

Vehículo autónomo de superficie para la monitorización de cianobacterias en embalses. Un caso práctico

Rochas A.^a, Forero D.^a, González A.^a, García-Pérez L.^a, Chacón J.^a, Lopez-Orozco J.A.^a

^a Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid, Plaza de las Ciencias nº 1, 28040, Madrid, España.

Resumen

Ante el aumento de la población y el cambio climático, los recursos hídricos disponibles están siendo amenazados. Las autoridades de los países avanzados buscan nuevos modelos y sistemas de vigilancia que garanticen la calidad del agua frente a los nuevos desafíos y contaminantes emergentes. Sin embargo, los métodos actuales de monitorización no son aplicables, tanto por coste como por inmediatez ante el aumento que se requiere en la monitorización tanto espacial como en frecuencia. El uso de vehículos autónomos de superficie (VAS) es una solución, escalable y económica, que permite una mayor frecuencia de monitorización en cualquier parte un embalse a un coste efectivo bajo. Este artículo describe el VAS desarrollado en la UCM para la monitorización de cianobacterias, contaminante biológico emergente; el procedimiento para desplegarlo en un embalse real; y, que es fácil aumentar el número de muestreos con un coste mucho menor que los métodos actuales. Sin embargo, aunque el vehículo es autónomo, se necesita la intervención humana.

Palabras clave: Vehículos autónomos de superficie, Posicionamiento dinámico, Gestión de la calidad del agua.

Autonomous Surface Vehicle for Cyanobacteria Monitoring in Reservoirs: A Practical Case Study

Abstract

With the rise in population and climate change, available water resources are increasingly under threat. Authorities in developed countries are seeking new models and monitoring systems to ensure water quality in the face of emerging challenges and contaminants. However, current monitoring methods are not suitable, both due to their cost and their lack of immediacy, given the increased need for more frequent and widespread monitoring. The use of autonomous surface vehicles (ASVs) offers a scalable and cost-effective solution that enables more frequent monitoring anywhere in a reservoir at low cost. This article describes the ASV developed at UCM for monitoring cyanobacteria, an emerging biological contaminant; the procedure for deploying it in a real reservoir; and how increasing the number of samples can be done easily at a much lower cost than with current methods. However, although the vehicle is autonomous, human intervention is still required.

Keywords: Autonomous surface vehicles, Dynamic positioning, Water quality and quantity management.

1. Introducción

La calidad y cantidad de agua potable son unas de las inquietudes centrales del sexto objetivo de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas. Estas preocupaciones surgen de las dificultades que tienen una elevada parte de la población mundial para acceder a recursos hídricos idóneos, debido a causas como el aumento de la población, los malos usos y contaminación del agua, el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos (p.e. sequías e inundaciones). En países desarrollados con recursos hídricos limitados (entre los que se encuentra España y otros

países del sur de Europa), una gestión predictiva y proactiva de las masas de aguas puede mejorar su calidad y, por lo tanto, incrementar la disponibilidad de recursos hídricos aptos para el consumo y usos recreativos.

Un ejemplo de la preocupación en estos temas es la nueva directiva europea 2020/2184, que exige un seguimiento más riguroso y frecuente de la masa de agua, lo que hace que los métodos de muestreo y análisis tradicionales resulten ineficientes y costosos. Del mismo modo, las políticas de las autoridades de cada país son factores claves para salvaguardar los recursos hídricos, por lo que el Ministerio de Sanidad español ha publicado el Plan Estratégico de Salud y

*Autor para correspondencia: jalo@ucm.es

Medioambiente 2002-2026, donde hace hincapié en el desarrollo de nuevos modelos y sistemas de vigilancia que garanticen la calidad de agua frente a los nuevos desafíos y contaminantes emergentes que están apareciendo. En concreto, se hace mención explícita a las cianobacterias y se establecen las siguientes acciones: b) “Desarrollar sistemas de vigilancia de cianobacterias y cianotoxinas en las zonas protegidas de áreas de captación o de aguas de baño”, c) “Desarrollar modelos matemáticos que ayuden a predecir la calidad de las zonas de baño con precisión”, and d) “Desarrollar servicios digitales que permitan informar y predecir el estado de los recursos en tiempo (cuasi-)real”.

Las cianobacterias son agentes biológicos, que suelen encontrarse de forma natural en las masas de agua y, aunque en concentraciones bajas no representan ningún riesgo, cuando se dan las condiciones adecuadas, pueden proliferar en exceso (afloramientos masivos, conocidos como blooms) llegando a ser un contaminante biológico y representando una amenaza significativa para la calidad del agua, afectando tanto a los ecosistemas como a los usuarios de recursos hídricos, ya que en algunos casos producen metabolitos secundarios altamente tóxicos (para el hígado, piel y sistema nervioso). Cuando esto ocurre, los recursos hídricos dejan de ser utilizables, salvo que se apliquen costosos tratamientos en las estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP) o en la masa de agua.

Siguiendo las directrices del Plan Estratégico de Salud y Medioambiente, miembros del grupo de investigación ISCAR han trabajado en el desarrollo de modelos que ayuden a predecir el riesgo de aparición de blooms de cianobacterias, y en el desarrollo de sistemas de monitorización que permita un aumento de los puntos y periodos de muestreo a un coste mucho inferior del actual.

En este artículo, se muestra nuestra propuesta para realizar la monitorización en diferentes puntos del embalse utilizando vehículos autónomos de superficie (VAS), la metodología para su realización y los pasos prácticos para su despliegue y ejecución en campo.

2. El vehículo autónomo de superficie como sistema de monitorización

Actualmente la monitorización del estado de un embalse se realiza mediante la medida periódica en las proximidades de la toma de agua o en la ETAP, o en algunos embalses con estaciones fijas (red de monitorización estatal SAICA). Aunque los costes no son elevados, costes fijos, este sistema no permite anticipar la aparición de un Bloom ni tener un conocimiento adecuado del estado del embalse puesto que sólo se realiza en un punto determinado perdiendo el conocimiento de lo que ocurre en otras partes más alejadas del embalse, donde se puede estar produciendo el Bloom y que no se conocerá hasta que llegue a ese punto de medida cuando, en muchos casos, ya no hay tiempo de reacción o es muy costoso.

Actualmente, cuando se tiene sospecha de la existencia de un Bloom, se pueden contratar los servicios de una empresa especializada que toma muestras de agua que de forma manual toma varios litros de agua en algunos puntos y realiza posteriormente su análisis en el laboratorio. Aunque este procedimiento es bastante preciso, es muy costoso y los resultados se demoran, dependiendo del análisis, incluso semanas. Esto impide tanto el aumento en el número de puntos

de medida como la anticipación que es necesaria para ser efectivos. Como se puede intuir, los costes variables (por cada muestreo y monitorización temporal) son elevados y los costes marginales apenas disminuyen, lo que hace inviable responder a la directiva de aumentar la frecuencia y cobertura de los muestreos.

Debido a lo anterior, el uso de VAS puede realizar la monitorización continua y en múltiples puntos del estado del embalse a un coste variable mucho menor, lo que permite aumentar la frecuencia espacio-temporal de la monitorización facilitando que sea realizable. Además, si se incorpora un modelo adecuado será posible alertar de la probable formación de un Bloom y en ese momento requerir los análisis adecuados reduciendo así su cantidad y por tanto su coste.

Existen multitud de vehículos autónomos marinos de superficie (Liu Z. et. al. 2016; Bai et. al., 2022; Barrera C. et. al, 2021) diseñados para tareas de vigilancia, inspección o monitorización tanto en aguas continentales como marinas, para costas, puertos o incluso alta mar. En concreto, ejemplos de pequeños VAS con sonda y cabestrante similares al presentado en este artículo son: (Ferri. G. et. al. 2015; Fornai F. et. al. 2017) que es utilizado para monitorización de la calidad del agua en zonas costeras, con una estructura bi-casco y cabestrante en la unión de los patines (se considera pequeño, pero pesa unos 70 Kg y mide 1991x1164 mm); (Hitz G et. al. 2012), catamarán clásico con un cabestrante diseñado exprofeso para medir en toda la columna del agua, para monitorizar recursos hídricos en aguas continentales y específicamente la proliferación de cianobacterias; o (Zhang et. al. 2023) que describe un USV con casco tradicional y con propulsión de hélice y timón que porta un cabestrante para hacer descender un tubo y tomar muestras de agua a distintas profundidades.



Figura 1: VAS con la cubierta protectora.

El VAS diseñado en la UCM, Figura 1, es relativamente pequeño (70x70 cm) y con un casco de 15 kg de peso (sin incluir baterías ni lastres), lo que su transporte es fácil y cabe en un coche de tamaño medio. En su interior, Figura 2, se pueden observar dos cajas, una con el controlador de navegación (Mateksys F405-WING-V2 Matek F405) y basado en la plataforma de código abierto Paparazzi. La otra caja es utilizada para el control de la sonda multiparamétrica (utiliza una Raspberry Pi 4.0). La característica principal del VAS es que tiene los motores de las hélices situados a los lados de los patines y algo avanzados lo que le confiere una alta

maniobrabilidad y le permite rotar sobre sí mismo con facilidad.



Figura 2: Interior del VAS.

2.1. Sistema de monitorización de cianobacterias

El sistema de monitorización se basa en la realización de perfiles mediante una sonda multiparamétrica, construida exprofeso para nuestro VAS por la empresa EcoHydros. La sonda, Figura 3, dispone de sensores de temperatura, pH, oxígeno disuelto, ficocianina, clorofila-a y profundidad (sensor de presión). También se puede observar el tubo central, que protege la sonda, donde se aloja el cabestrante, por medio del cual se baja la sonda a la profundidad deseada mientras se toman medidas de todos los sensores, de forma automática, con el periodo seleccionado. Las medidas son almacenadas en la sonda y leídas por la Raspberry Pi mediante comunicación RS-485 por medio del cable de kevlar, cable amarillo que se ve en la Figura 3, y que también sirve de sujeción.

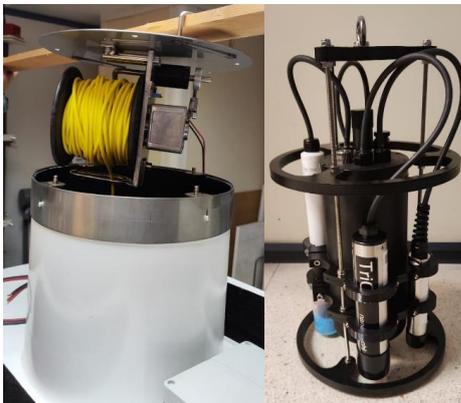


Figura 3: Cabestrante y sonda multiparamétrica.

En la Figura 4 se muestra un perfil realizado hasta una profundidad de 11 m utilizando la sonda multiparamétrica donde se muestran los valores de todas las variables medidas en función de la profundidad. Estos perfiles proporcionan una información importante sobre la existencia de cianobacterias. Cabe destacar que la ficocianina es el indicador de la presencia de cianobacterias, la clorofila-a indica la presencia de algas que no tienen por qué ser cianobacterias y el oxígeno disuelto indica actividad biológica. Analizando estas tres medidas junto con las condiciones meteorológicas se puede inferir la existencia de cianos y su posible Bloom. Es importante mostrar que se observa que existe una termoclina alrededor de los 4 m, lo que permite que la mayoría de las cianobacterias (y otros agentes biológicos) queden confinados entre la superficie y la termoclina, y que se favorezca su crecimiento.

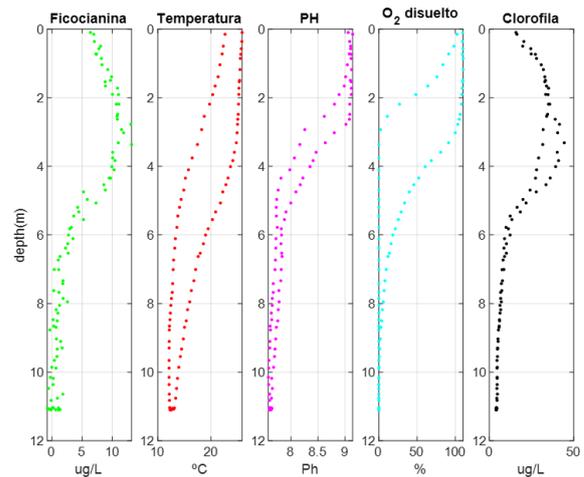


Figura 4: Perfil obtenido por la sonda (bajada a 11 m de profundidad).

3. Metodología para la realización de la monitorización

Como es evidente, no es posible muestrear todo el embalse ya que su superficie es muy grande, por ello es necesario escoger en qué puntos muestrear de modo que se obtenga la mayor información posible del estado del agua. Para decidir qué puntos o zonas son las de mayor interés o proporcionan más información del estado del embalse, se utilizan modelos del embalse contruidos a partir de datos históricos, simulaciones hidrodinámicas, etc., y modelos de evolución de las cianobacterias en base a aportes de nutrientes, condiciones meteorológicas, etc. (Carazo- Barbero et al., 2021, 2023).

Una vez se han determinado los puntos donde medir se pueden enviar al VAS a realizar los perfiles. El VAS dispone, además del control remoto por el operario, dos modos de funcionamiento: semi-autónomo o autónomo. En el funcionamiento semi-autónomo, o asistido, el usuario envía desde el Centro de Control de Tierra (conocido por sus siglas en inglés, Ground Control Station, GCS) al autopiloto del VAS cada uno de los puntos de medida, y éste realiza de forma autónoma el desplazamiento punto a punto (PTP) en línea recta. En el funcionamiento autónomo, el vehículo realiza la misión definida en el plan de vuelo descrito en la GCS, que a grandes rasgos consiste en visitar secuencialmente cada uno de los waypoints especificados, ya sea PTP como en el caso anterior, o mediante una curva de Bézier como se describe en (González-Calvín et al., 2024). En cada uno de los puntos de medida es necesario mantener el VAS en esa posición mientras el subsistema de monitorización se ocupa de completar el perfil con las medidas con la sonda. Para ello, se realiza un control dinámico de la posición del VAS, para que su comportamiento sea similar a estar anclado en el sitio. Una vez terminado el perfil en un punto, se le notifica al controlador que continúe con el plan de vuelo. La Figura 5 muestra dos gráficas donde se representa la posición x e y del VAS a lo largo del tiempo cuando se ha activado el posicionamiento dinámico. En esta figura se observa una línea verde que corresponde con la llegada al punto de medida; a continuación, se activa el control de posición (color azul). Con el fin de mostrar que mantiene la posición adecuadamente, en un instante determinado se desactiva el control de posición (línea de color morado) y se puede observar que el VAS es arrastrado, principalmente por el viento, desviándose de su posición. A los 650 s se activa el

control de posición de nuevo, en ese momento el VAS se mueve para recuperar su posición y al alcanzarla mantiene de nuevo el control de posición (línea de color azul). Dadas las dimensiones del embalse y la distribución de las cianobacterias es suficiente con una precisión en el punto de medida de un radio de unos 3 m.

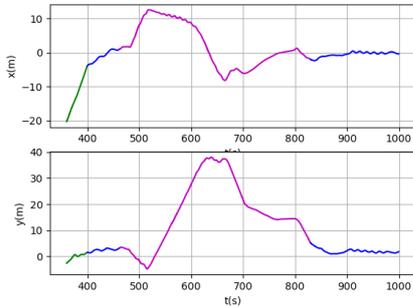


Figura 5: Posición del VAS en Control dinámico de posición.

En cuanto al control del VAS, se basa en la ley de control Guiding Vector Field (GVF), una estrategia eficaz para el seguimiento de trayectorias en robots móviles y vehículos autónomos. Este enfoque se basa en la generación de un campo vectorial en el entorno del camino deseado, de modo que los vectores del campo apuntan tangencialmente a la trayectoria cuando el robot se encuentra sobre ella, y dirigido hacia la misma cuando hay una desviación. Uno de los principales desafíos del enfoque GVF clásico es la presencia de singularidades, puntos donde el campo se anula o se vuelve indefinido, comprometiendo la estabilidad del seguimiento. Este problema ha sido abordado en algunos trabajos previos, como en (Yao et al. 2021), donde se propone una formulación libre de singularidades que extiende el campo guía a dimensiones adicionales, garantizando así la existencia de una ley de control suave con convergencia global.

La metodología utilizada en nuestro VAS es similar a la presentada en (González-Calvín et al., 2024), en la que se emplean curvas de Bézier para representar trayectorias suaves y un controlador angular basado en SF-GVF que garantiza la convergencia a la trayectoria bajo restricciones físicas del vehículo. Esta estrategia de control posibilita tanto el control dinámico de posición, para garantizar el seguimiento continuo de la trayectoria, como el control estático, para estabilizar el vehículo en los puntos de interés. Un ejemplo del campo vectorial creado cuando se encuentra midiendo en un punto programado puede verse en la Figura 6 donde se muestra, en el entorno de la GCS basada en Paparazzi, la trayectoria programada y el campo vectorial dirigido al punto mientras dure la realización del perfil.

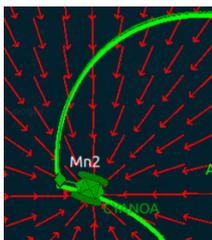


Figura 6: Campo vectorial en la posición del punto de medida.

4. Caso práctico. Monitorización en embalse real

En esta sección se describe el proceso necesario para realizar una jornada de monitorización en el embalse de Guajaraz (Toledo). Es un embalse de agua potable relativamente pequeño con acceso fácil a la orilla en diversas zonas para poder echar al agua el VAS desde el punto de la orilla que sea más adecuado por accesibilidad y cercanía a la zona a mostrar, de modo que no sea necesario navegar a puntos de muestreo demasiado alejados del Centro de Control de Tierra.

Los pasos que se describen son estrictamente necesarios, aunque algunos pueden automatizarse para facilitar su realización. No se detallan en exceso, pero se puede observar que por mucho que se automaticen en muchas ocasiones es imprescindible la intervención humana.

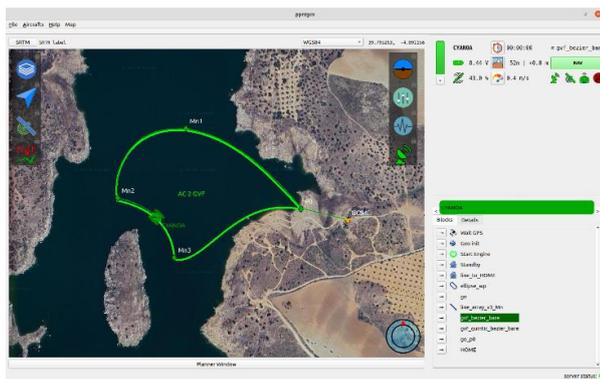
El primer paso es el transporte del VAS al punto del embalse donde acceder al agua. Aquí una mayor automatización podría evitar este paso si se dispone de un punto de atraque donde guardar el VAS, aunque eso conlleva algunos otros inconvenientes y costes como disponer de un lugar seguro, el coste en tiempo y energía del VAS para llegar a los puntos de muestreo, pérdida de la visión de la zona por parte de los operarios para un seguimiento más simple, etc. Una vez en la orilla, es necesario calibrar los sensores de la sonda de ficocianina y clorofila-a (que se basan en sendos emisores laser cada uno a una longitud de onda determinada). Para ello es necesario tomar una muestra de agua, filtrarla y medirla con la sonda, con la finalidad de medir el cero de los sensores en esa agua y descontar el valor de la medida.

Para transportar el VAS se recomienda quitar el lastre no esencial (que suele ser del orden de unos 10 kg) para aligerar su peso y facilitar su manejo. Por tanto, hay que volver a poner el lastre (está etiquetado y se sitúa cada peso en su posición exacta de forma sencilla), meterlo en el agua (necesario 2 personas) y verificar que está correctamente equilibrado.

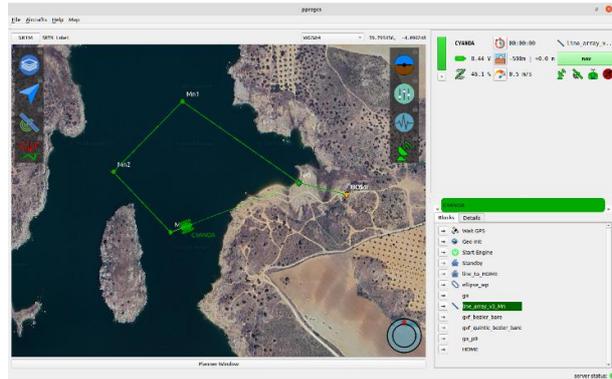
A continuación, se realiza la comprobación de la correcta comunicación entre el VAS y la GCS y la emisora de radio control y ya se puede llevar de forma manual a un punto seguro separado de la orilla (ese punto se establece como HOME).

Por último, se ejecuta la misión o plan de vuelo programado. En la Figura 7, se muestra la trayectoria programada para la realización de la monitorización en tres puntos en modo autónomo en el embalse de Guajaraz, tanto mediante curvas de Bezier (Figura 7a) como PTP (Figura 7b). En estas figuras el punto HOME se ha denominado P0 y se puede ver que está en tierra debido a que las imágenes almacenadas en Google corresponden al embalse cuando tenía menos agua que en la actualidad.

Al finalizar la misión, el VAS vuelve al punto de inicio (HOME); una vez allí se toma control manual para aproximarlo de forma segura a orilla; se saca del agua y se verifica que la misión se ha realizado correctamente.



a) Trayectoria GVF



b) Trayectoria PTP

Figura 7.: Trayectorias planificadas para el muestreo de embalse real.

Una vez se terminada la jornada de monitorización, los operarios recogen el VAS (es conveniente su limpieza si se va a transportar a otros embalses para evitar una contaminación cruzada), y lo guardan en su local. Los operarios deben transmitir, mediante el software disponible en la GCS, los datos de la jornada (datos del recorrido y de las medidas de la sonda) al responsable del embalse para su almacenamiento y procesado.

La realización de la monitorización en los tres puntos mostrados puede variar dependiendo de diferentes factores como el viento, la profundidad a la que se quiera realizar cada perfil, el tipo de recorrido que se haga, la velocidad máxima permitida al VAS, etc. En el ejemplo mostrado, para una velocidad máxima del VAS de 0.6 m/s y bajada de la sonda a una profundidad de 10 m se necesita aproximadamente una hora y veinte minutos de navegación y unas 2 horas para la preparación y recogida del VAS. Esto supone que en una mañana se puede realizar, incluso si se desea aumentar los puntos de muestreo, puesto que el tiempo que invierte en el despliegue y recogida es fijo, y el tiempo de media (depende de la distancia) se puede suponer entre unos 20-30 minutos por punto adicional.

5. Conclusiones

En este artículo se ha mostrado cómo un VAS permite aumentar la frecuencia temporal y espacial de la monitorización del estado de un embalse para conocer mejor el estado del embalse y detectar de forma temprana la aparición de Bloom de cianobacterias. Se ha indicado cual es el proceso necesario para realizar una jornada de monitorización y que aspectos son los más determinantes para su realización, estimando el tiempo necesario para su ejecución.

Actualmente se está trabajando para facilitar el uso del VAS y que pueda ser realizado por operarios sin una especialización alta. De este modo, su despliegue supondrá un menor coste económico y temporal permitiendo su implementación práctica y que pueda usarse con la frecuencia espacial y temporal necesaria.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de los proyectos IA-GES-BLOOM-CM (Y2020/TCS-6420) del programa de Proyectos Sinérgicos de la Comunidad Autónoma de Madrid, el proyecto INSERTION (PID2021-127648OB-C33) de la Agencia Estatal de Investigación y el proyecto CYANO (CPP2021-008579) de la convocatoria de Colaboración Público-Privada.

Referencias

- Bai, X., Li, B., Xu, X. and Xiao Y., 2022. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. *J. Marine. Sci. Appl.* 21, 47–58. DOI: 10.1007/s11804-022-00276-9.
- Barrera C., Padrón I, Luis F., Llinas O. and Marichal G.N., 2021. Trends and Challenges in Unmanned Surface Vehicles (USV): From Survey to Shipping. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 15(1), 135-142. DOI: 10.12716/1001.15.01.13.
- Carazo-Barbero, G., Besada-Portas, E., Girón-Sierra, J. M., Lopez-Orozco, J. A., 2021. EA-based ASV trajectory planner for pollution detection in lentic waters. In *EvoApplications*, 812 – 827. DOI: 10.1007/978-3-030-72699-7_51.
- Carazo-Barbero, G., Besada-Portas, E., Risco-Martin, J., Lopez-Orozco, J. A., 2023. EA-based ASV trajectory planner for detecting cyanobacterial blooms in freshwater. In *The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, 1321-1329. DI: 10.1145/3583131.3590484.
- Ferri, G., Manzi A., Fornai F., Ciuchi F. and Laschi C., 2015. The HydroNet ASV, a Small-Sized Autonomous Catamaran for Real-Time Monitoring of Water Quality: From Design to Missions at Sea. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 40(3), 710-726. DOI: 10.1109/JOE.2014.2359361.
- Fornai F., Ferri, G., Manzi A., Ciuchi F., Bartaloni F. and Laschi C., 2017. An Autonomous Water Monitoring and Sampling System for Small-Sized ASVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 42(1). DOI: 10.1109/JOE.2016.2552818.
- González-Calvin, A., García-Pérez, L. and Jiménez, J.F., 2025. Singularity-Free Guiding Vector Field Over Bézier's Curves Applied to Rovers Path Planning and Path Following. *Journal of Field Robotics*. DOI: 10.1002/rob.22541
- Hitz G., Pomerleau F., Garneau M.E, Pradalier C., Posch T., Pernthaleret J., 2012. Autonomous Inland Water Monitoring: Design and Application of a Surface Vessel. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19(1), 62-72. DOI: 10.1109/MRA.2011.2181771.
- Liu Z., Zhang Y., Yu Z. and Yuan C., 2016. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control* 41, 71-93. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018.
- Yao, W., G. de Marina H., Lin B., and Cao M., 2021. A Singularity-Free Guiding Vector Field for Robot Navigation. *IEEE Transactions on Robotics* 37(4), 1206–1221. DOI: 10.1109/TRO.2020.3043690
- Zhang, M., Li, D., Xiong, J. and He Y., 2023. Multi-dimensional water sampling unmanned surface vehicle development and application. *Int. J. Dynamic. Control* 11, 3188–3208. DOI: 10.1007/s40435-023-01163-z.