

## Laboratorio Aéreo Inteligente para muestreos hídricos en la Amazonía del Ecuador

<http://doi.org/10.53358/ideas.v6i2.1073>

Andres Martínez León<sup>1</sup>, Luis Mosquera Morocho<sup>2</sup>, Mayra Heras Heras<sup>1</sup>, Julio Guerra Masson<sup>3</sup>,  
Andrea López López<sup>4</sup>

1: Universidad Estatal Amazónica, Puyo (UEA), Puyo, Ecuador

2: Universidad Estatal del Suroeste de Rusia (UESOR), Kursk, Rusia

3: Universidad Técnica del Norte (UTN), Ibarra, Ecuador

4: Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Sangolquí, Ecuador

*amartinez@uea.edu.ec, mheras@uea.edu.ec, luismm1105@gmail.com, jeguerra@utn.edu.ec, amlopez13@espe.edu.ec*

*Fecha de envío, mayo 8/2024 - Fecha de aceptación, marzo 26/2024 - Fecha de publicación, julio 15/2024*

**Resumen:** En este artículo se presenta una breve investigación relacionada a la problemática ambiental de monitoreo preventivo de fuentes hídricas en la región Amazónica del Ecuador. En tal virtud, se realiza la presentación de una propuesta de estrategia operativa a través de la implementación de un Laboratorio Aéreo Inteligente LAI, conformado por un Vehículo Aéreo no Tripulado RPA y un sistema de recolección de muestras de agua. A fin de garantizar un monitoreo remoto autónomo de ambientes acuáticos, el LAI integra una interfaz Ser Humano-Máquina HMI que permite al operador en Tierra interactuar través de protocolos de comunicación de largo alcance con el LAI, el cual cumple con su funcionalidad por medio una arquitectura de hardware y software integrada a bordo. En el trabajo se muestra el prototipo de LAI ensamblado, resultados de su explotación en campo para evaluación de propiedades fisicoquímicas, así como una reflexión hacia trabajos futuros en esta temática.

**Palabras Clave:** Vehículo Aéreo no Tripulado (RPA), Convertiplano, Monitoreo hídrico, Sistema de recolección, Conservación de ecosistemas.

**Abstract:** This paper presents a brief research related to the environmental problem of preventive monitoring of water sources in the Amazon region of Ecuador. As consequence, a proposal for an effective strategy is presented through the implementation of an Intelligent Aerial Laboratory LAI, consisting of an Unmanned Aerial Vehicle RPA and a water sample collection system. In order to guarantee an autonomous remote monitoring of aquatic environments, the LAI integrates a Human-Machine interface HMI that allows the operator on land station to interact through long-range communication protocols with the LAI, which fulfills its functionality through an integrated hardware and software architecture on board. This work presents the assembled LAI prototype, results of its exploitation in real conditions for physicochemical properties sensing, as well as a reflection towards future work on this topic.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Convertiplane, Water Monitoring, Collection system, Ecosystem conservation.

*Autor de correspondencia:*

Andres Martínez León, [amartinez@uea.edu.ec](mailto:amartinez@uea.edu.ec)



## Introducción.

El monitoreo de la calidad de recursos hídricos resulta fundamental para garantizar la salud humana, así como también para la conservación del medio ambiente. Según informe del año 2022 de la Organización de las Naciones Unidas, se menciona que ambientes contaminados han sido los causantes en el mundo de al menos 9 millones de decesos prematuros, aproximadamente el doble de casos fatales causados por la pandemia COVID-19 en sus primeros 18 meses [1]. El Estado ecuatoriano fomenta acciones que garanticen un acceso permanente, seguro y a escala para cubrir necesidades individuales y productivas [2, 3]. Sin embargo, las distintas actividades humanas en la industria, agricultura, extracción de recursos naturales, desarrollo urbano, etc., acompañadas de un escaso o inexistente plan sostenible de descarga de aguas residuales, tratamiento de residuos sólidos, manejo de contaminantes orgánicos e inorgánicos, etc., afectan considerablemente a recursos hídricos, generando condiciones negativas para la salud pública y medio ambiente [2-4, 9]. La región amazónica del Ecuador representa una de las áreas con mayor biodiversidad y recursos hídricos del planeta (ríos, lagos, acuíferos, humedales, bosques inundados). Estos ecosistemas cumplen un papel importante en la regulación del clima, conservación de la biodiversidad y suministro de agua dulce a grupos humanos y vida silvestre. Investigadores y especialistas realizan esfuerzos por llevar a cabo muestreos en campo para registrar información orientada a la generación de planes de gestión hídrica, actividades que se dificultan por la extensión, clima, complejidad geográfica, escasa infraestructura y diversidad del entorno [5, 6]. Por la inversión en brigadas de especialistas, limitada capacidad de reacción y cobertura, complejidad logística, etc., el monitoreo manual de recursos hídricos es irregular, tiene un carácter puntual, prioriza a cuerpos de agua de mayor extensión e importancia. Es así como recursos hídricos de un menor tamaño (vertientes en zonas altas, afluentes a zonas pobladas) presentan un déficit de monitoreo, volviéndolos vulnerables y de compleja recuperación ante la falta de una detección temprana e intervención integral para contrarrestar procesos de contaminación o degradación [3]. En concordancia con lo descrito, existe una necesidad de implementar métodos alternativos que garanticen un monitoreo remoto extenso, seguro y permanente de recursos hídricos. A través del uso de tecnologías de teledetección de la Tierra (satelitales y aeronaves tripuladas) se efectúan escaneos a gran escala de determinados territorios [5, 7]. Por un lado, el uso de satélites presenta una limitante en la capacidad de actualización de información, ya sea por condiciones atmosféricas o posición temporal en la órbita, sin considerar la complejidad de procesamiento de la información y experticia requerida [7, 8]. Por otro lado, el uso de aeronaves, demanda de una tripulación para labores de vuelo y detección, infraestructura e inversión para su operación [6]. Finalmente, las estrategias de teledetección de la Tierra están orientadas a un monitoreo visual de las fuentes hídricas, permitiendo observar aspectos estrictamente físicos (color, claridad, espuma, residuos flotantes, vegetación, vida silvestre), lo cual resulta de utilidad en procesos avanzados de contaminación. El monitoreo visual puede utilizarse como estrategia complementaria, siendo el método de inspección fisicoquímico en el instrumento primordial para una detección temprana de contaminantes presentes en ecosistemas acuáticos a través de mediciones de parámetros como: pH, turbidez, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nutrientes (nitratos, fosfatos), metales pesados, compuestos orgánicos, etc. [4]. La evolución de las tecnologías de la información y microelectrónica han permitido el desarrollo de micro vehículos aéreos no tripulados, los cuales constituyen laboratorios aéreos inteligentes (LAI) equipados a bordo con el hardware y software para ejecutar misiones de forma autónoma, capaces de receptar, almacenar y transmitir información en tiempo real del estado de la plataforma aérea, así como de

la información recolectada por la carga útil instalada en el equipo, brindando soluciones rentables y de alta precisión en zonas de difícil acceso o de riesgo para el ser humano [8, 10, 11, 23]. En el trabajo se realiza una propuesta costo-eficiente de un prototipo de vehículo aéreo no tripulado (RPA) tipo convertiplano, cuyas características en términos de velocidad y cobertura, eficiencia energética, adaptabilidad a condiciones climáticas adversas, capacidad de carga útil, etc., superan a las de un RPA multirotor estándar. El prototipo de RPA tiene por objetivo evaluar de forma autónoma recursos hídricos de ubicados en la zona de Fátima, provincia de Pastaza, garantizando una apropiada recolección a escala para una descripción de la condición hidrológica actual del territorio.

## **Metodología y materiales**

El presente trabajo está dividido en las siguientes fases: I - investigación exploratoria que se utilizó para la revisión bibliográfica sobre el estado y factores de impacto ambiental en fuentes hídricas en la parroquia Fátima, evaluación de condiciones meteorológicas e información geográfica relevante de la zona; II – investigación experimental para el diseño mecánico, arquitectura de hardware/software del laboratorio aéreo basado en un RPA tipo convertiplano; III – Descripción de pruebas experimentales y presentación de principales resultados del estudio. A continuación, se detallan las fases mencionadas.

## **Consideraciones para planificación de monitoreo aéreo**

Pastaza constituye la provincia territorialmente más grande del Ecuador, sus recursos hídricos forman parte de la cuenca del Amazonas y constituyen una fuente única de abastecimiento para el consumo humano, actividades como la agricultura, pesca, ganadería, micro y mediana industria en general, turismo y deporte, etc. Su capital administrativa es la ciudad del Puyo. La principal fuente hídrica de esta ciudad es el río Puyo, con una longitud de aproximadamente 44 km hasta su desembocadura en el río Pastaza. A lo largo de su extensión, el río Puyo atraviesa zonas urbanas y rurales desde las cuales se descargan aguas residuales con un escaso tratamiento. En el presente artículo, para fines de desarrollo de la propuesta de prototipo de monitoreo de recursos hídricos en la Amazonía, se ha considerado el sector afluente a la cuenca media del río Puyo, correspondiente a la parroquia Fátima, la cual se caracteriza por ser una parroquia de microemprendimientos, a partir de las bondades de los sectores agrícola (cacao, café, plátano, yuca, caña de azúcar), ganadero (vacunos), y turístico. Sin embargo, la inexistencia de programas integrales permanentes de intervención para mitigar los efectos producto de las actividades de los sectores mencionados, conlleva a una afectación en la biodiversidad e impacto en la salud de los pobladores de la zona, etc. [9]. Debido a su ubicación geográfica, Fátima representa un punto estratégico para la evaluación temprana de agentes contaminantes, aliviando la afectación generada aguas abajo del cuerpo hídrico. Esta medida aseguraría mejores resultados en los programas de saneamiento ambiental que se encuentran en implementación en Puyo y por ende beneficiaría al resto de poblados hasta llegar a la desembocadura del río Pastaza. La parroquia Fátima se encuentra aproximadamente a 1000 m.s.n.m., posee un clima tropical húmedo (>80%) caracterizado por temperaturas cálidas (22 – 30 °C), corrientes de viento relativamente bajas (2–3 m/s) y considerables precipitaciones durante el año (>3.000 mm) con una distribución relativamente uniforme a lo largo de los meses. Esta zona no se caracteriza por elevaciones significativas en su área inmediata ( $\approx 82 \text{ km}^2$ ), sin embargo, en su perímetro se encuentra rodeada de colinas y montañas de la Cordillera Oriental de los Andes. La caracterización de la zona permite establecer los criterios base de diseño del RPA, tales como: superficie y altura de operación,

configuración y materiales óptimos, niveles de adaptabilidad del controlador de vuelo, carga útil y protocolos de comunicación para la implementación del sistema autónomo de monitoreo, etc. [8, 10, 11, 18].

En la Fig.1 se presenta el área seleccionada (413,5 m<sup>2</sup>) para la realización remota del monitoreo del estado fisicoquímico de las aguas del río Puyo. Dentro del proceso de validación del prototipo, se propone que el RPA recorra en aproximadamente 30 min. un perímetro de 4 km, realizando una trayectoria que tiene como inicio (despegue) y fin (aterrizaje) el punto A (estadio de la parroquia Fátima), avanzando hacia los puntos seleccionados para la recolección de muestras, análisis visual y sensorial: B – zona baja de la Captación río Puyo, C, E – presencia de fincas y emprendimientos, D – Dique de Fátima.

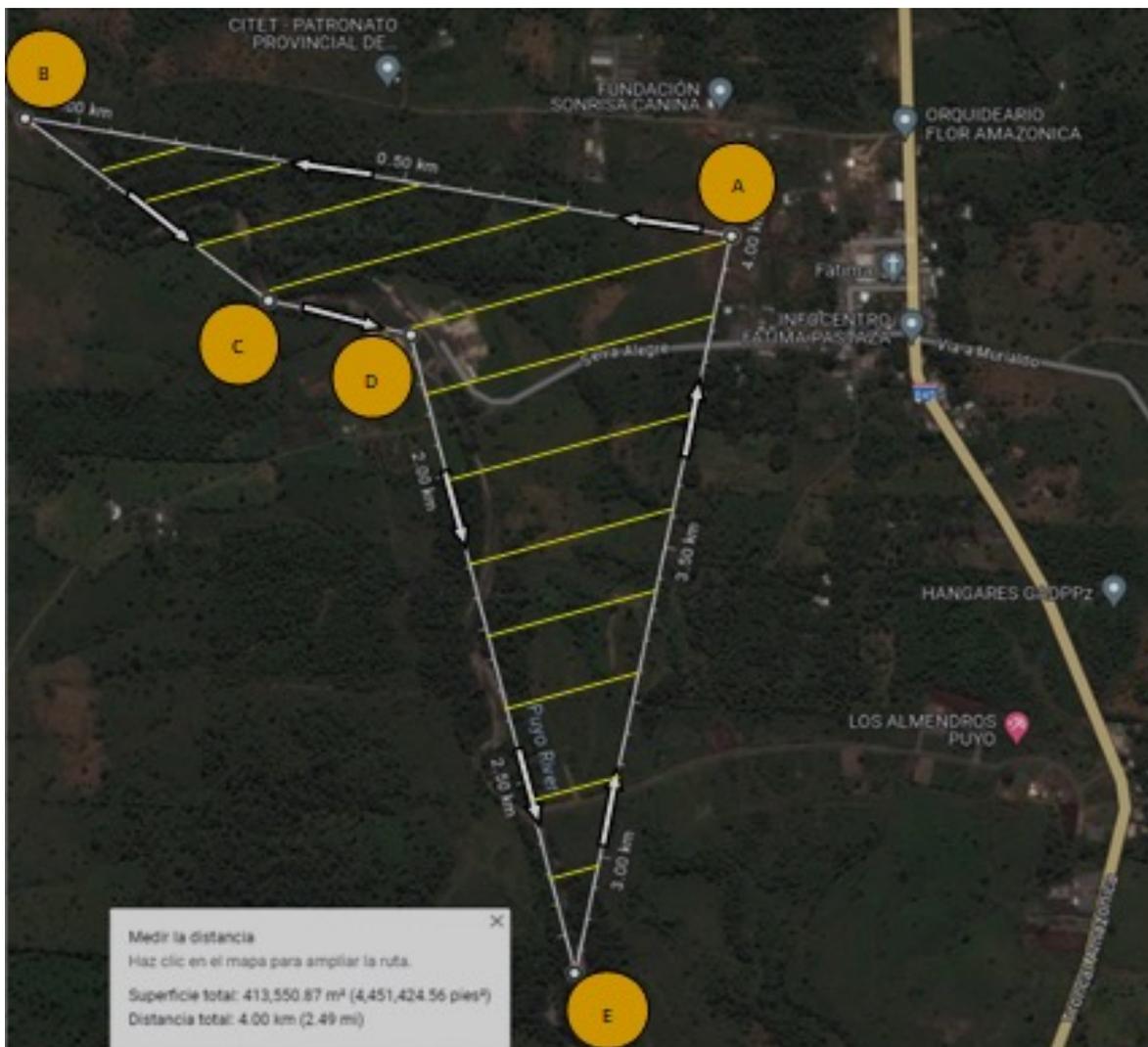


Fig. 1. Mapa descriptivo de la trayectoria del RPA durante el monitoreo: A – Estadio de la parroquia Fátima, B, C, D, E – Puntos de recolección de muestras y análisis.

## **Diseño estructural del laboratorio aéreo inteligente (LAI)**

En base a los antecedentes expuestos, en este capítulo se presenta el diseño elaborado en el software CAD SolidWorks de un laboratorio aéreo inteligente compuesto por un RPA con una configuración de 4 hélices distribuidas en forma de "H", cubierto por un fuselaje y alas, equipado con un sistema de recolección de muestras de agua (Fig.2). El proceso de diseño del LAI se basa en criterios de optimización topológica, garantizando su ligereza, resistencia a esfuerzos mecánicos, capacidades de hermeticidad y exposición a factores de humedad y luz solar, lo cual permite: mejorar las propiedades aerodinámicas y de vibración, así como la capacidad de carga útil [11, 18, 19, 23]; implementar sistemas eficientes de alimentación, módulos de larga distancia para transmisión de telemetría, video e información del proceso de monitoreo en tiempo en real. El prototipo de LAI posee un fuselaje (1) mismo que protege a componentes electrónicos, módulos de comunicación, alimentación, etc. presentes en su parte interna. Por otro lado, se encuentran los pares de motores eléctricos sin escobillas (3) y aspas (4), mismos que generan la fuerza de empuje necesaria para levantar al RPA, en conjunto con el sistema de recolección de agua (5), instalado de forma fija debajo del fuselaje. El diseño de fuselaje y alas de la aeronave fue realizado a partir de resultados de modelación aerodinámica en el software XFLR5 [13], en donde se determinó que la construcción de 2 metros de envergadura debe ser realizada en semi flecha, basada en un perfil asimétrico NACA 2415. Esta configuración representa un incremento en las capacidades iniciales de carga y tiempo de vuelo del RPA en hasta un 15%. Por otra parte, a través de la base de datos de CES Edupack [12] se determinó que tanto los perfiles tubulares y fuselaje deben ser elaborados en fibra de aramida con resina epoxy, con lo cual se consigue mejorar la rigidez y alivianar el peso de la construcción en hasta un 6%, inhibiendo efectos por condiciones climáticas adversas [13, 22]. Por otra parte, los pares de aspas de carbono y motores eléctricos en conjunto generan la suficiente fuerza de empuje para garantizar una relación de 1,5 a 1 con respecto al peso total del LAI, incluso en las etapas en las que sistema de recolección se encuentra en su nivel máximo. El tiempo estimado de vuelo es de hasta 45 min.

El sistema de recolección de muestras de agua (Fig. 3) consta de cuatro tubos (2) de 250 mililitros, contenidos en un soporte de sujeción (3). El agua asciende por un módulo de absorción, activado por una bomba de succión (5) a través de 2 mangueras (6). La manguera inferior forma parte del módulo vertical de desplazamiento que se introduce a aproximadamente 15 cm. bajo el agua. El módulo vertical se pone en movimiento a través un engranaje incrustado al eje del motor (4), el cual se activa posterior a la absorción del agua hasta la parte superior, etapa en la cual el volumen de líquido recolectado se vacía en el tubo correspondiente. Una vez que el tubo se encuentra lleno con la muestra, el servomotor (1) cambia la posición de la manguera superior en 90° en sentido de las manecillas del reloj, proceso que ocurre en 2 etapas de 45° destinadas a expulsar restos de agua en las cavidades internas de las mangueras y alinear la manguera superior con el siguiente recipiente. El proceso de recolección de muestras se realiza en los puntos previamente seleccionados por el operador y se repite hasta obtener las muestras requeridas, en un máximo de cuatro unidades. Dentro de este primer prototipo se ha considerado el uso de sensores de niveles de pH y temperatura para realizar de forma paralela los registros de los indicadores mencionados mientras transcurre el proceso de recolección de muestras.

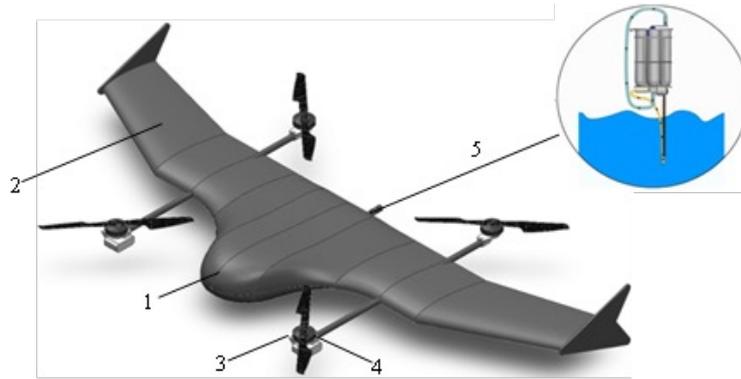


Fig.2. Vista general del prototipo de Laboratorio Aéreo Inteligente: 1- Fuselaje, 2 – Alas, 3,4 – Motores sin escobillas, 5 – Sistema de recolección de agua

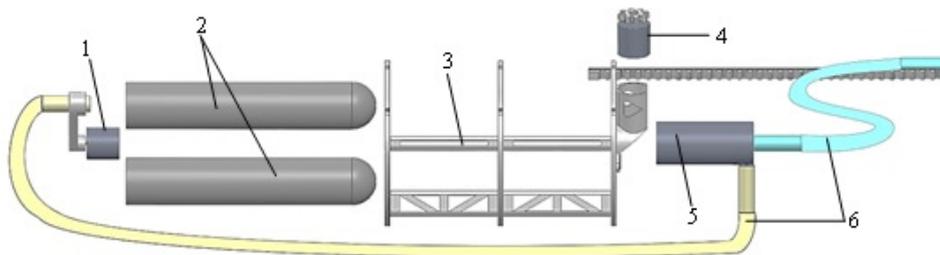


Fig.3. Estructura interna del sistema de recolección de muestras

## Diseño de la arquitectura de control

El diseño del controlador de vuelo se basa en el modelo dinámico del RPA y considera las características del entorno, permitiendo identificar las entradas de control para generar las acciones para guiar al robot hacia un estado deseado o la realización de una tarea. En concordancia con la Fig. 4, el movimiento del RPA ocurre en el sistema global de coordenadas  $OX_0Y_0Z_0$ , en donde  $CX_1Y_1Z_1$ ,  $A_ix_iy_iz_i$  ( $i=1-4$ ) son parte del sistema local que atraviesa el centro de masa  $C$ , así como el  $i$ -ésimo rotor  $A_i$ . La orientación en el espacio es determinada por los ángulos de Euler: alabeo ( $\varphi$ ), cabeceo ( $\theta$ ) y guiñada ( $\psi$ ) que ejercen su acción sobre los ejes  $X,Y,Z$  respectivamente [13-15, 21].

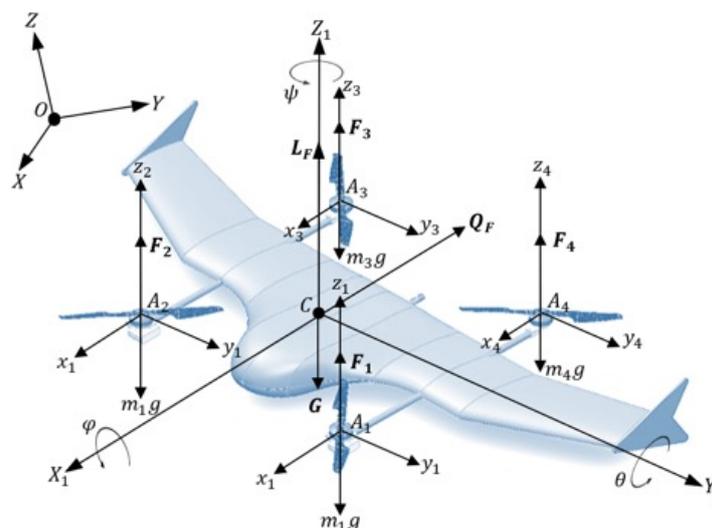


Fig.4. Esquema de cálculo del RPA:  $F_i$  – vector de la fuerza de empuje de los rotors;  $G$  – vector gravitacional;  $L_F, Q_F$  – vectores de fuerzas aerodinámicas sobre la superficie alar y fuselaje

En función de los aportes realizados sobre modelación del movimiento espacial de RPA [11, 18, 21], el modelo matemático generalizado (incluyendo los componentes cinemático, dinámico y electromecánico del sistema) puede ser descrito a través de la expresión (2), la cual simplifica el proceso de diseño del controlador de vuelo.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{V}} = f(\mathbf{Y}, \mathbf{V}, \mathbf{U}), \\ \mathbf{Y} = \chi(\xi) \end{cases} \quad (1)$$

donde,  $\xi = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$  – vector multidimensional de estados;  $\dot{\mathbf{V}} = d\xi/dt$  – vector de aceleraciones del centro de masa del RPA;  $\mathbf{U}, \mathbf{Y}$  – vectores de entradas y salidas de control respectivamente,  $\chi$  – matriz de filtro de la información.

Una de las peculiaridades del monitoreo remoto autónomo en zonas abiertas corresponde a la presencia de incertidumbres externas durante su operación (interacción con agentes, cambio dinámico de entornos, condiciones ambientales, etc.), así como a la ausencia periódica de contacto visual entre el operador y el RPA. Durante el proceso de toma de muestras y evaluación sensorial de las propiedades de la fuente hídrica, el LAI debe mantener su posición y estabilidad mientras los módulos del sistema de recolección se encuentran en contacto con el cuerpo acuáticos sobre el cual actúan corrientes (superficiales e internas). En tal virtud, en el presente trabajo se considera la implementación de una arquitectura de control jerárquico, en donde las acciones de control de los motores eléctricos generada por el controlador de vuelo (nivel bajo), son optimizados sobre un horizonte de predicción a través de una estrategia de control predictivo MPC (nivel alto) en función del conocimiento del modelo dinámico del RPA [11, 20, 22, 24, 25], lo cual permite satisfacer propiedades de un control robusto, tales como: adaptabilidad, autoaprendizaje y capacidad de respuesta y manejo de incertidumbres en tiempo real. En general, el sistema de control del vehículo aéreo (Fig.5) puede ser descrito a través del siguiente esquema, compuesto de los módulos: Operador, Interfaz Ser Humano-Máquina (HMI) y LAI.

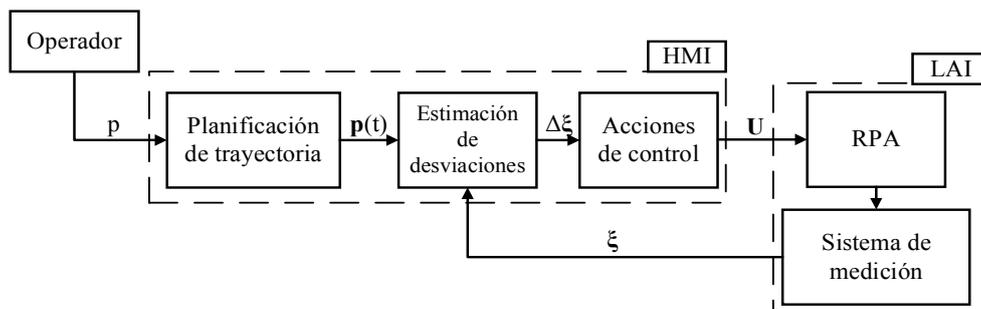


Fig. 4. Esquema generalizado de sistema de control del LAI

En función de la descripción anterior, en la Fig.5 se presenta un esquema generalizado de la arquitectura de control del sistema, en la cual se describe el proceso de interacción entre el operador y LAI a través de una interfaz HMI, la cual tiene por objetivo: garantizar el trabajo sincrónico de sus elementos para una mayor efectividad en las capacidades operativas del sistema, minimizando la influencia del factor humano; permitir el intercambio efectivo de información para el planeamiento de trayectoria, corrección y análisis de la tarea de monitoreo de fuentes hídricas, gestión de información sobre el estado del sistema, intervención inmediata con estrategias alternativas o de emergencia. La interacción entre el Operador y el LAI utiliza protocolos de comunicación basados en telemetría de red móvil, lo cual permite gestionar la información sin un límite de rango (en sectores de

cobertura inestable, el sistema puede ser apoyado por sistemas terrestres de amplificación de señal. Bajo estas consideraciones, el Operador genera la matriz de puntos de interés para la recolección de muestras de agua (coordenadas GPS)  $p = [p_1, p_2, \dots, p_i]$ . La información contenida en  $p$  es introducida a la unidad de generación de trayectoria, creando el vector de entrada  $\mathbf{p}(t) = [x^d, y^d, z^d, \psi^d]^T$ . El sistema de medición sensorial del microcontrolador de vuelo permite acceder a través del lazo de retroalimentación a la información sobre el estado actual del LAI  $\xi(t) = [\alpha, \gamma]^T$ , conformado por los vectores de posición  $\alpha = [x, y, z]^T$  y orientación  $\gamma = [\varphi, \theta, \psi]^T$  respectivamente.

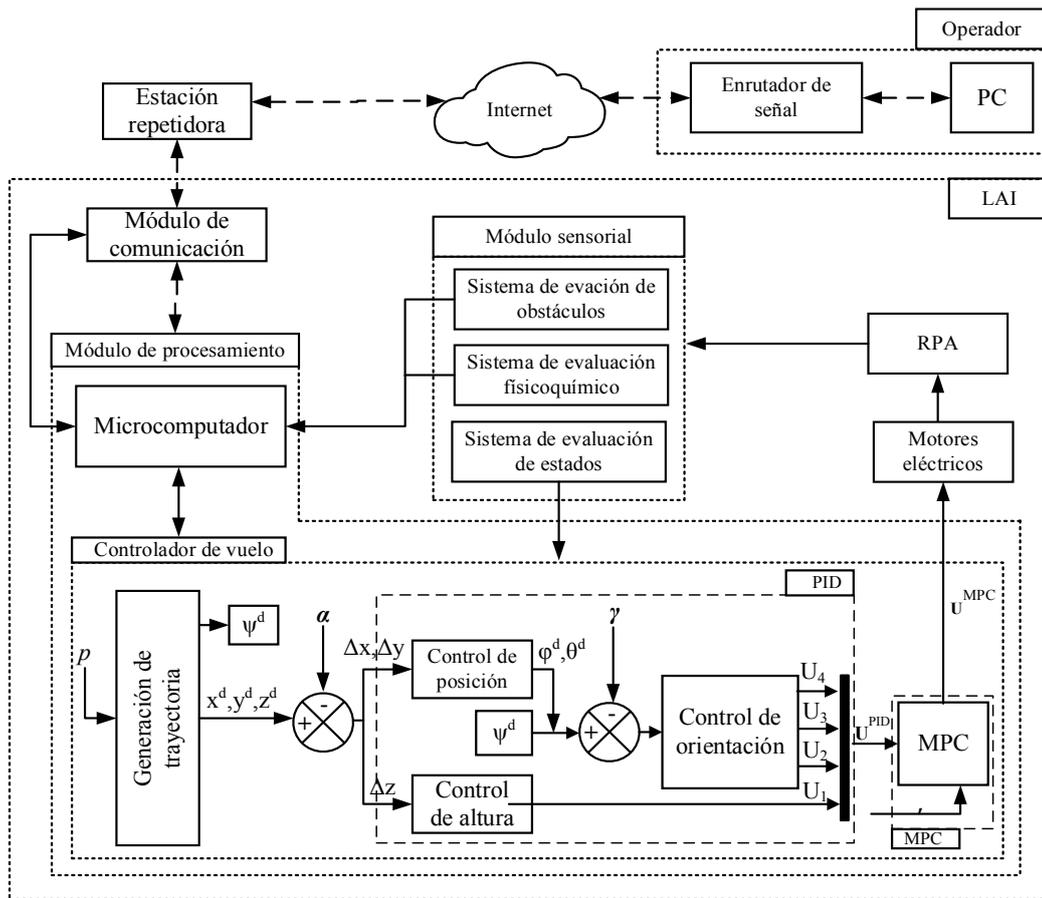


Fig.5. Esquema generalizado de arquitectura de control del LAI

Posteriormente, los registros obtenidos son contrastados con los estados deseados provenientes del modelo dinámico del RPA, formando de esta manera el vector de desviaciones  $\Delta\xi(t) = [\Delta\alpha, \Delta\gamma]^T$ . De esta manera, la formación del vector de entradas de control  $\mathbf{U}$  ocurre de acuerdo con la expresión [14, 16, 17]:

$$U_i = K_p e_i(t) + K_i \int e_i(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e_i(t), i = 1 \dots 4 \quad (2)$$

donde,  $e_i(t)$  – desviación entre los valores deseado y real del  $i$ -ésima entrada de control,  $K_p, K_i, K_d$  – coeficientes del controlador PID.

En adelante denominaremos al vector de entradas como  $\mathbf{U}^{PID}$ , el cual alimenta al nivel superior de control MPC. Según la estructura presentada (Fig.6), dentro de este nivel se realiza una predicción del comportamiento del sistema en un intervalo de tiempo  $N$ . La estimación del vector resultado  $\mathbf{U}^{MPC}$  es posible obtener mediante el cálculo de la función de costo  $J$  en función de un algoritmo de programación cuadrática [11, 20].

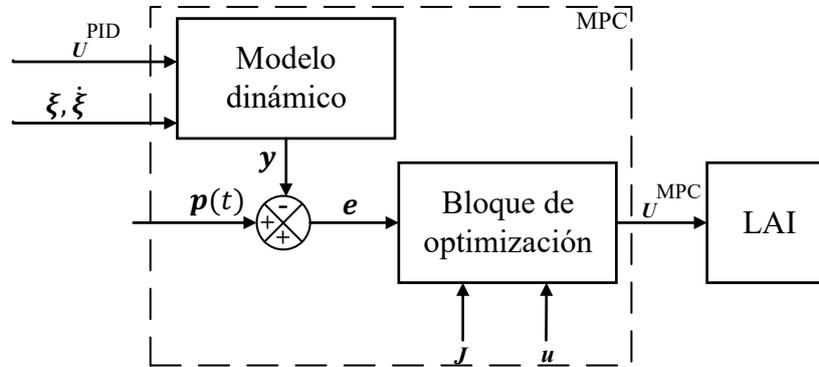


Fig.6. Estructura interna del bloque MPC

Posterior a la estimación del vector resultante optimizado  $\mathbf{U}^{MPC}$ , es imprescindible generar el vector de voltajes requeridos por los motores eléctricos del RPA  $\mathbf{u}$  en dependencia de las desviaciones registradas por  $\Delta\xi$ . En tal virtud, el vector de velocidades angulares a ser suministradas para operación robusta del sistema puede denotarse según la siguiente expresión [11]:

$$\boldsymbol{\omega}_i = f(\mathbf{U}^{MPC}(\Delta\xi)), \quad i = 1 - 4 \quad (3)$$

donde,  $\boldsymbol{\omega}_i$  – vector de velocidades angulares del  $i$ -ésimo motor eléctrico.

Finalmente, la transformación de los valores de  $\boldsymbol{\omega}_i$  a señales de pulso modulado PWM (no se muestra en Fig. 6) se realiza en función de las características de los motores eléctricos seleccionados para el RPA. Por otro lado, el módulo sensorial del LAI está compuesto por sistemas de evasión de obstáculos y evaluación de propiedades fisicoquímicas, los cuales se realizan a nivel de hardware mediante sensores infrarrojos y pH según corresponde, y a nivel de software a través del microcomputador en base a algoritmos desarrollados por el grupo de investigadores.

## Resultados y discusiones

En calidad de principal aporte a la investigación desarrollada, en función de las consideraciones presentadas en las secciones de diseño estructural y de control, se presenta el prototipo de laboratorio aéreo inteligente compuesto por un RPA con una configuración de 4 hélices distribuidas en forma de "H", propuesto para la realización de actividades de monitoreo de recursos hídricos (Fig.7).

Con el objetivo de estimar la calidad de las mediciones de propiedades fisicoquímicas (potencial de hidrógeno, pH) de recursos hídricos a través del método automático (remoto por laboratorio aéreo inteligente), la información obtenida por el LAI se correlaciona con los datos registrados a través del método manual (evaluación en campo por brigadas de especialistas), realizando de esta manera un doble sentido del estado de la fuente hídrica en cada punto de muestreo seleccionado.

Para efectos de demostración de las capacidades del LAI como alternativa viable a la estrategia manual y escalable a una evaluación permanente del estado del ecosistema acuático en territorios de la Amazonía del Ecuador, se recurre a procedimientos estadísticos que permitan excluir la acumulación de errores en las mediciones (Prueba de rachas), establecer una relación entre los métodos propuestos (Prueba T-Student para muestras seleccionadas), así como garantizar tolerancias permisibles en los datos recolectados (Prueba de Intervalo de confianza) [26, 27]. Estas pruebas estadísticas se realizan a través del software SPSS [28] con una matriz de 16 registros experimentales de nivel de pH para cada método (manual y automático).

El proceso de evaluación de los niveles de pH en campo representa una tarea compleja dada la sensibilidad del sensor a la contaminación, por lo cual el equipo de especialistas realiza este procedimiento posterior a cada medición, no obstante, el método automático limita esta posibilidad a una vez que el LAI finaliza con la misión de monitoreo, lo cual podría llevar a una acumulación sistemática del error en las mediciones de pH. En concordancia con los resultados obtenidos en la Prueba de rachas (Tabla 1) se determina que los valores de significancia asintótica bilateral (Sig.asin. bilateral) de los métodos automático (0,267) y manual (0,796) son superiores al nivel de significancia permisible del estudio (0,05), con lo cual se valida una hipótesis nula que confirma la independencia existente entre las medidas dentro de cada método.

**Tabla 1. Resultados de Prueba de rachas**

	AUTOMÁTICO	MANUAL
Valor de prueba <sup>a</sup>	6,9594	7,0063
Casos < Valor de prueba	6	8
Casos >= Valor de prueba	10	8
Casos totales	16	16
Número de rachas	6	8
Z	-1,109	-0,259
Sig. asin. (bilateral)	0,267	0,796

a. Media

Posteriormente se realiza un análisis de las correlaciones existentes entre los métodos manual y automático mediante una prueba T-Student (Tabla 2), en la cual se establece un valor de significancia (0,392) mayor que el nivel de significancia del estudio, con lo cual se establece la inexistencia de una diferencia significativa entre métodos comparados (correlación aproximada del 91%).

**Tabla 2. Resultados de Prueba T-Student (Emparejada)**

Par 1	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig.
	Media	Desviación estándar	Media error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
AUTO & MANUAL	-0,046	0,212	0,053	-0,160	0,066	-0,882	15	0,392

Adicionalmente, la implementación del LAI como una propuesta alternativa de monitoreo de recursos hídricos debe fundamentarse en la precisión y fiabilidad de las mediciones recolectadas, para lo cual se lleva a cabo una Prueba de Intervalo de confianza en base a la variable error (desviación entre medidas recolectadas a través de métodos manual y automático para un mismo punto). En función de las métricas de límites inferior (-0,0664) y superior (0.1601) se concluye que el margen de error no interfiere en la calidad del estudio.

**Tabla 3. Extracto de prueba de Intervalo de confianza**

		Estadístico	Error estándar	
ERROR	Media	0,0469	,05313	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-0,0664	
		Límite superior	0,1601	
	Media recortada al 5%	0,0465		
	Mediana	0,1000		
	Varianza	0,045		

Tras la evaluación de la calidad de los resultados de las mediciones registradas de niveles de pH de forma remota mediante el uso del prototipo del LAI (Fig.7), se procede con la realización de pruebas de campo en la forma y condiciones establecidas dentro de la investigación, considerando los puntos establecidos de recolección de muestras (Fig.1). Los resultados mostrados en la Fig. 8 corresponden a los niveles de pH registrados durante el mes de enero (periodicidad semanal) con valores entre 6.4 y 7.6.



*Fig. 7. Prototipo de Laboratorio Aéreo Inteligente (LAI).*

Según lo establecido en las normativas Autoridad Ambiental Nacional [2, 9], los niveles permisibles de pH a nivel de recursos hídricos para la preservación de ecosistemas acuáticos, consumo humano y realización de actividades deportivas se encuentran en un rango de 6,5 y 8,5 unidades. En tal virtud, las zonas evaluadas presentan tendencia a adquirir propiedades alcalinas, a lo cual aportan las descargas directas de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y ganaderas ubicadas en el margen próximo al río Puyo. Los resultados obtenidos de forma remota a través del LAI guardan una estrecha relación con los datos registrados en zonas aledañas por brigadas de investigadores en periodos anteriores [9].

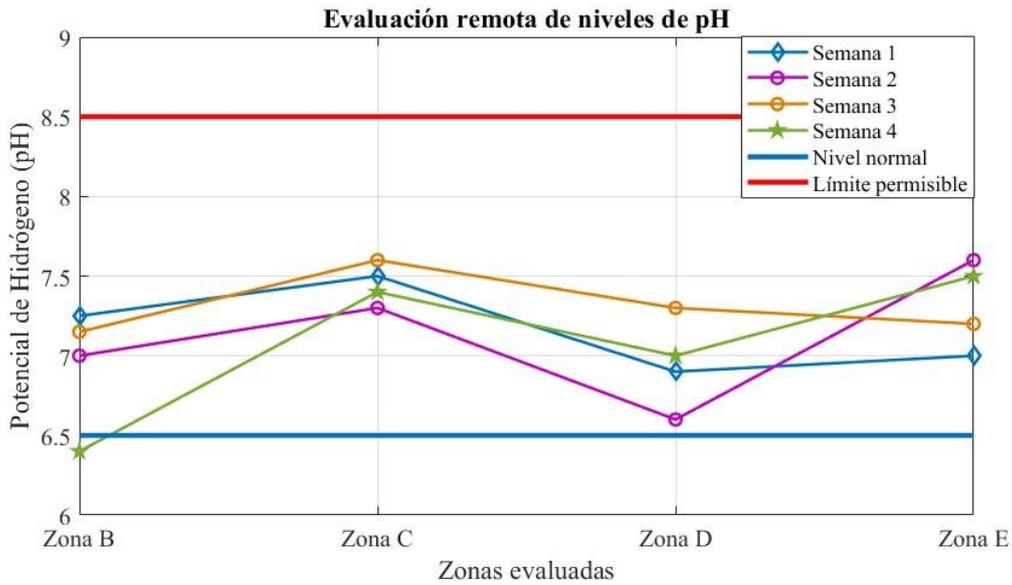


Fig. 8. Resultados de medición remota de nivel de pH

Finalmente, en esta etapa de investigación se lleva a cabo un proceso de evaluación de efectividad de monitoreo remoto de propiedades fisicoquímicas a través del prototipo de LAI, para lo cual se ha requerido de la evaluación técnica, validación de resultados de pruebas experimentales, comparación con soluciones existentes, recomendaciones y perspectivas de desarrollo por parte de usuarios-expertos (especialistas, investigadores, técnicos de brigadas en campo). En función del grado de conocimiento y experiencia se procede a introducir un criterio integral evaluado en un rango de 10 unidades basado en los siguientes criterios:  $K_1$  – Desviación de medición de pH,  $K_2$  – Periodicidad de recolección de muestras,  $K_3$  – Velocidad de transmisión de datos al laboratorio terrestre,  $K_4$  – Área de monitoreo cubierta,  $K_5$  – Cambio de condiciones climáticas,  $K_6$  – Capacidad de sensado de parámetros adicionales de fuentes hídricas,  $K_7$  – Desviación en determinación de coordenadas de toma de muestras,  $K_8$  – Profundidad en la toma de muestras,  $K_9$  – Costo de operación de tecnología,  $K_{10}$  – Requerimientos especiales en la formación del usuario-operador.

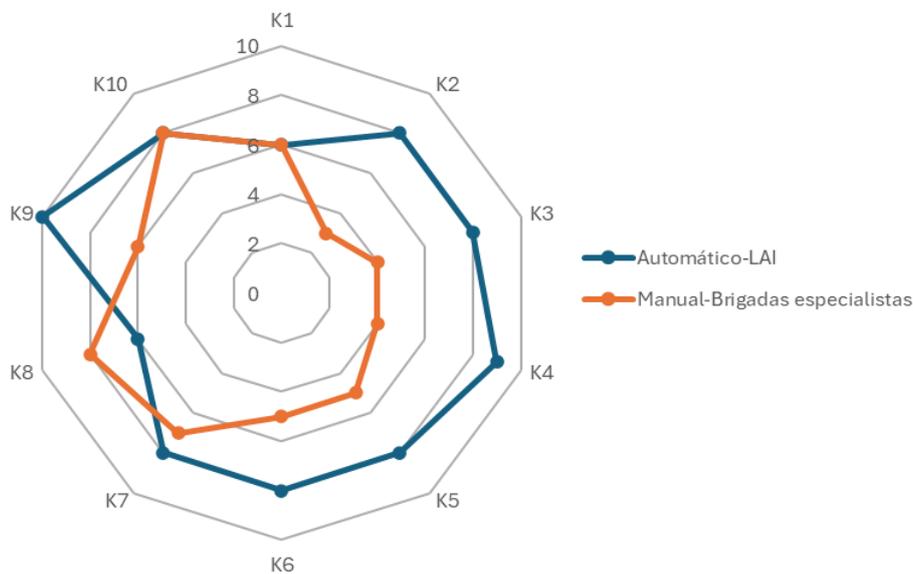


Fig. 9. Evaluación de la calidad de monitoreo de recursos hídricos

En la Fig. 9. se presenta un diagrama radial de evaluación de la calidad de monitoreo de recursos hídricos a través de los métodos manual (brigadas de especialistas) y automático (LAI) en función de la información registrada por parte de los expertos. El criterio integral de calidad  $I_j$  de los métodos registrados puede ser evaluado en función de la siguiente expresión:

$$I_j = \sum_{i=1}^{10} \frac{K_p^i}{K_p^{max}} \cdot \eta_{ij} \quad (4)$$

donde,  $j$  – método de monitoreo;  $0,5 < \eta_{ij} \leq 1$  – coeficiente de competencia de expertos;  $K_p^i, K_p^{max}$  – valores promedio y máximo registrado del criterio  $K_i$

El resultado del análisis demuestra que el criterio integral de evaluación de expertos para el método automático (0,84) supera en 1,75 veces el criterio integral para el método manual (0,48). El rango de valuación del coeficiente integral  $\bar{I}_i$  se encuentra en un rango de 0 (mínimo) a 1 (máximo). La información obtenida corresponde a un coeficiente de competencia de expertos de 0,9 unidades.

## Conclusiones

En este artículo se ha realizado la propuesta de una estrategia de monitoreo operativo remoto a través de la implementación de un laboratorio aéreo inteligente para evaluación de propiedades de recursos hídricos en la Amazonía del Ecuador. Adicionalmente, se ha realizado una breve descripción de los criterios para la planificación de una tarea de monitoreo en la zona de Fátima, provincia de Pastaza. El diseño estructural del LAI basado en el uso de un RPA tipo convertiplano y un sistema de recolección de muestras se ha considerado. A fin de garantizar misiones remotas autónomas de evaluación de recursos hídricos, una arquitectura de hardware y software basada en criterios de operabilidad de largo alcance, así como de estrategias de control robusto se integran en una interfaz HMI. La implementación en campo de las principales funcionalidades del LAI ha permitido maximizar la frecuencia y cobertura de monitoreo, contrastar resultados obtenidos de forma remota y manual por brigadas, conocer limitaciones tecnológicas existentes, minimizar errores y garantizar la generación de datos e información precisa a través de la estandarización de procedimientos bajo apoyo de especialistas del área de conservación ambiental. A futuro se considera mejorar el mecanismo del sistema de recolección de muestras de agua, actualmente el líquido es depositado en envases distintos, pero su absorción en los puntos de control ocurre a través del sistema general de mangueras, lo cual conlleva a la acumulación de residuos en sus paredes, alterando la composición del líquido recolectado y en consecuencia a los resultados de laboratorio. Adicionalmente se llevará a cabo la implementación de sensores para la evaluación de niveles de temperatura y oxígeno dentro del cuerpo acuático, así como de una cámara térmica, la cual permita realizar de forma paralela un monitoreo visual de las fuentes hídricas, identificando el cambio de temperatura como factor para determinar descargas de aguas residuales, así como para evaluar la dinámica de desplazamiento de especies acuáticas para su conservación.

## Referencias

1. Organización de las Naciones Unidas: Derecho a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible. <https://www.ohchr.org/es/documents/thematic-reports/ahrc4953-right-clean-healthy-and-sustainable-environment-non-toxic>. Accedido el 24 de Febrero de 2024.
2. Sánchez A.A., Tello L.L.: La contaminación ambiental en los acuíferos de Ecuador. *Revista Visión Contable*, pp. 37-47 (2023).
3. Chamorro W. P., Sarduy-Pereira L. B., et al.: Gestión de los residuos sólidos en áreas rurales, un análisis de una parroquia de la amazonia ecuatoriana. *I+ D Tecnológico*, 1(19). (2023).
4. Galarza E., Cabrera M., et. al.: Assessing the quality of amazon aquatic ecosystems with multiple lines of evidence: the case of the Northeast Andean foothills of Ecuador. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, pp. 52-61 (2020).
5. Sorribas, M. V., et al.: Hydrological tracking model for Amazon surface waters. *Water Resources Research*, 9, e2019WR024721 (2020).
6. Goerner A., Gloaguen R., Makeschin F.: Monitoring of the Ecuadorian mountain rainforest with remote sensing. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1), 013527 (2007).
7. Santos F., Meneses P., Hostert P.: Monitoring long-term forest dynamics with scarce data: a multi-date classification implementation in the Ecuadorian Amazon. *European Journal of Remote Sensing*, 52, p. 62-78 (2019).
8. Valencia E., Palma K., Changoluisa I., et al.: Wetland monitoring through the deployment of an autonomous aerial platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1(32), 012002 (2019).
9. Abril Saltos, R.V., et. al.: Caracterización preliminar de calidad de aguas en subcuenca media del río Puyo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(2), 59-72 (2017).
10. Jatsun S., et al.: Modeling and control architecture of an autonomous mobile aerial platform for environmental monitoring. *IEEE International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, Quito, Ecuador, p. 177-182 (2019).
11. Martínez León, A. S., Mosquera Morocho, L.M., Emelyanova O.: Control System of Small-Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Sea Vessels on Coastal Territory of Ecuador. *Frontiers in Robotics and Electromechanics*, Springer, 1(2), p. 295-314.
12. Martínez León A.S., Rukavitsyn A. N., Jatsun S. F.: Topology optimization of a UAV airframe. *6th International Conference on Industrial Engineering*, p. 338-346 (2021).
13. Emelyanova O., et. al: The synthesis of electric drives characteristics of the UAV of "convertiplane-tricopter" type. In: *MATEC Web of Conferences*, 99, 02002 (2017).

14. Mellinger D., Kumar V.: Control and Planning for Vehicles with Uncertainty in Dynamics. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 960-965 (2010).
15. Rinaldi M., Primatesta S., Guglieri, G.: A comparative study for control of quadrotor UAVs. Applied Sciences, 13(6), 3464 (2023).
16. Bao N., Ran X., Wu Z., et al.: Research on attitude controller of quadcopter based on cascade PID control algorithm. IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), pp. 1493-1497 (2017).
17. Zenkin A., et al.: Quadcopter Simulation Model for Research of Monitoring Tasks. Proceedings of 26th Conference of Open Innovations Association, pp. 449-457 (2020).
18. Jatsun S., Emelyanova O., Martinez Leon A., Mosquera Morocho L.: Controlled Adaptive Flight of a Convertiplane Type Tricopter in Conditions of Uncertainty for Monitoring Water Areas. IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-7 (2020).
19. Krzysztofik I., Koruba Z.: Analysis of Quadcopter Dynamics During Programmed Movement Under External Disturbance. Nonlinear Dynamics and Control, Springer, Cham, pp. 177-185 (2020).
20. Cheng H., Yang, Y.: Model predictive control and PID for path following of an unmanned quadrotor helicopter. IEEE 12th Conference on Industrial Electronics and applications, pp. 768-773 (2017).
21. Jatsun S., et al.: Hovering control algorithm validation for a mobile platform using an experimental test bench. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1(1027), 012008 (2021).
22. Doukhi O., Fayjie A., Lee D.: Intelligent controller design for quad-rotor stabilization in presence of parameter variations. Journal of Advanced Transportation (2017).
23. Martins L., Cardeira C., Oliveira P.: Feedback Linearization with Zero Dynamics Stabilization for Quadrotor Control. Intelligent & Robotic Systems 1(101), pp. 1-17 (2021).
24. Casado R., Bermudez A.: Simulation Framework for Developing Autonomous Drone Navigation Systems. Journal Electronics 1(10), 7 (2021).
25. Dim C., Nabor F., Santos G., et al.: Novel Experiment Design for Unmanned Aerial Vehicle Controller Performance Testing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing 1(533), 012026 (2019).
26. Flores-Ruiz E., et al.: The research protocol VI: How to choose the appropriate statistical test. Inferential statistics. Journal Alerg Mex., 3(64), pp. 364-370 (2017).
27. Bautista-Díaz M.L., et al.: Pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas: su clasificación, objetivos y características. Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 9 (17), pp. 78-81 (2020).

28. Universidad del Pacífico: Guía práctica de SPSS para diseños paramétricos y no paramétricos. [https://cliic.org/2020/Taller-Normas-APA-2020/Guia-Estadistica-PACIFICO\\_c.pdf](https://cliic.org/2020/Taller-Normas-APA-2020/Guia-Estadistica-PACIFICO_c.pdf). Accedido el 01 de Marzo de 2024.