND (monitoring OR detection OR "remote sensing" OR "environmental monitoring").

La revisión se centró en publicaciones realizadas entre los años 2013 y 2024. Para encontrar los artículos, se consultaron bases de datos científicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore y Google Scholar. Se usaron palabras clave relacionadas con drones, contaminación por aceites, derivados del petróleo, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total y monitoreo de calidad del agua. Estas palabras se combinaron para asegurar que los resultados estuvieran enfocados en el tema específico del estudio.

Se seleccionaron únicamente los trabajos que cumplieran con ciertos criterios: que usaran drones en entornos acuáticos, que se refirieran a la detección o análisis de los contaminantes escogidos, y que estuvieran vinculados con el uso de distintos sensores. Se descartaron los artículos que solo hablaran de suelos, aire u otros contaminantes, así como aquellos que no ofrecieran información clara sobre los métodos utilizados.

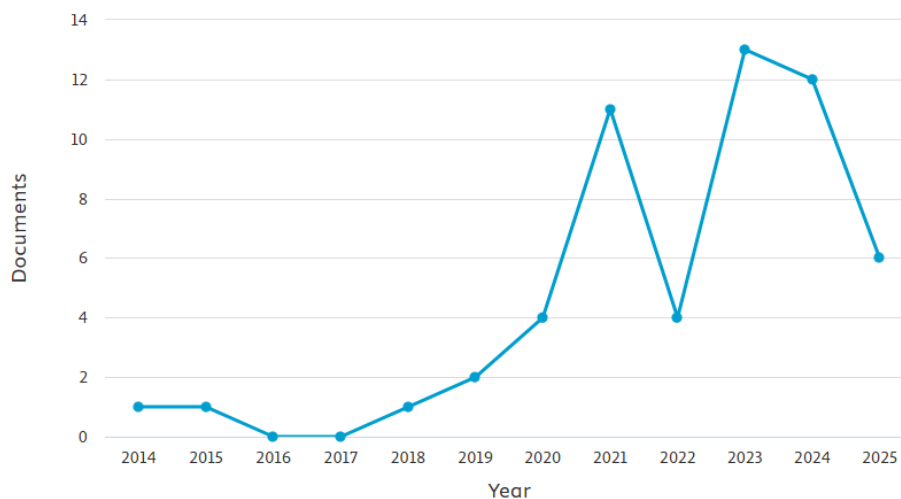
Una vez recopilados los artículos, se organizó la información extraída de cada uno en una tabla comparativa. En ella se incluyeron datos como el tipo de dron utilizado, el sensor o equipo incorporado (por ejemplo, cámaras multispectrales, hiperspectrales o sensores

térmicos), el método de recolección de datos (si fue directo o mediante imágenes), la ubicación geográfica del estudio y los resultados principales. También se tomaron en cuenta las ventajas y limitaciones que mencionaban los autores.

Con toda esta información organizada, se procedió a analizar los enfoques más comunes y las soluciones que se están aplicando actualmente. Se identificaron patrones sobre qué tipo de tecnologías se están usando con más frecuencia y qué tan efectivas han sido para detectar los contaminantes en el agua. Además, se observaron algunas dificultades recurrentes, la variabilidad en la calidad de los datos, o la falta de estandarización entre los estudios.

Finalmente, se complementó la revisión contrastando los resultados con otros trabajos relacionados y se discutieron posibles caminos para seguir investigando. También se tomaron en cuenta sugerencias de expertos en el área ambiental y tecnológica, con el objetivo de que las conclusiones sean útiles tanto para investigadores como para instituciones interesadas en el monitoreo ambiental.

Grafica 1. Documentos por año



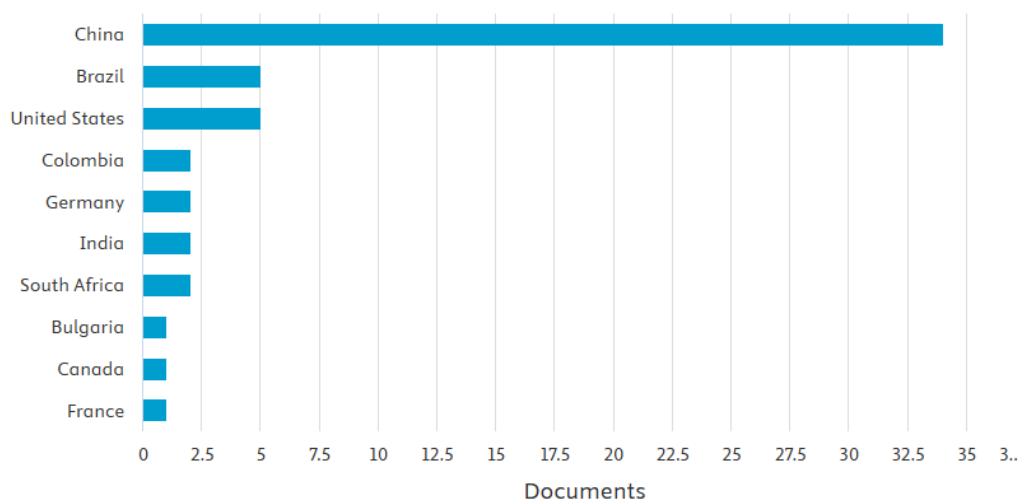
Fuente: Scopus 2025.

Según el análisis gráfico, se observa cómo ha evolucionado la cantidad de publicaciones científicas sobre el uso de drones para detectar contaminantes en cuerpos de agua, queda claro que el tema ha ganado fuerza con el paso del tiempo. Entre 2014 y 2017, apenas se registraban

una o dos publicaciones por año, e incluso hubo un año sin ninguna. Esto sugiere que, en ese entonces, la aplicación de esta tecnología en el monitoreo ambiental todavía no despertaba mucho interés o estaba en una etapa muy temprana de exploración.

A partir de 2018, la situación cambia, las publicaciones comienzan a aumentar de manera sostenida y alcanzan su punto más alto en 2023, con 13 trabajos publicados. Ya en 2021 se había dado un primer pico importante, aunque en 2022 hubo una caída momentánea. Este crecimiento general indica que los drones se están consolidando como una herramienta valiosa para el análisis de cuerpos de agua, especialmente por su capacidad para ofrecer datos rápidos, precisos y a bajo costo. Todo apunta a que esta línea de investigación seguirá creciendo en los próximos años.

Grafica 2. Documentos por país



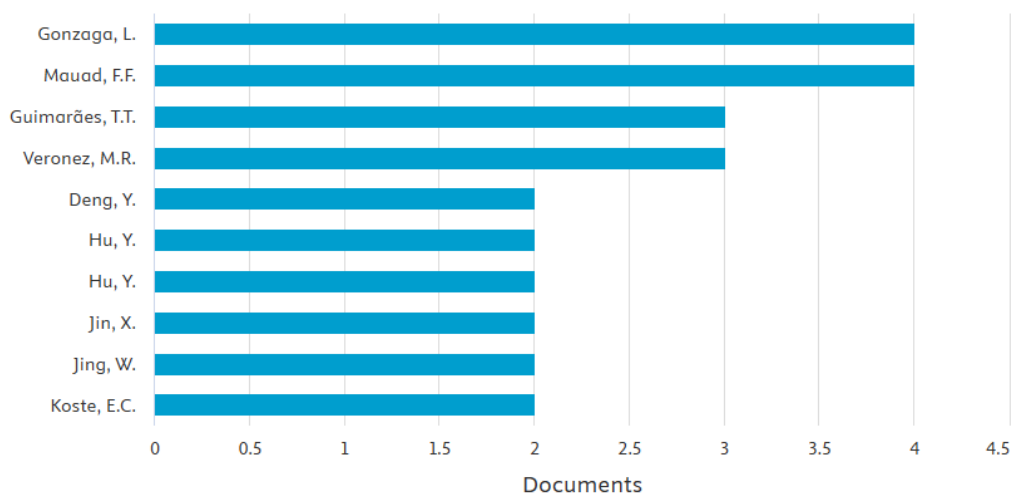
Fuente: Scopus 2025.

Al observar la cantidad de estudios publicados sobre el uso de drones para detectar contaminantes en cuerpos de agua, salta a la vista que China lleva la delantera por un margen muy amplio, con cerca de 30 publicaciones registradas. Esta diferencia tan marcada sugiere no solo una fuerte apuesta por la tecnología en el ámbito ambiental, sino también un claro interés

por encontrar soluciones innovadoras frente a los problemas de contaminación hídrica que enfrenta el país. Además, este liderazgo podría estar impulsado por políticas públicas que promueven el desarrollo de tecnologías emergentes, como los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), dentro del contexto de la gestión ambiental.

A partir del análisis gráfico, aunque también con una presencia destacable, aparecen Brasil y Estados Unidos, cada uno con aproximadamente cinco publicaciones. Estos países, ambos con extensos territorios y abundantes recursos hídricos, parecen mostrar un interés creciente en herramientas tecnológicas que faciliten el monitoreo de sus ecosistemas acuáticos. No obstante, si se compara con el ritmo de producción científica observado en China, la participación de Brasil y Estados Unidos aún es modesta, lo que podría representar una oportunidad para fortalecer futuras investigaciones en esta línea.

Grafica 3. Documentos por autor



Fuente: Scopus 2025.

Al revisar los autores activamente investigando el uso de drones para identificar contaminantes en cuerpos de agua, destacan Gonzaga, L. y Mauad, F.F., cada uno con cuatro publicaciones. También sobresalen Guimarães, T.T. y Veronez, M.R., con tres documentos, lo que muestra que han mantenido una participación constante en este campo. Todo parece indicar

que estos investigadores forman parte de un grupo que está impulsando con fuerza el desarrollo y la aplicación de esta tecnología en el monitoreo ambiental.

Además, hay otros autores como Deng, Y., Jin, X., Jing, W., Koste, E.C. y Hu, Y., que han contribuido con dos publicaciones cada uno. Es curioso que el nombre de Hu, Y. aparezca dos veces, lo que podría ser un error de registro o simplemente una coincidencia entre nombres. En general, esta distribución sugiere que, aunque el tema va ganando terreno, todavía es un área dominada por unos pocos autores. Esto abre la puerta a futuras colaboraciones y a una mayor consolidación del área en los próximos años.

Unmanned Aerial Systems (UAS)

Desde hace mucho tiempo y hasta épocas muy recientes, la detección de contaminantes en cuerpos hídricos se ha realizado de manera técnica y manual, utilizando métodos convencionales que, en muchos casos, resultan desactualizados frente a las tecnologías actuales. Hoy en día, existen herramientas modernas que pueden mejorar y facilitar significativamente estos procesos. Una de ellas es el uso de drones no tripulados, también conocidos como UAS (por sus siglas en inglés, *Unmanned Aerial Systems*), una tecnología que ha comenzado a destacarse como un método innovador y altamente eficiente para este tipo de tareas (Kumar, Kumar, & Singh, 2022; Hamzah, Aqlan, & Baidya, 2024). Los UAS permiten optimizar el tiempo de trabajo, acceder a zonas remotas o de difícil acceso y realizar monitoreos más precisos en comparación con los métodos tradicionales (Deng, Zhang, Pan, Yang, & Gharabaghi, 2024).

En la actualidad, los drones se han convertido en herramientas clave para el monitoreo ambiental, gracias a su capacidad de incorporar sensores avanzados que permiten detectar diversos contaminantes en cuerpos de agua. Equipados con sensores ópticos, espectrales, químicos y otros dispositivos especializados, estos sistemas no tripulados pueden identificar la

presencia de contaminantes químicos que representan un riesgo para la salud de los ecosistemas acuáticos y la salud de la población (Pillay et al., 2024; Zhang, Wang, Li, She, & Wang, 2023). Esta tecnología no solo mejora la precisión y eficiencia en la recolección de datos, sino que también permite un acceso más rápido y seguro a zonas remotas o de difícil acceso, facilitando la toma de decisiones para la protección y conservación del medio ambiente (Zhang et al., 2022; Román et al., 2023).

Resultados

Sensores Utilizados en UAS para Monitoreo Hidrológico

Para Acharya et al., los sensores con los que los UAS pueden ser equipados para la recopilación de datos hidrológicos y de calidad del agua pueden evidenciarse y clasificarse según su funcionalidad como se evidencia en la tabla 1.

Tabla 1. Sensores de UAS según funcionalidad

Tipo de sensor	Funcionalidad
Cámara Multiespectral	Encargada de capturar imágenes a lo largo del espectro electromagnético que, dependiendo de la banda, se lograra evaluar la vegetación acuática y la calidad del agua.
Cámara Hiperespectral	Encargada de proporcionar información detallada de los contaminantes específicos encontrados en los cuerpos de agua.
Sensor Térmico	Encargados de identificar variaciones de temperatura en los cuerpos de agua, que signifiquen presencia de descargas de contaminantes.
LIDAR (Detección y Rango de Luz)	Encargado del mapeo topográfico y batimetría de los cuerpos de agua, lo anterior perite la realización de estudios de flujo y sedimentación.
Sensores In Situ	Estos específicamente son usados para la medición de parámetros como pH, conductividad, oxígeno disuelto y turbidez.

Recuperado de Achaya et al., 2021.

Elaboración propia

Tabla 2. Sensores de UAS según funcionalidad

Tipo de sensor	Funcionalidad
----------------	---------------

Cámara Multiespectral	Captura imágenes en varias bandas del espectro electromagnético (principalmente visible e infrarrojo), útiles para detectar clorofila-a, turbidez y SST.
Cámara Térmica (banda 7)	Permite detectar variaciones térmicas asociadas a vertimientos ilegales o fuentes anómalas de calor en cuerpos de agua.
Sensor RGB Comercial	Utilizado para obtener fotografías aéreas procesables en reflectancia, especialmente útil en microcuencas y cuerpos de agua pequeños con alta resolución espacial.
Sensor LIDAR	Aunque menos común en calidad de agua, se emplea para caracterizar topografía, batimetría y estructuras del cauce, facilitando análisis de flujo y sedimentación.
Sensores In Situ	complementan la teledetección midiendo parámetros como pH, SST, oxígeno disuelto y conductividad directamente en el sitio.

Elaboración propia
(Sáenz Bohórquez, 2014)

El uso de drones en el monitoreo ambiental ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a su capacidad para acceder a áreas remotas, realizar mediciones en tiempo real y reducir significativamente los costos operativos. Particularmente en el ámbito de la calidad del agua, los drones pueden equiparse con diversos tipos de sensores que permiten detectar y analizar contaminantes claves presentes en cuerpos de agua dulce y costeros.

Los sensores multiespectrales permiten captar imágenes en diferentes longitudes de onda a partir de espectros electromagnéticos, los cuales permiten analizar parámetros de Clorofila, sólidos suspendidos totales (SST) y materia orgánica disuelta cromófora (CDOM). Zammit-Mangion et al., en el 2023, hicieron uso de una cámara multiespectral adaptada a un dron para estudiar ambientes costeros, logrando detectar variaciones espaciales en cuerpos de agua.

Las cámaras hiperespectrales ofrecen un mayor nivel de detalle mediante el registro de bandas espectrales estrechas, permitiendo detectar nutrientes como nitratos y fosfatos, así como la demanda química de oxígeno (DQO). Zhang et al., en el 2022, hacen uso de imágenes hiperespectrales para el monitoreo de la calidad del agua en ríos urbanos afectados por actividades humanas intensas.

Por otra parte, los sensores térmicos infrarrojos detectan variaciones de temperatura superficial en cuerpos de agua, lo que puede revelar la presencia de descargas térmicas industriales o zonas afectadas por procesos de eutrofización. Adicionalmente, los sensores in situ multiparamétricos, son capaces de medir variables como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y turbidez. Investigadores de la Universidad de Zhongkai desarrollaron un sistema de muestreo y monitoreo transportado por UAV, demostrando su eficiencia en la recolección precisa de estos parámetros con menores costos y riesgos operativos respecto a los métodos tradicionales (Zhongkai University, 2023).

Por último, los sensores electroquímicos permiten la detección directa de contaminantes específicos como metales pesados (por ejemplo, plomo y mercurio) y compuestos orgánicos tóxicos, incluidos pesticidas y herbicidas. Estos sensores funcionan a través de reacciones electroquímicas que permiten una medición precisa y específica en el punto de muestreo.

Contaminantes comúnmente detectables mediante el uso de UAS

Ojeda et al., en el 2016 recopilan en el libro “Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico” del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), los sensores más comunes junto a los contaminantes detectados, información sintetizada en la tabla 2.

Tabla 3. Sensores de UAS y contaminantes detectables

Tipo de sensor	Contaminantes detectables
Cámara Multiespectral	SST, clorofila-a, TP, TN, CDOM
Cámara Hiperespectral	Nutrientes, materia orgánica, DQO, COD
Cámara Térmica	Descargas térmicas, eutrofización
Sensor Fluorescente	Hidrocarburos, aceites, materia orgánica

Sensor Electroquímico	PH, conductividad, metales pesados
LIDAR	Sedimentación, batimetría

Recuperado de Ojeda et al., 2016.
Elaboración propia

Tabla 4. Sensores de UAS y contaminantes detectables

Tipo de sensor	Contaminantes detectables	Fuentes
Cámara Multiespectral	Clorofila-a, sólidos suspendidos totales (TSS), turbidez, materia orgánica disuelta cromófora (CDOM), temperatura superficial del agua	Xiao et al. (2022) ; Román et al. (2023) ; Liu et al. (2024) ; Pillay et al. (2024).
Cámara Hiperespectral	Clorofila-a, TSS, nitrógeno total (TN), fósforo total (TP), demanda química de oxígeno (DQO)	Zhang et al. (2022) ; Zhang et al. (2023).
Cámara Térmica	Temperatura superficial del agua, detección de vertidos térmicos	Pillay et al. (2024).
Sensor Fluorescente	Materia orgánica disuelta, contaminantes fluorescentes, detección de algas	Duan et al. (2020); Zhang et al. (2022).
Sensor Electroquímico	pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, potencial de óxido-reducción, amonio, nitratos.	Han et al. (2023); Liu et al. (2021); Zhang et al. (2022)
LIDAR	Sedimentación, batimetría	Ojeda et al., (2016).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Contaminantes en cuerpos de agua y sensores que pueden detectarlos según su eficiencia

Contaminante	Sensor	Mecanismo de deteccion	Ventajas principales	Eficiencia	Referencia
Clorofila-a	Multiespectral	Usa bandas visibles y NIR (índices como NDVI, NDRE)	Accesible, monitoreo frecuente	Menos preciso que hiperespectral	Xiao et al. (2022); Zhang et al. (2023).

	Hiperespectral	Detecta firmas espectrales específicas de pigmentos	Muy preciso, detecta tipos de algas	Más caro y complejo	Xiao et al. (2022); Zhang et al. (2023).
Sólidos suspendidos (TSS, turbidez)	Multiespectral	Cambios en reflectancia del agua	Rápido, útil para grandes áreas	Precisión moderada	Pillay et al. (2024); Zhang et al. (2023)
	Hiperespectral	Captura variaciones espectrales finas	Alta exactitud bajo distintas condiciones	Costoso, requiere más procesamiento	Pillay et al. (2024); Zhang et al. (2023)
Materia orgánica disuelta (CDOM)	Multiespectral	Estimaciones mediante índices espectrales	Útil para aproximaciones generales	Sensibilidad baja a concentraciones pequeñas	Pillay et al. (2024); Zhang et al. (2023)
	Hiperespectral	Detecta curvas espectrales características del CDOM	Alta sensibilidad, detecta mezclas	Requiere calibración específica	Pillay et al. (2024); Zhang et al. (2023)
	LIF(Laser-Induced Fluorescence), (fluorescencia)	Detecta fluorescencia del CDOM	Detección directa, muy sensible	Costoso, limitado a ciertas condiciones de luz	Pillay et al. (2024); Zhang et al. (2023)
Hidrocarburos (aceites, petróleo)	Hiperespectral	Identifica patrones espectrales anómalos	Útil en monitoreo remoto	Menos específico que LIF	Zhang et al. (2023)
	LIF (Laser-Induced Fluorescence)	Detecta fluorescencia de compuestos aromáticos	Alta precisión incluso en bajas concentraciones	Muy costoso y requiere oscuridad parcial	Zhang et al. (2023)

Fuente: Elaboración propia

El análisis comparativo de los sensores utilizados en drones para el monitoreo de contaminantes en cuerpos de agua revela que no existe un sensor universalmente superior, sino que su eficiencia depende del tipo de contaminante a detectar, los objetivos del monitoreo y las condiciones operativas.

En primer lugar, los **sensores multiespectrales** destacan por su bajo costo, facilidad de instalación en drones y utilidad para monitoreos frecuentes. Su mecanismo de detección, basado en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano, permite obtener índices como NDVI o NDRE, útiles para detectar contaminantes ópticamente activos como la clorofila-a o los sólidos suspendidos (TSS). Sin embargo, presentan limitaciones en cuanto a sensibilidad y especificidad. No son capaces de diferenciar compuestos similares ni de detectar contaminantes en concentraciones bajas, por lo que su eficiencia es más adecuada para una primera aproximación o para el seguimiento general de grandes superficies.

Por otro lado, los **sensores hiperespectrales** ofrecen una mayor resolución espectral, lo que permite identificar firmas espectrales específicas de contaminantes, como tipos de algas, materia orgánica disuelta (CDOM), o patrones espectrales anómalos relacionados con hidrocarburos. Son considerablemente más precisos que los sensores multiespectrales y permiten cuantificaciones detalladas. No obstante, su elevado costo, la alta demanda de procesamiento de datos y su complejidad técnica hacen que su uso esté más orientado a investigaciones científicas, validación de modelos o monitoreo en áreas donde se requiere una alta exactitud.

Finalmente, los sensores **LIF (Laser-Induced Fluorescence)** se destacan por su alta sensibilidad y capacidad de detectar fluorescencia natural de compuestos como CDOM y sustancias aromáticas presentes en hidrocarburos. Estos sensores permiten detectar contaminantes incluso en concentraciones muy bajas y no dependen de la luz solar, lo que los

hace especialmente eficaces en condiciones de baja iluminación. No obstante, son costosos, requieren calibración y están limitados a ciertos tipos de contaminantes fluorescentes, por lo que no son adecuados para todos los escenarios de monitoreo.

En conclusión, si bien el sensor más eficiente depende del tipo de contaminante y del contexto del estudio, los sensores hiperspectrales ofrecen la mejor combinación de precisión y versatilidad para una amplia gama de contaminantes. Los sensores LIF, aunque especializados, son insuperables para contaminantes fluorescentes como el CDOM y los hidrocarburos. Por su parte, los sensores multiespectrales continúan siendo una opción eficiente y accesible para monitoreos regulares y a gran escala, especialmente cuando se requiere una implementación sencilla y económica.

Imagen 2. Espectro de luz de distintos contaminantes detectados en cuerpos de agua



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Representación el espectro de luz

Indicador	Rango de detección (nm)	Explicación
Clorofila-a	665–685 nm	Pigmento de algas. Su presencia excesiva indica eutrofización o proliferación de fitoplancton.
Sólidos suspendidos totales	600–800 nm	Partículas como arcillas, sedimentos o residuos. Afectan la claridad del agua.
Turbidez	600–710 nm	Mide la opacidad del agua. Relacionado con partículas suspendidas y contaminación.
Materia orgánica disuelta (DOM)	600–730 nm	Restos biológicos en descomposición. Puede ser indicador de contaminación orgánica.
Índice de permanganato	400–550 nm	Mide la presencia de compuestos orgánicos fácilmente oxidados. Relacionado con la calidad bioquímica del agua.
Demanda química de oxígeno (DQO)	400–550 nm	Representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica del agua. Alto valor = contaminación.
Aceites derivados del petróleo	400–500 nm	Indica presencia de hidrocarburos, importante en zonas afectadas por actividad industrial o minera
Colorantes artificiales	400–700 nm	Detecta contaminantes industriales como tintes y sustancias químicas sintéticas.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de Resultados

La sinergia entre los UAS y sus sensores permiten la detección de varios contaminantes dependiendo del objetivo de cada estudio. A continuación, se contrastan distintos referentes para evidenciar el uso de UAS para la detección de aceites y derivados del petróleo, sólidos suspendidos y nitrógeno total. Se escogieron estos contaminantes ya que la información sobre estos se encuentra en mayor volumen por una variedad de autores.

Tabla 7. Detección de Aceites y Derivados del Petróleo mediante el uso de UAS

Estudio de Caso	Aquatic environment monitoring using a drone-based fluorosensor	A portable UAV-based laser-induced fluorescence lidar system for marine environmental monitoring	Drone-based fluorescence lidar systems for vegetation and marine environment monitoring
Tipo de sensor	Sensor de fluorescencia inducida por láser en dron DJI M600 Pro	LIDAR de fluorescencia inducida por láser (LIF-LIDAR) en dron multirrotor de seis hélices (hexacóptero). Telescopio Cassegrain	Dron JI M600 portando sensores: * LIDAR hiperespectral inelástico Scheimpflug * Fluorosensor láser portátil,
Peso	1.5 kg	5 kg	1.5 kg
Detalles técnicos	*Láser de diodo continuo de 412 nm y 1000 mW de potencia *Espectrómetro compacto Ocean Optics USB 4000 *Filtro de paso largo de 425 nm	* Fuente láser 405 nm. * Espectro de detección: de 400 nm a 750 nm. Resolución espectral: 1 nm Frecuencia de muestreo 30 Hz.	Sistema marino: Láser: 1 W, 412 nm (modelo Xinrui 412). Óptica: telescopio de 50 mm de diámetro, 200 mm de foco.
Control	Ordenador industrial a bordo y almacenamiento de datos	Sistema de adquisición sincronizado con el movimiento del dron para mapeo espectral	Vuelo programado en ruta fija, controlado por piloto con integración de GPS e INS (navegación inercial).
Altura de vuelo	Hasta 10 metros sobre la superficie del agua	Hasta 10 a 15 metros sobre la superficie del agua.	10m sobre la superficie del agua
Duración del vuelo	25 minutos de operación continua	30 minutos por vuelo dependiendo a la carga	15–30 minutos dependiendo la carga

Contaminantes detectados	Aceites y derivados del petróleo, materia orgánica disuelta, clorofila, colorantes artificiales	Aceites y derivados del petróleo, Clorofila-a Colorantes artificiales	Aceites derivados del petróleo, colorantes artificiales, Clorofila-a y materia orgánica
Referencia	Duan, Z., Li, Y., Wang, J., Zhao, G., & Svanberg, S. (2019).	Zhang, Y., Li, Y., Wang, Y., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2022).	Duan, Z., et al. (2020).

Elaboración propia

Los tres trabajos analizados abordan distintas estrategias para aprovechar drones equipados con sensores ópticos en el monitoreo de cuerpos de agua, especialmente para detectar contaminantes y evaluar la calidad ambiental. En primer lugar, Duan, Z et al., en el 2019, proponen un sistema ligero y portátil que se instala en un dron, el cual combina una cámara multiespectral con tecnología GNSS RTK. Este sistema está pensado para operar en áreas remotas, y gracias a su capacidad para capturar imágenes en el espectro visible y en el infrarrojo cercano (NIR), permite obtener datos georreferenciados con alta precisión. Su objetivo principal es identificar cambios en la superficie del agua que puedan estar relacionados con alteraciones en su calidad.

Por otro lado, Zhang, Y et al., en el 2022, proponen una metodología más orientada a la investigación científica, mediante el uso de un espectro radiómetro hiperspectral instalado en un dron. Este equipo cubre un rango espectral que va desde los 400 hasta los 1000 nanómetros, y permite medir la reflectancia del agua para estudiar componentes como la clorofila y la materia orgánica disuelta. A diferencia del primero, este enfoque complementa las mediciones aéreas con análisis en laboratorio, buscando validar con precisión los datos obtenidos mediante espectros calibrados.

Finalmente, Duan, Z et al., en el 2020, presentan una solución tecnológica más compleja y sofisticada, que combina imágenes hiperspectrales con un sistema de fluorescencia inducida por láser (LIF). Este equipo, también montado en un dron, utiliza un láser para excitar compuestos contaminantes como hidrocarburos o ciertos metales y captar su fluorescencia específica. Además, trabaja en un amplio espectro que abarca desde el ultravioleta hasta el

infrarrojo cercano, ofreciendo una gran sensibilidad y detalle en las mediciones. Esta herramienta está especialmente diseñada para aplicaciones donde se requiere una detección precisa y en tiempo real de sustancias potencialmente peligrosas en el agua.

En conjunto, estos estudios muestran cómo la integración de tecnologías ópticas en plataformas aéreas no tripuladas puede convertirse en una herramienta eficaz, versátil y adaptable para la detección de aceites y derivados del petróleo en el agua.

Tabla 8. Detección de sólidos suspendidos mediante el uso de UAVs

Estudio de Caso	Monitoreo de la calidad del agua en microcuencas utilizando drones y percepción remota. Caso de estudio: Río Teusacá, La Calera, Colombia.	Monitoring water quality parameters of freshwater aquaculture ponds using UAV-based multispectral images	Measuring High Levels of Total Suspended Solids and Turbidity Using Small Unoccupied Aerial Systems (sUAS) Multispectral Imagery
Tipo de sensor	Cámara RGB y Pi NoIR para infrarrojo cercano en dron DJI Phantom 2 Vision+	Multiespectral (montado en un dron DJI P4 Multispectral)	Sensor multispectral Parrot Sequoia implementado a dron DJI Phantom 4
Peso	1.16 kg	1.5 kg	1.38 kg
Detalles técnicos	*Sensor CMOS de 14 MP y 1080p de resolución *CMOS de 5 MP y 2592 x1944 px de resolución	Resolución espacial: 0.08 m × 0.08 m Pix4D (mosaico y calibración radiométrica) ENVI 5.3 (fusión de imágenes, análisis espectral)	Resolución espacial: 0.09 x 0.09m Software Pix4Dmapper para calibración radiométrica y generación de ortomosaicos.
Control	Manual mediante dispositivos móviles.	Vuelo autónomo planificado con GPS.	Controlado manualmente y con misión preprogramada.
Altura de vuelo	30 metros sobre la superficie del agua	150 metros de altura sobre los estanques.	76 metros sobre el nivel del terreno.
Duración del vuelo	Entre 20 y 25 minutos según batería	25–30 minutos por batería.	Cada vuelo se realizó por 15 min con un total de 6 horas.
Contaminantes detectados	Sólidos Suspendidos Totales, detergentes, fertilizantes y vegetación acuática	Clorofila A, Fitoplancton, materia orgánica y vegetación acuática.	Sólidos Suspendidos totales, turbidez y materia orgánica.

Referencia	Sáenz Bohórquez, N. A. (2014).	(Liu et al., 2024).	(Prior et al., 2020).
-------------------	--------------------------------	---------------------	-----------------------

Elaboración propia

Los tres estudios analizados coinciden en resaltar el potencial de los drones no tripulados con sensores multiespectrales como una herramienta eficiente para monitorear la calidad del agua. Todos se enfocan en la medición de parámetros como los sólidos suspendidos totales (SST), la turbidez y la clorofila-a.

Sáenz, N, en el 2014 aplicó una metodología basada en imágenes aéreas tomadas con cámaras RGB y NIR, combinadas con análisis de laboratorio, para establecer una relación entre la reflectancia del agua y la concentración de SST en el río Teusacá - Cundinamarca. Se concluye que esta técnica puede facilitar el monitoreo en microcuencas y se plantea su posible adaptación para detectar compuestos como fertilizantes, detergentes o incluso vertimientos ilegales.

Liu et al., en China, integraron imágenes multiespectrales con modelos de aprendizaje automático para estimar clorofila-a y turbidez en estanques de acuicultura. Los resultados mostraron alta precisión, y se destacó cómo estas variables reflejan cambios en la calidad del agua provocados por exceso de nutrientes o presencia de fitoplancton, lo que podría asociarse con contaminantes químicos.

Por su parte, Prior et al., en Estados Unidos evaluó la relación entre imágenes multiespectrales y mediciones de SST y turbidez en una cuenca experimental durante eventos de lluvia simulados. Los modelos estadísticos obtuvieron altos niveles de precisión, demostrando que esta tecnología es útil incluso en condiciones de alta carga de sedimentos.

Aunque los tres estudios se enfocan en variables ópticas, todos demuestran que el uso de drones permite una forma rápida, precisa y económica de monitorear cuerpos de agua.

Tabla 9. Detección de Nitrógeno Total mediante el uso de UAVs

Estudio de Caso	UAV Multispectral Image-Based Urban River Water Quality	Selection and Quantification of Best Water Quality	Urban Fine-Grained Water Quality Monitoring Based on
------------------------	---	--	--

	Monitoring Using Stacked Ensemble Machine Learning Algorithms—A Case Study of the Zhanghe River, China	Indicators Using UAV-Mounted Hyperspectral Data: A Case Focusing on a Local River Network in Suzhou City, China	Stacked Machine Learning Approach
Tipo de sensor	Seis sensores CMOS en dron DJI P4 Multispectral	Dron JOUAV CW-15 i Sensor hiperespectral: Nano-Hyperspec Ultra Micro	Dron DJI Phantom 4 Multispectral MicaSense RedEdge
Peso	1.4 kg	3 kg	1.5 kg
Detalles técnicos	*Resolución de 1600x1300 px *Lente de 5.74 mm de distancia focal	Bandas 270 espectrales y 640 espaciales	270 bandas espectrales
Control	Configuración autónoma por GPS, asistencia de corrección de posicionamiento.	Vuelo autónomo programado, basado en GPS.	Vuelo autónomo con planificación de misión vía GPS.
Altura de vuelo	120 – 150 metros	150 metros	120 metros
Duración del vuelo	27 minutos	1 hora	Estimada entre 20–27 minutos por batería
Contaminantes detectados	Nitrógeno Total, Clorofila-a e índice de permanganato	Nitrógeno total, turbidez, índice de permanganato y demanda química de oxígeno	Nitrógeno total y Clorofila-a.
Referencia	Xiao, Y., et al. (2022).	Zhang, Zeng y He (2022).	Cheng et al. (2024)

Elaboración propia

Los estudios revisados exploran el uso de drones equipados con sensores ópticos para el monitoreo de la calidad del agua en ríos urbanos, utilizando diferentes enfoques tecnológicos que permiten el monitoreo de parámetros como nitrógeno total, fósforo total, turbidez, clorofila-a y demanda química de oxígeno. Xiao, Y et al., emplean sensores multispectrales y modelos de aprendizaje automático en conjunto (stacking), logrando estimaciones precisas de parámetros relacionados con procesos de eutrofización.

Zhang, et al., en el 2022, hacen uso de sensores hiperespectrales de alta resolución

espectral, capaces de captar hasta 249 bandas entre 400 y 953 nm, lo que le otorga mayor sensibilidad para diferenciar firmas espectrales de múltiples contaminantes. Por su parte, Cheng et al., utilizan una plataforma accesible con sensores multispectrales comerciales, integrando modelos de aprendizaje apilado (ST-RF) que muestran buen rendimiento incluso en entornos urbanos complejos.

Como se observa en los diferentes estudios de caso revisados, esta tecnología ha sido ampliamente implementada en diversos países asiáticos y europeos, los cuales cuentan con mayores recursos y condiciones de accesibilidad que facilitan el desarrollo de proyectos de este tipo. En contraste, países como Colombia, donde estas tecnologías han comenzado a adoptarse recientemente, se encuentran actualmente en un proceso de incorporación y adaptación para su uso efectivo.

Colombia, al ser un país con una geografía compleja y numerosas zonas de difícil acceso, podría beneficiarse significativamente del uso de tecnologías como las aeronaves no tripuladas. Estas herramientas tienen el potencial de optimizar los tiempos de operación y sustituir métodos convencionales que todavía se utilizan ampliamente en el país, reduciendo así los riesgos que enfrentan las personas durante los procesos de muestreo manual.

No obstante, es importante resaltar que, aunque esta tecnología puede ofrecer resultados precisos, es fundamental validar la información obtenida por los sensores mediante muestreos de campo con métodos tradicionales. Esta verificación cruzada permite reforzar la confiabilidad de los datos recolectados, aportando mayor solidez a las decisiones basadas en ellos.

Conclusiones y recomendaciones

A partir de la revisión de las diferentes fuentes, se define que no hay un sensor único que sea el más eficiente para detectar todos los contaminantes en cuerpos de agua mediante drones. En realidad, la efectividad del sensor depende mucho del tipo de contaminante que se quiere monitorear, del entorno en el que se aplique y del propósito específico del estudio. Aun así, los sensores hiperespectrales y multispectrales muestran una gran capacidad para

identificar elementos como la clorofila-a, la turbidez o la materia orgánica disuelta, lo que los hace muy útiles en el seguimiento de la eutrofización y el control general de la calidad del agua.

Los sistemas que combinan sensores de detección a distancia con mecanismos de muestreo físico se perfilan como la alternativa más completa y adaptable. Lo ideal sería seguir desarrollando plataformas modulares de drones, con sensores ajustados a los contaminantes que se desean estudiar y pensadas para funcionar bien en distintos tipos de ecosistemas acuáticos.

En el futuro este tipo de herramientas y tecnologías podrán proporcionar y facilitar el monitoreo de cuerpos de agua, los UAS son herramientas poderosas utilizadas para mejorar este tipo de estudios, permitiendo planificar estrategias de mitigación y ahorro de tiempos de operación.

Gracias a los avances en sensores hiperspectrales, multiespectrales y térmicos, los UAS permiten detectar contaminantes y medir parámetros clave con una precisión superior a la de muchos métodos convencionales, como es el caso de aceites y derivados del petróleo, sólidos suspendidos y nitrógeno total.

Referencias

Ojeda Bustamante, W., Flores Velázquez, J., & Ontiveros Capurata, R. E. (Eds.). (2016). *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico* (1ª ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Xiao, Y., Guo, Y., Yin, G., Zhang, X., Shi, Y., Hao, F., & Fu, Y. (2022). UAV multispectral image-based urban river water quality monitoring using stacked ensemble machine learning algorithms—A case study of the Zhanghe River, China. *Remote Sensing*, 14(14), 3272.

Kumar, P., Kumar, S., & Singh, R. (2022). Water quality monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs): A systematic review and future perspectives. *Environmental Advances*, 8, 100220.

Sáenz Bohórquez, N. A. (2014). Monitoreo de la calidad del agua en microcuencas utilizando drones y percepción remota: Caso de estudio: Río Teusacá, La Calera, Colombia [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Castro Castro, J. E., & Venegas Parra, J. P. (2024). *Clasificación de la cantidad de residuos contaminantes en ríos mediante tomas fotográficas con UAS e IA* [Tesis de pregrado, Fundación Universitaria Los Libertadores]. Repositorio Institucional Los Libertadores.

Pillay, S. J., Bangira, T., Sibanda, M., Kebede Gurmesssa, S., Clulow, A., & Mabhaudhi, T. (2024). *Assessing drone-based remote sensing for monitoring water temperature, suspended solids and CDOM in inland waters: A global systematic review of challenges and opportunities*. *Drones*, 8(12), 733.

Al-Battbooti, M. J. H., Marin, I., Al-Hameed, S., Popa, R.-C., Petrescu, I., Boiangiu, C.-A., & Goga, N. (2024). Designing and developing an advanced drone-based pollution surveillance system for river waterways, streams, and canals using machine learning algorithms: Case study in Shatt al-Arab, South East Iraq. *Applied Sciences*, 14(6), 2382.

Zhang, Y., Li, Y., Wang, Y., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2022). A portable UAV-based laser-induced fluorescence lidar system for environmental monitoring. *Optics Communications*, 522, 128778.

Duan, Z., Li, Y., Wang, X., Wang, J., Brydegaard, M., Zhao, G., & Svanberg, S. (2020). *Drone-based fluorescence lidar systems for vegetation and marine environment monitoring*. EPJ Web of Conferences, 237, 07013.

Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W., & Hu, Z. (2019). A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(3), 320–333.

Singh, R., & Kumar, S. (2024). *A comprehensive insight into drones: History, classification, architecture, navigation, applications, challenges, and future trends*. Bharat Electronics Limited.

Liu, X., Wang, Y., Chen, T., Gu, X., Zhang, L., Li, X., Tang, R., He, Y., Chen, G., & Zhang, B. (2024). Monitoring water quality parameters of freshwater aquaculture ponds using UAV-based multispectral images. *Ecological Indicators*, 167, 112644.

Prior, E. M., O'Donnell, F. C., Brodbeck, C., Donald, W. N., Runion, G. B., & Shepherd, S. L. (2020). *Measuring high levels of total suspended solids and turbidity using small unoccupied aerial systems (sUAS) multispectral imagery*. *Drones*, 4(3), 54.

Zhang, R., Wang, Z., Li, X., She, Z., & Wang, B. (2023). *Water quality sampling and multi-parameter monitoring system based on multi-rotor UAV implementation*. *Water*, 15(11), 2129.

Román, A., Tovar-Sánchez, A., Gauci, A., Deidun, A., Caballero, I., Colica, E., D'Amico, S., & Navarro, G. (2023). Water-quality monitoring with a UAV-mounted multispectral camera in coastal waters. *Remote Sensing*, 15(1), 237.

Khan, A. M., Iqbal, W., Ullah, S., Bashir, A. K., Noor, R. M., & Alsulaiman, M. (2024). A review on the state of the art in copter drones and flight control. *Sensors*, 24(6), 2382.

Zang, W., Lin, J., Wang, Y., & Tao, H. (2012). *Investigating small-scale water pollution with UAV remote sensing technology*. *En World Automation Congress (WAC)*, 2012.

Zhang, D., Zeng, S., & He, W. (2022). *Selection and quantification of best water quality indicators using UAV-mounted hyperspectral data: A case focusing on a local river network in Suzhou City, China*. *Sustainability*, 14(23), 16226.

Singh, R., & Kumar, S. (2017). A comprehensive insights into drones: History, classification, architecture, navigation, applications, challenges, and future trends. *Journal of Network and Computer Applications*, 87, 47–65.

Cheng, C., Xie, Z., Jin, X., Peng, C., Ren, C., Mao, Y., Zhou, K., & Li, Y. (2024). *Urban fine-grained water quality monitoring based on stacked machine learning approach*. *IEEE Access*, 12, 54321–54334.

Albahli, S., Arif, M., Muhammad, K., Alqahtani, A., & Altameem, A. (2022). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 3025–3057.

Aydin, B. (2019). *Public acceptance of drones: Knowledge, attitudes, and practice*. *Technology in Society*, 59, 101180.

Hamzah, A. Y., Aqlan, F., & Baidya, S. (2024). Drone-based digital twins for water quality monitoring: A systematic review. *Digital Twins and Applications*, 1(2), 131–160.

Deng, Y., Zhang, Y., Pan, D., Yang, S. X., & Gharabaghi, B. (2024). Review of recent advances in remote sensing and machine learning methods for lake water quality management. *Remote Sensing*, 16(22), 4196.

De Keukelaere, L., Moelans, R., Knaeps, E., Sterckx, S., Reusen, I., De Munck, D., ... & Tyler, A. (2023). Airborne drones for water quality mapping in inland, transitional and coastal waters—MapEO water data processing and validation. *Remote Sensing*, 15(5), 1345.

Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298.

Gong, P. (2018). Drones: A new tool for water monitoring. *Virginia Water Resources Research Center*.

Frontiers in Environmental Science. (2021). Evaluation of unoccupied aircraft system (UAS) remote sensing for water quality monitoring.

Zhang, Y. (2023). Drone-based monitoring of nitrogen levels in aquatic ecosystems using hyperspectral imaging. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 213–225.

Liu, X., Wang, Y., Chen, T., Gu, X., Zhang, L., Li, X., ... & Zhang, B. (2024). Monitoring water quality parameters of freshwater aquaculture ponds using UAV-based multispectral images. *Ecological Indicators*, 167, 112644.