

Tecnologías habilitadoras para automatizar la monitorización de blooms de cianobacterias

Besada Portas, E.^{a,*}, Risco-Martín, J.L.^a, Esteban, S.^a, Girón-Sierra, J.M.^a, Pajares, G.^a, López-Orozco, J.A.^a

^aDepartamento de Computadores y Automática. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. Madrid. España

To cite this article: Besada-Portas, E., Risco-Martín, J.L., Esteban, S., Girón-Sierra, J.M., Pajares, G., López-Orozco, J.A. Enabling Technologies for automating cyanobacteria blooms monitoring
XLIV Jornadas de Automática, 6-11. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.006>

Resumen

Los *blooms* de cianobacterias son procesos biológicos dinámicos, peligrosos para los habitantes y usuarios de los recursos hídricos, ya que reducen el oxígeno y el alcance de la luz de las masas del agua, y pueden producir toxinas altamente dañinas. La monitorización y la predicción automática de los *blooms* pueden permitir a las autoridades detectarlos y anticipar la toma de decisiones para mitigar los riesgos que éstos conllevan. El uso de tecnologías como el Modelado & Simulación, los Vehículos Autónomos de Superficie inteligentes, el Internet de las Cosas con computación en el borde, los Gemelos Digitales y la Inteligencia Artificial facilita tanto la monitorización como la predicción y la gestión basada en el conocimiento de la situación real de las masas de agua. Este artículo presenta diferentes avances y proyectos de investigación en estos campos del grupo de Ingeniería de Sistemas, Control, Automatización y Robótica de la Universidad Complutense de Madrid.

Palabras clave: Modelado & Simulation, Vehículos Autónomos de Superficie, Internet de las Cosas, Gemelos Digitales, Inteligencia Artificial.

Enabling technologies to automate cyanobacterial blooms monitoring

Abstract

Cyanobacterial blooms are dynamic biological processes, dangerous for inhabitants and users of water resources, as they reduce the oxygen and light reach in water bodies, and can produce highly harmful toxins. Automatic monitoring and prediction of the blooms can enable authorities to detect them and anticipate their decisions to mitigate the risks that they pose. The use of technologies such as Modeling & Simulation, intelligent Autonomous Surface Vehicles, Internet of Things with edge computing, Digital Twins and Artificial Intelligence facilitates monitoring, prediction and knowledge-based management of the real situation of water bodies. This article presents different advances and research projects in these fields by the Systems Engineering, Control, Automation and Robotics group of the Complutense University of Madrid.

Keywords: Modelling & Simulation, Autonomous Surface Vehicles, Internet of Things, Digital Twins, Artificial Intelligence.

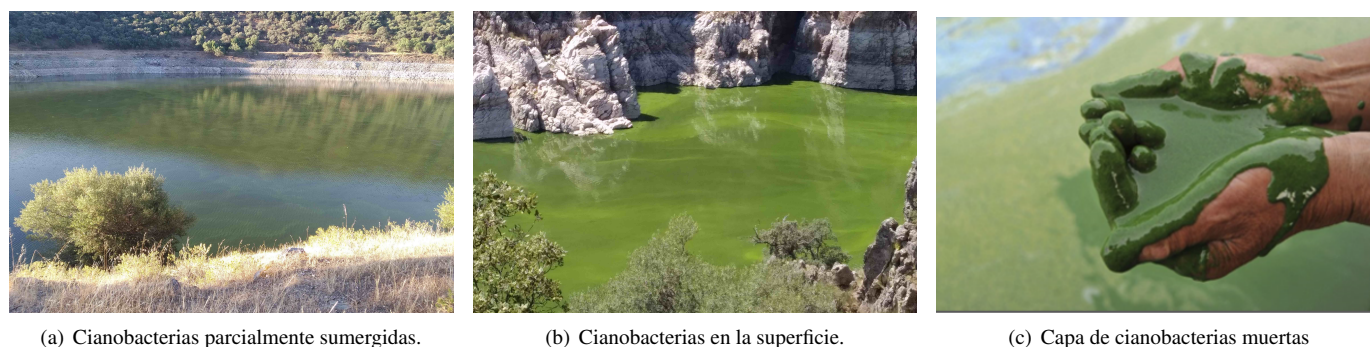
1. Introducción

El agua es un recurso vulnerable, en peligro por numerosas circunstancias, como las inundaciones y sequías extremas, el uso excesivo o incorrecto del recurso hídrico, y la contaminación causada por el vertido de sustancias nocivas o la filtración de fertilizantes provenientes de su entorno. La situación del agua potable es tan delicada en algunas regiones del planeta, que la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Sostenible tiene como sexto objetivo el “garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos” (United Nations Environment Programme, 2023).

Un problema adicional, de origen natural pero acentuado por los altos niveles de eutricación (acumulación excesiva de nutrientes, como nitratos o fosfatos, en las masas de agua) y el incremento de las temperaturas (provocado por el cambio climático), lo constituyen las afloraciones masivas (*blooms* en inglés) de cianobacterias. Dos inconvenientes relevantes para la

*Autor para correspondencia: ebesada@ucm.es


 Figura 1: Imágenes de diferentes masas de agua con un *bloom* de cianobacterias.

supervivencia de la fauna y flora que habita el medio acuático causados por estos *blooms* son: un consumo excesivo del oxígeno de la masa de agua e impedir que la luz penetre hasta la profundidad necesaria debido a las capas de cianobacterias muertas que se acumulan en la superficie del agua. Además, los metabolitos tóxicos secundarios producidas por las cianobacterias (denominados cianotoxinas) constituyen un problema de salud pública relevante para las personas que utilizan el recurso hídrico para su consumo o para realizar actividades recreativas (Meriluoto et al., 2017). Por último, es importante resaltar que estos *blooms* presentan un comportamiento dinámico difícil de predecir correctamente y que se encuentra relacionado, entre otras causas, con su crecimiento biológico, con su competencia con otros organismos, con su capacidad para auto-desplazarse verticalmente en la columna de agua, y con el desplazamiento tridimensional que sufren debido a las corrientes de agua y el viento. A modo de ejemplo, la figura 1 recoge tres imágenes del *bloom* en diferentes situaciones.

La elevada toxicidad de algunas cianobacterias hace conveniente monitorizar las masas de agua potable para determinar la localización y concentración de los *blooms*, y si sus características permiten el consumo o el uso recreativo del agua en el que se encuentran. Tradicionalmente, esto se hace esporádicamente y recogiendo manualmente, desde una embarcación tripulada y en algunos puntos estratégicos de la masa de agua, algunas muestras para su análisis posterior en el laboratorio. Además, en las masas de agua embalsadas para el consumo, se monitorizan una serie de variables de interés en los puntos de captación o en las estaciones de tratamiento, y en el caso de que estas variables superen unos determinados límites, se comprueba la presencia de cianobacterias y cianotoxinas con el análisis en el laboratorio de muestras de agua. Según la normativa actual relacionada con el agua de consumo (United States Environmental Protection Agency, 2021; European Commission, 2021), ambas formas de proceder deben ser mejoradas para que la masa de agua sea monitorizada con una frecuencia mayor y en más localizaciones, de modo que sea posible anticipar la presencia de *blooms* y mejorar la gestión de las aguas en las que aparecen.

Las mejoras sugeridas por la normativa pueden ser alcanzadas automatizando el proceso de monitorización y gestión de los *blooms* a través del uso combinado de diferentes tecnologías o herramientas. Algunas de ellas son las siguientes.

Por una parte, el Modelado y la Simulación (M&S), basados en el uso y resolución de ecuaciones diferenciales (Carazo-

Barbero et al., 2021, 2023) y/o Inteligencia Artificial (Jang et al., 2020), pueden intentar predecir, aunque con bastante incertidumbre, la localización y concentración del *bloom*. Por otra parte, los vehículos autónomos de superficie (ASVs, del inglés Autonomous Surface Vehicles), equipados con sondas multiparamétricas verticalmente desplazables, pueden facilitar la recogida de información relacionada con el *bloom* en numerosas localizaciones de la masa de agua (Girón-Sierra and Chacón-Sombría, 2021; Besada-Portas et al., 2021). El uso combinado de ambos, resulta especialmente útil, ya que los ASVs pueden recoger información para sintonizar los modelos y las simulaciones de éstos últimos pueden ser utilizadas para seleccionar automáticamente las localización de interés a las que desplazar el ASV para realizar medidas con su sonda (Girón-Sierra et al., 2021; González-Calvin et al., 2023).

Asimismo, el Internet de las Cosas (IoT, del inglés Internet of Things) puede proporcionar acceso a los gestores de las masas de agua (ubicados en sus puestos de trabajo habituales) a la información relevante para la toma de decisiones sobre la localización y estado del *bloom* (Estaban et al., 2022). También facilita la gestión de múltiples masas de aguas desde un único punto de acceso. Además, fortalecer el IoT habitual (formado por las capas *things*, *fog* y *cloud*) con una capa adicional de Computación en el Borde (en inglés Edge Computing) puede disminuir el flujo de información entre las capas, al acercar una parte de computo a las “cosas” que generan la información.

Por otro lado, la Inteligencia Artificial (IA) puede ser útil en diferentes partes del sistema para, por ejemplo, analizar las señales e imágenes procedentes de las embarcaciones, optimizar la trayectoria de los ASVs, o para modelar la evolución del *bloom* (como ya se ha mencionado anteriormente). Finalmente, pero no por ello menos importante, utilizar el formalismo DEVS (Discrete Event System Specification, Zeigler et al. (2018)) para construir un gemelo digital (Digital Twin en inglés) del sistema completo (que incluya la infraestructura de IoT, los modelos y simuladores del *bloom*, los ASVs y la algoritmia desarrollada) puede favorecer el desarrollo, el despliegue y la validación progresiva de todos los módulos, elementos y herramientas (Risco-Martín et al., 2023).

Este artículo resume parte de los esfuerzos realizados en estos ámbitos por el grupo de investigación de Ingeniería de Sistemas, Control, Automatización y Robótica (ISCAR) de la Universidad Complutense de Madrid en el marco de varios de sus proyectos de investigación actuales.

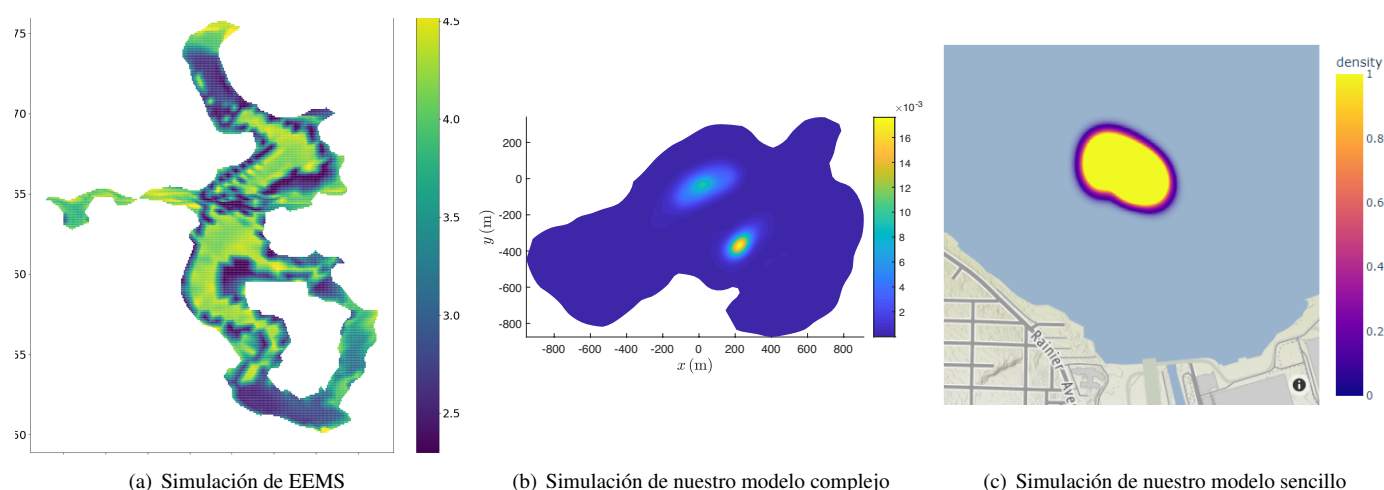


Figura 2: Imágenes de las simulaciones en un instante de tiempo.

2. Tecnologías habilitadoras

Las principales tecnologías habilitadoras utilizadas en los proyectos del grupo ISCAR para abordar de forma integral el problema de la monitorización y gestión de los *blooms* de cianobacterias son las siguientes: M&S, ASVs, IoT con Computación en el Borde, IoT, Gemelos Digitales con DEVS, y AI.

A continuación se presentan ejemplos de uso de cada una de ellas dentro del sistema que está desarrollando ISCAR, sin hacer un análisis exhaustivo de la literatura relacionada con el tema. Información adicional de cada ejemplo puede encontrarse en las referencias aportadas.

2.1. Modelado y simulación del bloom

El M&S de la evolución de la distribución espacio-temporal de los *blooms* dentro de una masa de agua es útil para predecir su situación, siempre y cuando las condiciones iniciales, las condiciones de contorno, y los parámetros y ecuaciones del modelo fuesen correctos/suficientes para reproducir el comportamiento real del *bloom*. La complejidad de este comportamiento reduce la validez de los modelos actuales y hace que en los proyectos se consideren tres tipos diferentes.

Por una parte, la herramienta comercial de modelado y simulación EEMS permite definir en tres dimensiones los comportamientos hidrodinámicos, de sedimentación, de contaminación por diferentes sustancias (incluidas las cianobacterias) y de eutroficación de un sistema acuático. A pesar de su gran versatilidad, no contempla el movimiento vertical propio de las cianobacterias, el modelo depende de la correcta sintonización de muchas variables para que sus predicciones sean fiables, y las simulaciones son computacionalmente muy costosas. No obstante, se utiliza en los proyectos de ISCAR para generar datos sintéticos para pre-entrenar los modelos más sencillos (Herguedas-Pinedo et al., 2023), alimentar al gemelo digital del sistema (Risco-Martín et al., 2023), y optimizar las trayectorias del ASV (González-Calvin et al., 2023).

Por otra parte, el simulador propio presentado en Carazo-Barbero et al. (2023) obtiene el comportamiento tridimensional del *bloom* a partir de la simulación de un conjunto de partículas que se desplazan de acuerdo con los resultados obtenidos con

COMSOL de la hidrodinámica del sistema, con un modelo diferencial que contempla el desplazamiento vertical propio del *bloom* y con otro modelo estocástico sencillo de su crecimiento. Tiene un número de parámetros y un coste computacional mucho menor que EMSS, y puede ser fácilmente adaptado para incluir otros comportamientos en un futuro. Actualmente, es usado para predecir el comportamiento global del *bloom* y determinar la trayectoria del ASV.

Alternativamente, a medio camino, el modelo propio de Herguedas-Pinedo et al. (2023) utiliza los resultados de EMSS para obtener la información de algunas variables de interés (p.e. nitratos, oxígeno disuelto y velocidad del agua) y ecuaciones en diferencias de primer orden para modelar el alcance del *bloom* y su desplazamiento en la superficie de la masa de agua. Debido a su sencillez, es el modelo utilizado actualmente en la infraestructura de IoT, para demostrar la utilidad de un modelo predictivo del *bloom* en las diferentes capas de IoT.

Finalmente, indicar que en los mapas de colores de la figura 2 se presenta la concentración de cianobacterias predichas por los diferentes modelos en un instante determinado y en la superficie de diferentes masas de agua (aunque las simulaciones de EEMS y del modelo complejo propio son tridimensionales)

2.2. Vehículos autónomos de superficie inteligentes

La falta de precisión de los modelos puede paliarse validando sus resultados mediante la monitorización de la masa de agua. El comportamiento dinámico del *bloom* hace necesario obtener medidas en numerosos puntos de la masa de agua, no solo en la superficie - como podría hacerse mediante imágenes de satélite (Sayers et al., 2016)-, si no también en profundidad. Un ASV equipado con una sonda multi-paramétrica desplazable verticalmente resulta ideal en este caso, ya que puede desplazarse y situar la sonda en las posiciones 3D deseadas.

Por ese motivo, ISCAR ha construido diferentes prototipos de ASV para monitorizar *blooms*. El de la figura 3 es un catamarán propulsado por dos hélices motorizadas, con una sonda sujeta por una grúa. Además, dispone de un sistema de localización formado por un GPS y una unidad inercial, que permite saber la posición del ASV. Otros ASVs construidos por ISCAR

para este fin pueden verse en Girón-Sierra et al. (2021) y Girón-Sierra and Chacón-Sombría (2021).



Figura 3: Imagen de uno de los ASV de ISCAR

Nuestros ASVs llevan a bordo un sistema de control, desplegado sobre un procesador digital STM32 Nucleo-64 con entradas y salidas convenientes, y programado ad-hoc o utilizando la funcionalidad proporcionada por Paparazzi. El comportamiento inteligente del ASV se logra actualmente de dos formas diferentes: 1) pre-planificando las trayectorias del ASV teniendo en cuenta las predicciones de las simulaciones y 2) controlando reactivamente el ASV en función de las medidas proporcionadas por la sonda.

Así, en Carazo-Barbero et al. (2023) se presenta un planificador que optimiza simultáneamente la trayectoria del ASV y el desplazamiento vertical de la sonda, maximizando la concentración de cianobacterias que observaría la sonda durante el desplazamiento según la predicción del modelo propio complejo, y minimizando la longitud de la trayectoria del ASV y el tiempo de la misión. Por otra parte, González-Calvin et al. (2023) presentan un planificador que optimiza, en base a objetivos análogos al caso anterior, únicamente la trayectoria del ASV, al pre-definir el comportamiento de la sonda, que se mantiene a profundidad constante mientras el ASV se desplaza y hace un perfil en profundidad en los puntos de la trayectoria donde el ASV debe detenerse.

Además, en Besada-Portas et al. (2021) se propone un sistema de guiado, navegación y control para localizar zonas de contaminación extrema o curvas de contaminación constante, en el que el sistema de guiado propone como localizaciones a las que enviar el ASV para realizar las medidas, los puntos de evaluación sugeridas por algoritmos de optimización y de seguimiento de contornos clásicos, suponiendo que la función

objetivo en dichos puntos toma el valor de la medida de la sonda en las localizaciones finalmente alcanzadas por el ASV.

Finalmente, indicar que en la figura 4 se esquematizan las diferencias entre las trayectorias de ambos planificadores y la trayectoria seguida por el ASV al intentar localizar reactivamente una curva de concentración constante.

2.3. Internet de las cosas y computación en el borde

Los modelos y los ASVs inteligentes facilitan la monitorización y predicción del *bloom*, pero no ponen directamente a disposición de los agentes responsables de gestionar las masas de agua la información que éstos necesitan para la toma de decisiones. Para resolver este problema, ISCAR propone utilizar una infraestructura de IoT como la de la izquierda de la figura 5, en la que además de las capas habituales de *things*, *fog* y *cloud* aparece la capa *edge* con el propósito de acercar, en la medida de lo posible, la computación a las “cosas”.

Más concretamente, en la capa *thing* se sitúan los ASVs y diferentes sensores relacionados con la monitorización de la masa de agua. La capa *edge* cuenta con los elementos de computo (p.e. los procesadores digitales STM32 Nucleo-64 y Jetson Nano) conectados directamente a las *things* (el primero, para cerrar los lazos de control del ASV, el segundo para procesar las imágenes proporcionadas por diferentes cámaras). La capa *fog* incluye el centro de control de tierra (GCS, del inglés Ground Control Station) de las embarcaciones y cualquier otro elemento de cómputo que se encuentre cerca de la masa de agua (p.e. para planificar o analizar los datos localmente). En la capa *cloud* están las herramientas utilizadas por los gestores y los elementos de aprendizaje (o reajuste automático) de los parámetros de los modelos del *bloom*. Finalmente, es importante resaltar que la parte de la infraestructura situada por debajo de la capa *cloud* puede replicarse para tantas masas de agua como se desee, lo que hace que el sistema pueda ser usado para monitorizar y gestionar múltiples masas de agua.

2.4. Uso de DEVS y gemelos digitales en todo el sistema

La complejidad del sistema completo es bastante elevada al estar formada por una infraestructura de IoT, a la que se conectan sensores y ASVs, y sobre la que se distribuye la computación de diferentes módulos. Para poder validar su funcionamiento de forma progresiva se ha decidido utilizar DEVS (Discrete Event System Specification, Zeigler et al. (2018)) para interconectar todos los elementos e implementar la mayor parte

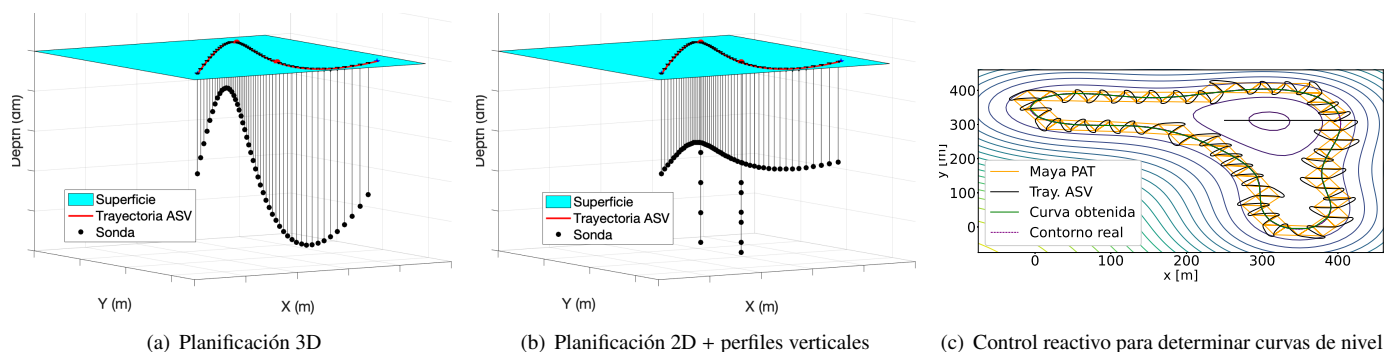


Figura 4: Imágenes relacionadas con los planificadores y el sistema reactivo de guiado, navegación y control.

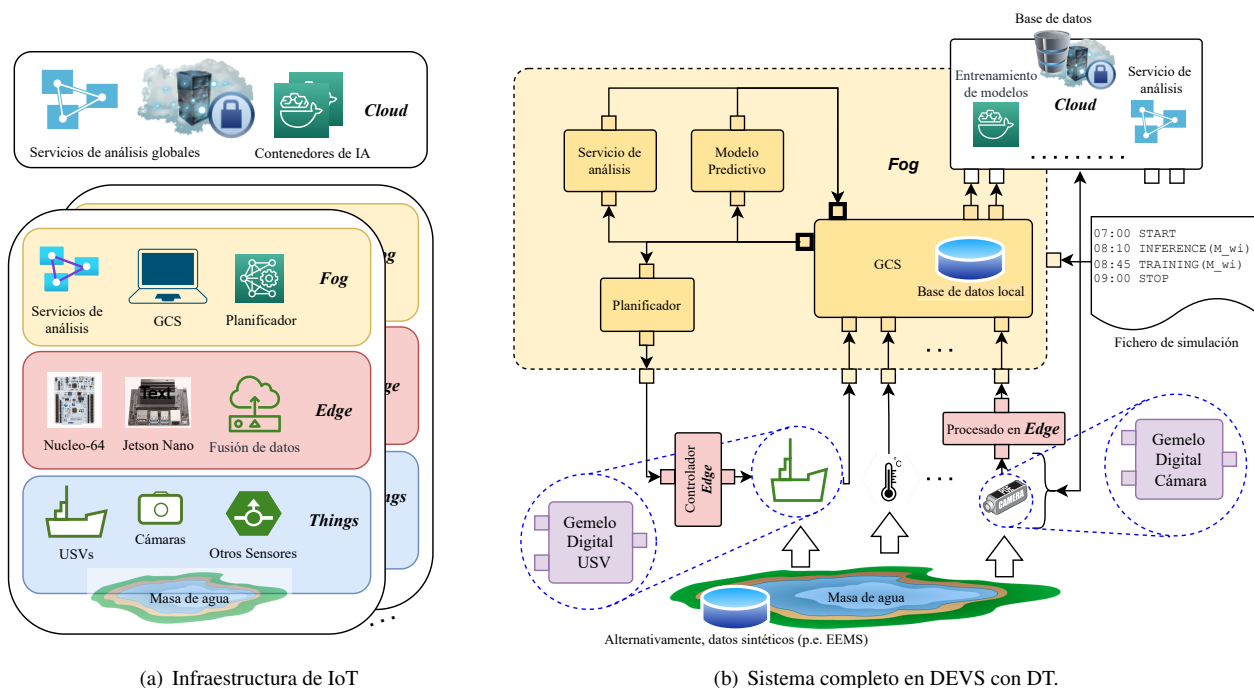


Figura 5: Información esquemática de la infraestructura de IoT y del sistema completo en DEVS con DT.

de la algoritmia debido a sus cualidades: 1) proporciona un marco robusto, estructurable jerárquicamente, de M&S de eventos discretos para sistemas complejos; 2) permite definir explícitamente la estructura y el comportamiento de los modelos (o subsistemas en algunos casos como el nuestro); 3) separa rigurosamente el modelo de su simulación (o ejecución de los subsistemas); y 4) es un formalismo de M&S que facilita la verificabilidad, extensibilidad y mantenimiento de los sistemas que lo utilizan. En particular, nuestro sistema se modela con la rama Python de xDEVS (Risco-Martín et al., 2017), ya que permite: 1) la ejecución de simulaciones secuenciales o paralelas con un buen rendimiento en diferentes plataformas, y 2) la conexión e intercambio de información con sistemas físicos reales, llamados “cosas” en la sección anterior.

Estas características son útiles en nuestro caso, para estructurar el sistema en los módulos necesarios (denominados modelos atómicos y acoplados en DEVS) de forma jerárquica, ir añadiendo o modificando la funcionalidad de los mismos de forma progresiva, y tener un sistema que soporta tanto la conexión con sistemas reales como con sus equivalentes simulados. Estos últimos, hacen que el sistema completo pueda interactuar con gemelos digitales de los sistemas físicos, con los sistemas físicos, o con grupos de ambos. Esta posibilidad se ilustra a la derecha de la figura 5, en la que también se muestra un resumen conceptual de la estructura DEVS general de nuestro sistema.

Detalles adicionales y la situación actual del sistema pueden encontrarse en Risco-Martín et al. (2023). Además, Ferrero-Losada et al. (2023) reflejan como convertir uno de los subsistemas desarrollados (concretamente, el de guiado, navegación y control presentado en Besada-Portas et al. (2021)) a DEVS, labor que hay que realizar finalmente con todos los modelos y subsistemas que se programan inicialmente fuera de DEVS.

2.5. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial se está utilizando en diferentes partes del sistema completo.

Por ejemplo, la optimización de los planificadores descritos en la sección 2.2 se realiza con algoritmos genéticos, y actualmente, se está explorando la posibilidad de utilizar procesos gaussianos para fusionar las predicciones de los modelos y las medidas de la sonda, y determinar cuáles son las localizaciones más adecuadas para realizar las medidas sucesivas del ASV.

Asimismo, las imágenes de las cámaras embarcadas en el ASV se procesan con una red de detección profunda para localizar obstáculos en la masa agua, mientras que las imágenes de las cámaras situadas en puntos estratégicos de la orilla se procesan con redes de segmentación profundas para detectar las regiones de la superficie de la masa de agua donde se observa el *bloom*. Además, debido al número limitado de imágenes disponibles de este tipo de las masas de agua objeto de estudio en este proyecto, el aprendizaje profundo también se utiliza para generar imágenes sintéticas con las que entrenar las redes de segmentación (Barrientos-Espillo et al., 2023). Finalmente, en el ámbito del procesamiento de imágenes, se están desarrollando técnicas de explicabilidad del funcionamiento de las redes utilizadas Lopez-Gonzalez et al. (2023).

3. Proyectos de Investigación

La tabla 1 muestra, en la primera columna, los proyectos de investigación de ISCAR en los que se están desarrollando los diferentes elementos que se han presentado en la sección 2, en la segunda, el periodo de ejecución de cada proyecto, y en las restantes, los elementos en los que se focaliza cada proyecto.

Además, en el proyecto de investigación INSERTION (PID2021-127648OB-C33) ISCAR está utilizando el proble-

Tabla 1: Relación entre los proyectos de ISCAR y las tecnologías en las que se focalizan

| Proyecto | Periodo | M&S del <i>bloom</i> | ASVs inteligentes | IoT | Computación en el borde | Gemelos Digitales | IA |
|------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|-----|-------------------------|-------------------|----|
| IA-GES-BLOOM-CM (Y2020/TCS-64020) | 07/2021-06/2024 | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| SMART-BLOOMS (TED2021-130123B-100) | 12/2022-11/2024 | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

ma de las cianobacterias para desarrollar estrategias de cooperación de ASVs y vehículos autónomos aéreos, mientras que en el proyecto de colaboración público-privado CYANO (CPP2021008579) desarrolla un nuevo prototipo de ASV para digitalizar el proceso de gestión de la calidad y depuración de las aguas de consumo en las que aparecen cianobacterias.

4. Conclusiones

El artículo muestra, mediante diferentes desarrollos del grupo ISCAR, cómo automatizar el proceso de monitorización y gestión de *blooms* de cianobacterias mediante el uso de técnicas de M&S, de ASVs inteligentes, de infraestructuras de IoT con una capa de computación en el borde, de DEVS, de Gemelos Digitales y de técnicas de IA.

Los proyectos mencionados están en su periodo de ejecución, por lo que se espera introducir mejoras en los diferentes elementos. Por ejemplo, desarrollando un simulador propio del modelo hidrodinámico, o nuevos planificadores y controladores reactivos para ASVs cooperantes; incorporando los diferentes elementos en el gemelo digital o la infraestructura de IoT; o utilizando modelos de IA para predecir la evolución del *bloom*.

Agradecimientos

Estos trabajos están siendo realizados gracias al apoyo de los proyectos IA-GES-BLOOM-CM (Y2020/TCS-6420) del programa de Proyectos Sinérgicos de la Comunidad Autónoma de Madrid, y SMART-BLOOMS (TED2021-130123B-I00) de los programas MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y Next-GenerationEU/PRTR.

Referencias

Barrientos-Espillo, F., Gascó, E., López-González, C. I., Gómez-Silva, M. J., Pajares, G., 2023. Semantic segmentation based on deep learning for the detection of cyanobacterial harmful algal blooms (CyanoHABs) using synthetic images. *Applied Soft Computing* 141.

Besada-Portas, E., Girón-Sierra, J. M., Jiménez, J., Lopez-Orozco, J. A., 2021. Data-driven exploration of lentic water bodies with asvs guided by gradient-free optimization/contour detection algorithms. In: *Winter Simulation Conference (WinterSim)*.

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* 2021.

Carazo-Barbero, G., Besada-Portas, E., Risco-Martín, 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)*.

COMSOL, 2023. COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.com>, accessed 5th Abril 2023.

EEMS, 2023. EE Modeling System webpage. <https://www.eemodelingsystem.com>, accessed 5th Abril 2023.

Estaban, S., Chacón, J., Risco-Martín, J., Carazo-Barbero, G., Besada-Portas, E., 2022. Development of an eiot framework using devts: Cyanobacterial bloom alert and management system. In: *XLIII Jornadas de Automática*.

European Commission, 2021. European Commission drinking water directive. <https://www.europeandrinkingwater.eu/initiative/dwd-2021/>, Accedido 23 Mayo 2023.

Ferrero-Losada, S., Besada-Portas, E., Risco-Martín, J. L., López-Orozco, J., 2023. DEVS-based modeling and simulation of data-driven exploration algorithms of lentic water bodies with an ASV. In: *Annual Modelling and Simulation Conference (ANNSIM)*.

Girón-Sierra, J. M., Besada-Portas, E., Carazo-Barbero, G., Jimenez-Castellanos, J. F., Risco-Martín, J. L., Lopez-Orozco, J. A., 2021. Intelligent asvs to explore water bodies and support habs detection, prediction and early warning. In: *International Conference on Harmful Algae (ICHA)*.

Girón-Sierra, J. M., Chacón-Sombria, J., 2021. Application of teams of USVs for cyanobacteria monitoring: Initial steps. In: *IFAC Conf. on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS)*. pp. 812–827.

González-Calvin, A., García-Perez, L., Risco-Martín, J., Besada-Portas, E., 2023. Simulation, optimization and control of trajectories of ASVs performing HACBS monitoring missions in lentic waters. In: *Winter Simulation Conference (WinterSim)*.

Herguedas-Pinedo, B., Risco-Martín, J., Estaban, S., López-Orozco, J. A., Besada-Portas, E., 2023. Predictive modeling and simulation system for the management of harmful cyanobacteria blooms. In: *Annual Modelling and Simulation Conference (ANNSIM)*.

Jang, M., Seo, D., Kim, J., Kim, J., 2020. Spatiotemporal algal bloom prediction of geum river, korea using the deep learning models in company with the efdc model. In: *Proceedings of the 2020 Summer Simulation Conference (SummerSim)*.

Lopez-Gonzalez, C., Gomez-Silva, M., Besada-Portas, E., Pajares, G., 2023. Explaining how pseudomultiband images improve semantic segmentation for unet in outdoor agricultural environments. In: *VI Congreso de Jóvenes Investigadores de la Real Sociedad Matemática Española*.

Meriluoto, J., Spoof, L., Codd, G., 2017. *Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis*. Wiley.

Paparazzi, 2023. Paparazzi github repository. <https://github.com/paparazzi>, accessed 5th Abril 2023.

Risco-Martín, J. L., Estaban, S., Chacón, J., Carazo-Barbero, G., Besada-Portas, E., López-Orozco, J. A., 2023. Simulation-driven engineering for the management of harmful algal and cyanobacterial blooms. *Simulation - Transactions of the Society for Modelling and Simulation International*.

Risco-Martín, J. L., Mittal, S., Fabero-Jiménez, J. C., Zapater, M., Hermida-Correa, R., 2017. Reconsidering the performance of devts modeling and simulation environments using the devstone benchmark. *SIMULATION* 93 (6), 459–476.

Sayers, M., Fahnenstiel, G. L., Shuchman, R. A., Whitley, M., 2016. Cyanobacteria blooms in three eutrophic basins of the great lakes: a comparative analysis using satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 37 (17), 4148–4171.

United Nations Environment Programme, 2023. GOAL 6: Clean water and sanitation. <https://www.unep.org/explore-topics/sustainable-development-goals/why-do-sustainable-development-goals-matter/goal-6>, Accedido 23 Mayo 2023.

United States Environmental Protection Agency, 2021. Drinking water requirements for states and public water systems. <https://www.epa.gov/dwreginfo/drinking-water-regulations>, Accedido 23 Mayo 2023.

Zeigler, B. P., Muzy, A., Kofman, E., 2018. *Theory of modeling and simulation: discrete event & iterative system computational foundations*. Academic press.