

Jornadas de Automática

Control de profundidad para sistema dual perfilador-muestreador para la toma de muestras de agua a cotas predefinidas

Isabel P. Morales-Aragón^{a*}, Ana Abenza Alonso^a, Javier Gilabert^b, Roque Torres-Sánchez^a, Óscar de Francisco Ortiz^c,
Fulgencio Soto-Valles^a

^a Dpto. de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Dr. Fleming, s/n, 30202 Murcia, España.

^b Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, 30202 Murcia, España.

^c Dpto. de Ingeniería Mecánica, Materiales y Fabricación, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Dr. Fleming, s/n, 30202 Murcia, España.

To cite this article: Morales-Aragón, I. P., Abenza Alonso, A., Gilabert, J., Torres-Sánchez, R., de Francisco Ortiz, O., Soto-Valles, F. 2026. Depth Control for a Dual Profiler-Sampler System for Water Collection at Predefined Depths. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13675>

Resumen

La degradación ambiental del Mar Menor ha impulsado el desarrollo de plataformas autónomas para la monitorización continua de ecosistemas marinos someros. Durante eventos críticos o situaciones en las que no es posible realizar campañas manuales, resulta necesario disponer de sistemas capaces de obtener muestras de agua de forma autónoma para su posterior análisis en laboratorio. En este trabajo se presenta la integración de un sistema automático de recolección de agua en un perfilador autónomo. El principal objetivo es validar la capacidad del perfilador para mantener una profundidad estable durante el proceso de recolección. Para ello, se implementó una estrategia de control en cascada basada en controladores PID y un sistema de flotabilidad variable. Los ensayos experimentales demostraron que el sistema integrado es capaz de mantener diferentes profundidades de consigna durante periodos de 60 y 120 segundos, obteniendo errores generalmente inferiores a ± 10 cm, validando la viabilidad de la plataforma para aplicaciones de monitorización y recolección autónoma de agua.

Palabras clave: Navegación, guiado y control de sistemas marinos, Vehículos submarinos autónomos, Sensores y actuadores, Control PID, Control en tiempo real de sistemas ambientales

Depth Control for a Dual Profiler-Sampler System for Water Sampling at Predefined Depths

Abstract

The environmental degradation of the Mar Menor has promoted the development of autonomous platforms for the continuous monitoring of shallow marine ecosystems. During critical events or situations in which manual sampling campaigns cannot be carried out, autonomous systems capable of collecting water samples for subsequent laboratory analysis are required. This work presents the integration of an automatic water collection system into an autonomous profiler. The main objective is to validate the profiler's ability to maintain a stable depth during the water collection process. For this purpose, a cascaded control strategy based on PID controllers and a variable ballast system was implemented. Experimental tests demonstrated that the integrated system is able to maintain different depth setpoints for periods of 60 and 120 seconds, obtaining depth errors generally below ± 10 cm, validating the feasibility of the platform for autonomous monitoring and water collection applications.

Keywords: Marine system navigation, guidance and control, Autonomous underwater vehicles, Sensors and actuators, PID control, Real time control of environmental systems

1. Introducción

La degradación ambiental del Mar Menor se ha convertido en uno de los mayores desafíos ecológicos del litoral mediterráneo europeo. Este ecosistema, único por su elevado valor ecológico y socioeconómico, ha sufrido durante las últimas décadas un progresivo deterioro asociado principalmente al aporte masivo de nutrientes procedentes de actividades agrícolas y urbanas. La acumulación de nitratos y materia orgánica ha favorecido procesos de eutrofización, episodios de hipoxia y mortandades masivas de fauna marina (Pérez-Ruzafa et al., 2019). Asimismo, eventos meteorológicos extremos como las DANas, incrementan de forma abrupta la escorrentía y el transporte de contaminantes hacia la laguna (García-Ayllon & Radke, 2021).

Ante esta problemática, la monitorización continua del estado del Mar Menor se ha convertido en una necesidad prioritaria para comprender la evolución de sus parámetros fisicoquímicos y anticipar situaciones críticas. En este contexto, se han desarrollado nuevas plataformas autónomas de observación marina, entre las que destacan el perfilador s-Nautilus (Morales-Aragón et al., 2024) y el perfilador MAREA, desarrollado como una evolución del anterior e incorporando nuevas funcionalidades, ambos diseñados específicamente para la monitorización de aguas someras. Estas plataformas autónomas son capaces de registrar de manera periódica parámetros fundamentales como oxígeno disuelto, clorofila, conductividad eléctrica o temperatura, proporcionando información en tiempo real sobre el estado de la columna de agua y permitiendo detectar situaciones anómalas o de riesgo ambiental.

Sin embargo, aunque los sensores in situ permiten una vigilancia continua y de alta frecuencia temporal, existen determinados compuestos cuya cuantificación precisa requiere necesariamente el análisis de muestras en laboratorio. Es el caso, entre otros, de los nitratos y otros nutrientes disueltos, cuya medición mediante sensores in situ presenta todavía limitaciones técnicas o económicas. Además, durante episodios excepcionales, como lluvias torrenciales o DANas, en los que las condiciones ambientales dificultan o impiden la realización de campañas de muestreo manual, así como ante la detección de concentraciones atípicas en los parámetros monitorizados, resulta especialmente importante disponer de muestras físicas de agua que permitan realizar análisis químicos detallados y caracterizar con mayor precisión el estado real del ecosistema.

Con el objetivo de responder a esta necesidad, se ha desarrollado un sistema autónomo de muestreo de agua diseñado para la recogida automática de muestras en entornos marinos y ecosistemas costeros someros (Abenza Alonso et al., 2025). Este dispositivo automatizado permite la recogida secuencial de muestras a distintas profundidades sin intervención humana, integrando sistemas mecánicos, electrónicos y de control en una plataforma compacta y de bajo coste. El sistema incorpora varias jeringas accionadas mediante motores paso a paso y sensores de profundidad, permitiendo realizar campañas de muestreo programadas de manera autónoma y reproducible.

En este trabajo se propone la integración conjunta del perfilador MAREA y del nuevo sistema de muestreo automático, combinando la capacidad de monitorización continua del perfilador con la obtención física de muestras para análisis posteriores en laboratorio. Esta sinergia permitiría activar procesos de muestreo ante la detección automática de situaciones de alerta ambiental, proporcionando una caracterización más completa de la dinámica fisicoquímica del Mar Menor.

No obstante, la integración del sistema de muestreo en el perfilador plantea un importante reto relacionado con el control de profundidad y la estabilidad del vehículo durante las operaciones de toma de muestras. El muestreador requiere aproximadamente 50 segundos para completar la recogida de una muestra, por lo que el perfilador debe ser capaz de alcanzar y mantener de forma estable una profundidad determinada durante, al menos, dicho intervalo temporal. En este contexto, el presente estudio se centra en validar la capacidad del perfilador MAREA para realizar un control preciso de profundidad mientras transporta el muestreador integrado, garantizando la estabilidad necesaria para efectuar la toma de muestras en condiciones reales de operación.

2. Metodología

2.1. Perfilador MAREA

El sistema MAREA (Figura 1) es un perfilador submarino autónomo diseñado para la monitorización continua de entornos marinos someros. Su arquitectura permite realizar perfiles verticales de la columna de agua de manera automática, registrando parámetros fisicoquímicos relevantes como oxígeno disuelto, clorofila, temperatura, conductividad eléctrica, salinidad, ficoeritrina, materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) o turbidez mediante sensores comerciales integrados. El dispositivo dispone de un sistema de flotabilidad variable basado en tanques de lastre, lo que le permite modificar su profundidad de operación de forma autónoma. Incorpora dos tanques de lastre de 750 cm³ cada uno con los cuales debe ser capaz de lograr el movimiento vertical del dispositivo completo.



Figura 1. Estructura interna y externa del perfilador MAREA empleado en el estudio.

Además, incorpora sistemas de comunicación inalámbrica y almacenamiento local de datos, permitiendo la transmisión periódica de información en tiempo real.

El perfilador MAREA presenta una configuración vertical con una altura aproximada de 1 m, un diámetro máximo de 0,315 m y un peso de 15,1 kg.

2.2. Muestreador

El sistema de muestreo desarrollado consiste en un dispositivo automatizado diseñado para la recogida autónoma de muestras de agua a diferentes profundidades. El sistema está compuesto por cuatro jeringas de 60 mL dispuestas radialmente y accionadas mediante un mecanismo de transmisión por husillo y un sistema selector basado en leva y seguidor. Esta configuración permite realizar la toma secuencial de muestras sin intervención humana.

El control del sistema se realiza mediante electrónica de código abierto basada en un microcontrolador Arduino, integrando sensores de presión y profundidad, así como un módulo de comunicación Wi-Fi para la configuración y supervisión del dispositivo. Además, gran parte de la estructura mecánica ha sido fabricada mediante impresión 3D, permitiendo reducir costes de fabricación y facilitar la integración mecánica con otras plataformas submarinas.

El sistema requiere aproximadamente 50 segundos para completar la recogida de una muestra, tiempo durante el cual es necesario mantener la estabilidad del muestreador a una profundidad determinada para garantizar la correcta captación del agua.

El muestreador presenta una disposición vertical con una altura aproximada de 0,59 m, un diámetro máximo de 0,117 m y un peso de 7,5 kg (Figura 2).



Figura 2. Estructura interna y externa del muestreador empleado en el estudio.

2.3. Integración del muestreador en el perfilador MAREA

Con el objetivo de combinar monitorización continua y recogida física de muestras, el sistema de muestreo fue integrado en la estructura del perfilador MAREA. El ensamblaje se diseñó considerando criterios de estabilidad y distribución de masas, minimizando el impacto del nuevo

sistema sobre la flotabilidad y dinámica vertical del perfilador.

La integración requirió adaptar la estructura portante del perfilador MAREA para alojar el muestreador.

El sistema final (Figura 3) permite que el perfilador realice perfiles verticales de la columna de agua y, simultáneamente, pueda detenerse a profundidades concretas para ejecutar la toma automática de muestras destinadas a análisis posteriores en laboratorio.



Figura 3. Integración final del sistema dual compuesto por el perfilador autónomo MAREA y el sistema automático de recolección de agua utilizado durante los ensayos experimentales.

El peso total del sistema integrado es de 31,7 kg, considerando el peso del perfilador (15,1 kg), el muestreador (7,5 kg), el soporte del sistema (4,6 kg) y el lastre adicional incorporado para ajustar la flotabilidad del sistema y permitir el correcto control del desplazamiento vertical en la columna de agua (4,5 kg).

2.4. Algoritmo de control de la profundidad

El control de profundidad del sistema integrado se implementó utilizando la misma estrategia de control desarrollada previamente para el perfilador μ -Nautilus (Morales-Aragón et al., 2025). El algoritmo empleado se basa en un sistema de control en cascada aplicado sobre un sistema de flotabilidad variable (VBS), encargado de regular la profundidad mediante el accionamiento de los tanques de lastre (Figura 4).

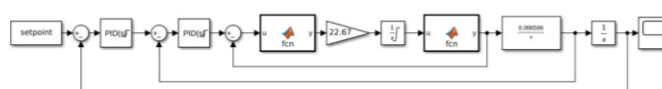


Figura 4. Algoritmo de control empleado para el control de la profundidad del sistema dual perfilador-muestreador.

La arquitectura de control está compuesta por tres lazos jerárquicos. El lazo interno controla la posición del pistón responsable del llenado y vaciado de los tanques de lastre, el lazo intermedio regula la velocidad vertical del perfilador y el lazo externo controla la profundidad del sistema. Los controladores de velocidad y profundidad se implementaron mediante controladores PID con mecanismos anti-windup y

limitación de salida, permitiendo adaptar la respuesta dinámica del perfilador a las condiciones reales de operación.

A diferencia de la configuración utilizada en el perfilador μ -Nautilus, el sistema desarrollado en este trabajo dispone de dos tanques de lastre. Sin embargo, durante la operación normal el control de profundidad se realiza utilizando únicamente uno de ellos, mientras que el segundo tanque queda reservado para situaciones específicas, como variaciones de peso provocadas por biofouling o posibles atascos del pie del perfilador en el fondo debido a la acumulación de fango. Además, con el objetivo de distribuir el desgaste mecánico y evitar el uso continuado del mismo actuador, se implementó una estrategia de alternancia automática, de forma que en cada ciclo de operación se utiliza el tanque opuesto al empleado en el ciclo anterior.

Asimismo, a diferencia del control implementado en el perfilador μ -Nautilus, en esta nueva configuración no fue necesario limitar el recorrido del pistón para reducir las sobreoscilaciones. Esto se debe a que la relación entre el volumen de actuación del sistema de flotabilidad y el peso total del dispositivo requiere utilizar la capacidad completa de los tanques para garantizar un ascenso y descenso adecuados del perfilador.

El objetivo principal del controlador consiste en garantizar que el sistema integrado sea capaz de alcanzar y mantener de forma estable una profundidad determinada durante el tiempo necesario para completar el proceso de recolección de agua, minimizando oscilaciones y errores en régimen estacionario.

2.5. Ensayos experimentales en entorno controlado en el mar

Los ensayos experimentales se realizaron en las instalaciones del Real Club de Regatas de Cartagena (Figura 5), seleccionadas por tratarse de un entorno controlado con condiciones adecuadas para validar el comportamiento dinámico del sistema integrado.

Durante las pruebas, el perfilador fue programado para realizar maniobras de control de profundidad desde el fondo hasta la superficie, estableciendo consignas intermedias a 3,1, 2,1 y 1,1 m, de acuerdo con la profundidad máxima disponible en la zona de ensayo, aproximadamente 4 m. En cada nivel, el sistema debía alcanzar la profundidad objetivo y permanecer estable durante intervalos temporales prefijados.

Se realizaron dos tipos de ensayos. En una primera fase, el perfilador permaneció estabilizado durante 60 segundos en cada profundidad objetivo, evaluándose la capacidad del controlador para mantener la estabilidad vertical durante un tiempo superior al requerido para completar una toma de muestra. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos más exigentes incrementando el tiempo de estabilización hasta 120 segundos, con el objetivo de analizar la robustez del sistema frente a perturbaciones y deriva temporal. En estos ensayos se marcó como estable siempre y cuando el error de profundidad fuese ± 15 cm y la velocidad del perfilador fuese inferior o igual a ± 7 cm/s.

Durante los experimentos se registraron variables como profundidad, error de control y tiempo de estabilización,

permitiendo evaluar el comportamiento del sistema y validar la viabilidad de la integración entre el perfilador MAREA y el sistema automático de muestreo.



Figura 5. Entorno experimental utilizado para la realización de los ensayos de control de profundidad del sistema integrado en aguas portuarias.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales realizados para validar el comportamiento dinámico del sistema integrado perfilador-muestreador. Se evaluó la capacidad del controlador para alcanzar y mantener distintas profundidades de consigna durante intervalos temporales de 60 y 120 segundos, analizando la estabilidad del sistema y el error de profundidad obtenido.

3.1. Ensayos de estabilización durante 60 segundos

En esta primera fase experimental se evaluó la capacidad del sistema integrado para mantenerse estable durante 60 segundos en profundidades de consigna de 3,1, 2,1 y 1,1 m.

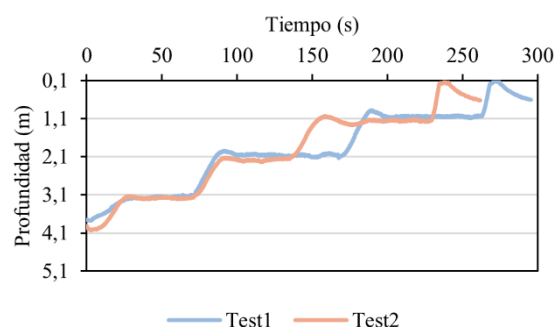


Figura 6. Evolución temporal de la profundidad durante los ensayos de estabilización de 60 segundos.

Durante los ensayos, el contador temporal asociado a cada consigna únicamente avanzaba mientras el sistema permanecía dentro de los márgenes establecidos como condición de estabilidad. En caso de que el sistema perfilador-muestreador superase dichos límites debido a perturbaciones externas o a la propia dinámica del sistema, el contador se reiniciaba automáticamente. Como consecuencia, el tiempo total de permanencia en cada profundidad podía variar entre

ensayos, especialmente al tratarse de pruebas realizadas en un entorno marino real sometido a pequeñas perturbaciones hidrodinámicas.

La Figura 6 muestra la evolución temporal de la profundidad obtenida durante los dos ensayos realizados. Los resultados evidencian que el sistema es capaz de alcanzar cada profundidad objetivo y permanecer estable durante el intervalo temporal requerido antes de iniciar la transición hacia la siguiente consigna. Asimismo, puede observarse que las transiciones entre niveles se realizan de forma progresiva, sin presentar oscilaciones excesivas durante el proceso de estabilización.

La Figura 7 representa el error de profundidad calculado como la diferencia entre la profundidad de consigna y la profundidad real medida por el perfilador. Los mayores picos de error se producen durante las transiciones entre consignas, debido al cambio dinámico de referencia. No obstante, una vez alcanzada la estabilización, el sistema mantiene un error acotado aproximadamente dentro de ± 10 cm, demostrando un comportamiento estable y adecuado para las operaciones de recolección de agua del muestreador.

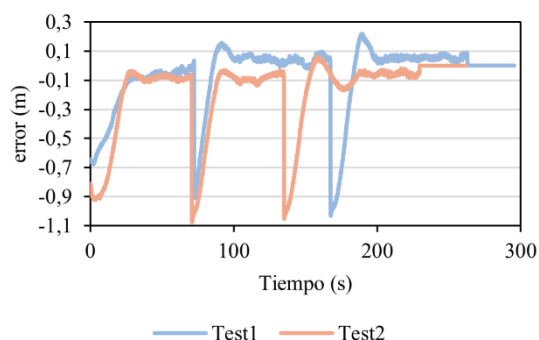


Figura 7. Evolución del error de profundidad durante los ensayos de estabilización de 60 segundos.

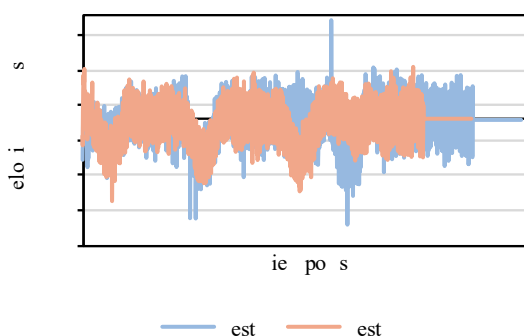


Figura 8. Evolución de la velocidad vertical del sistema durante los ensayos de estabilización de 60 segundos.

Aunque en la Figura 7 puede observarse que tanto el test 1 como el test 2 permanecen dentro del margen de error de profundidad establecido (± 15 cm), el tiempo de estabilización es mayor en el test 1 para la consigna de 2.1 m. Esto se debe a que el criterio de estabilidad no depende únicamente del error de profundidad, sino también de la velocidad vertical del perfilador. En concreto, el contador del

tiempo de estabilización únicamente comienza cuando se cumplen simultáneamente las condiciones de error de profundidad y velocidad. Como se muestra en la Figura 8, durante el test 1 la velocidad del perfilador supera el rango de velocidad establecido (± 7 cm/s) durante un intervalo de tiempo, retrasando el inicio del contador de estabilización y, en consecuencia, aumentando el tiempo total de permanencia en esa profundidad.

3.2. Ensayos de estabilización durante 120 segundos

Con el objetivo de analizar la robustez del sistema frente a periodos de estabilización más prolongados, se realizaron ensayos adicionales incrementando el tiempo de permanencia en cada profundidad hasta 120 segundos.

De forma análoga a los ensayos descritos en el apartado anterior, el sistema perfilador-muestreador fue programado para alcanzar las profundidades de consigna de 3.1, 2.1 y 1.1 m.

La Figura 9 muestra la evolución temporal de la profundidad durante los cuatro ensayos realizados. Los resultados evidencian un comportamiento consistente y repetitivo entre ensayos, observándose que el sistema es capaz de alcanzar cada profundidad objetivo y mantenerse estable durante periodos prolongados antes de iniciar la transición hacia el siguiente nivel de consigna.

Asimismo, puede apreciarse que las transiciones entre profundidades se realizan de forma progresiva y controlada, sin presentar oscilaciones excesivas ni pérdidas significativas de estabilidad durante los periodos estacionarios. Una vez finalizada la secuencia de consignas, el perfilador realiza el ascenso hasta la superficie.

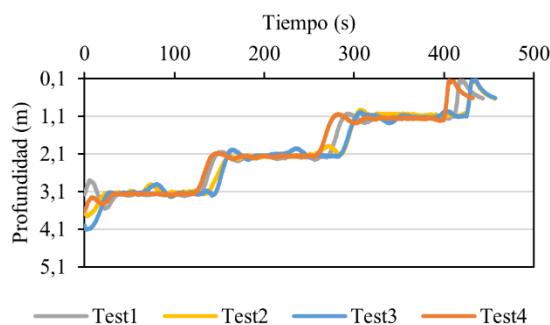


Figura 9. Evolución temporal de la profundidad durante los ensayos de estabilización de 120 segundos.

La evolución del error de profundidad durante estos ensayos se presenta en la Figura 10. Al igual que en los ensayos de 60 segundos, los máximos errores se registran durante las transiciones entre consignas. Sin embargo, una vez estabilizado el sistema, el error de profundidad permanece generalmente dentro de ± 10 cm, observándose únicamente picos puntuales próximos a ± 20 cm asociados a pequeñas perturbaciones externas presentes en el entorno marino y a la dinámica propia del sistema.

Estos resultados demuestran la capacidad del sistema dual perfilador-muestreador para mantener la estabilidad vertical durante tiempos significativamente superiores al mínimo

requerido para completar el proceso de recolección automática de agua, validando la viabilidad del perfilador MAREA como plataforma autónoma para aplicaciones de monitorización y toma de muestras en entornos marinos someros.

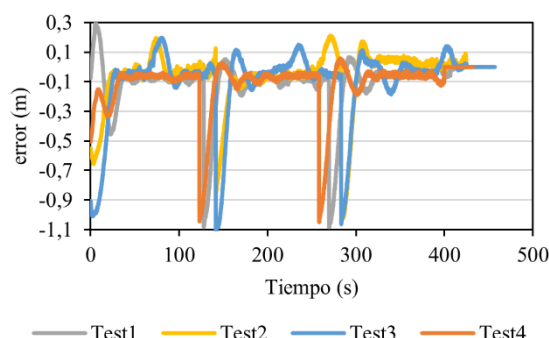


Figura 10. Evolución del error de profundidad durante los ensayos de estabilización de 120 segundos.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la integración de un sistema automático de recolección de agua en un perfilador autónomo. Para ello, se implementó un sistema de control en cascada basado en controladores PID y un sistema de flotabilidad variable, manteniendo la misma arquitectura de control utilizada en trabajos anteriores y reajustando las ganancias del controlador para adaptarlas a la nueva configuración dinámica del sistema integrado.

Los ensayos realizados en un entorno marino controlado, como el Real Club de Regatas de Cartagena, demostraron que el sistema integrado es capaz de alcanzar y mantener diferentes profundidades de consigna de forma estable durante periodos de 60 y 120 segundos en condiciones reales de operación. Una vez estabilizado, el error de profundidad permaneció generalmente dentro de un margen aproximado de ± 10 cm.

Los resultados obtenidos validan la viabilidad del perfilador MAREA como plataforma autónoma para operaciones automáticas de recolección de agua, permitiendo complementar la monitorización continua de la columna de agua con la obtención física de muestras para análisis posteriores en laboratorio.

Como trabajos futuros, se plantea la realización de campañas experimentales prolongadas en el Mar Menor, así como el desarrollo de estrategias automáticas de activación del sistema de recolección a partir de eventos detectados por

los sensores incorporados, permitiendo la obtención autónoma de muestras ante situaciones de alerta ambiental o concentraciones anómalas detectadas en tiempo real.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto R&D&I PID2023-146358OB-I00, financiado por MICIU/ AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER, UE.

Además, los autores expresan su agradecimiento al Real Club de Regatas de Cartagena por facilitar el uso de sus instalaciones para llevar a cabo las pruebas.

Referencias

- Abenza Alonso, A., Morales-Aragón, I. P., Torres-Sánchez, R., Soto-Valles, F., & De Francisco Ortiz, Ó. (2025). *Engineering and Optimization of an Advanced Marine Sampler for Precise Laboratory Analysis of Water Samples*.
- García-Ayllon, S., & Radke, J. (2021). Geostatistical Analysis of the Spatial Correlation between Territorial Anthropization and Flooding Vulnerability: Application to the DANA Phenomenon in a Mediterranean Watershed. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 809, 11(2), 809. <https://doi.org/10.3390/APP11020809>
- Morales-Aragón, I. P., Gilabert, J., Torres-Sánchez, R., & Soto-Valles, F. (2024). Design and development of a new stand-alone profiler for marine monitoring purposes. *Applied Ocean Research*, 152, 104199. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2024.104199>
- Morales-Aragón, I. P., Giménez-Gallego, J., Gilabert, J., Torres-Sánchez, R., & Soto-Valles, F. (2025). Design and application of depth control methods for autonomous underwater profilers in challenging marine environments. *Results in Engineering*, 25, 104031. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2025.104031>
- Pérez-Ruzafa, A., Campillo, S., Fernández-Palacios, J. M., García-Lacunza, A., García-Oliva, M., Ibañez, H., Navarro-Martínez, P. C., Pérez-Marcos, M., Pérez-Ruzafa, I. M., Quispe-Becerra, J. I., Sala-Mirete, A., Sánchez, O., & Marcos, C. (2019). Long-Term Dynamic in Nutrients, Chlorophyll a, and Water Quality Parameters in a Coastal Lagoon During a Process of Eutrophication for Decades, a Sudden Break and a Relatively Rapid Recovery. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00026>