

SISTEMA DE DETECCIÓN TEMPRANA DE ALGAS Y MACRÓFITOS POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN CN ASCÓ

Josep A. Jordi Imbert^{1*}, José Ignacio Roselló García², Alberto Mínguez Muñoz²

¹Asociación Nuclear Ascó – Vandellós II (ANAV), Aptdo. Correos 48 – 43890 L'Hospitalet de l'Infant – Tarragona

²GD Energy Services (GDES), Ronda Auguste y Lumière 15 – 46980 Paterna – Valencia

*jjordi@anacnv.com

Resumen

La presencia de algas y masas vegetales flotantes que se desplazan por la superficie del río Ebro puede afectar al correcto funcionamiento del sistema de refrigeración de la Central Nuclear Ascó. Tradicionalmente, la vigilancia se ha realizado mediante la observación del personal de planta *in situ*, condicionada por la iluminación, la meteorología y la atención humana, por lo que disponer de una alerta automática ante la presencia de algas de cierto tamaño constituye una contribución directa a la fiabilidad de la captación y a la operación segura de la instalación.

La ponencia presenta el trabajo de innovación abierta entre ANAV y GDES para determinar la viabilidad del uso de la imagen multispectral y térmica en la detección de algas en superficie del río Ebro. Se describe el sistema implantado en planta —cámara multispectral, cámara térmica y cámara de espectro visible sobre mástil, con procesamiento íntegro en *edge*—, la algoritmia aplicada sobre las matrices espectrales y térmicas, la plataforma web de consulta y el periodo y las condiciones de ensayo.

El sistema ha adquirido un total de 1 089 219 imágenes durante 144 días, todas ellas procesadas en *edge*, con una media de 7 564 imágenes por día, lo que supone más de cinco imágenes por minuto. Se han detectado de forma automática 710 mantas de algas, con un área media de 0,84 m², de las cuales 20 tuvieron una superficie mayor a 5 m²; con esas 20 algas se habría generado, en promedio, una alarma por semana a sala de control. Se considera viable el uso de las tecnologías multispectral y térmica, siendo estas necesarias y complementarias: la cámara multispectral es esencial para detectar en fase día las masas de algas que pudiesen ser objeto de peligro, mientras que la cámara térmica ha demostrado disponer de la sensibilidad suficiente para detectar algas de tamaño superior a 4 m² y se considera esencial para ciclos de noche. A partir de estas conclusiones se definen los trabajos de industrialización, en *hardware* y *software*, necesarios para disponer de un sistema robusto de operación automatizada en continuo que pueda ofrecer alarmas fiables.

PALABRAS CLAVE: INNOVACIÓN, DETECCIÓN, ALGAS, IA, ALGORITMOS, TERMOGRAFÍA, EDGE COMPUTING, OPERACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Ascó capta el agua de refrigeración del río Ebro, el arrastre de algas y masas vegetales flotantes por la corriente hacia la toma del río es un fenómeno conocido en las instalaciones refrigeradas con agua superficial y su llegada al canal de alimentación puede provocar la obturación progresiva de las rejillas y filtros de captación, solicitar de forma intensiva a los sistemas de limpieza y, en los casos más desfavorables, derivar en limitaciones operativas de la planta. Detectar estas masas con antelación suficiente respecto a su llegada a la captación permite anticipar las maniobras de operación y evitar que el evento evolucione hacia una condición que obligue a modificar los parámetros de operación del reactor.

El objetivo principal del sistema es detectar de forma automática la presencia de algas y masas vegetales flotantes que se desplazan por la superficie del río Ebro, generando una alerta cuando estas puedan suponer un riesgo operativo.

Los requisitos fundamentales definidos para la solución son:

- Identificar algas en movimiento.
- Operar en tiempo real, con mínima latencia.
- Adaptación ante condiciones cambiantes: luz, turbidez, oleaje, reflejos, viento, variación de temperatura superficial, etc.

El objetivo de detección para la emisión de alarma se fijó en algas de superficie superior a 5 m². No obstante, el umbral de detección aplicado durante la campaña para la cámara multiespectral fue de áreas superiores a 0,5 m². Al tener este umbral diez veces inferior al objetivo, se ha podido comprobar la eficacia de la detección y disponer de material en condiciones reales para mejorar las capacidades del sistema en el futuro.

El planteamiento de una solución basada únicamente en visión sobre el espectro visible presenta limitaciones conocidas en este escenario: el reflejo solar sobre la lámina de agua, especialmente durante el amanecer y el atardecer, donde se dan los escenarios más críticos de deslumbramiento, la espuma, la turbidez, las sombras y, de forma determinante, la ausencia de iluminación durante la noche. Por ello se optó por apoyar la detección en dos tecnologías que abordan fenómenos físicos distintos: la imagen multiespectral, que resalta la reflectancia característica de las algas en las regiones *red-edge* (banda de borde rojo) y NIR (*near infrared* - entre los 750 y los 2 500 nm), y la imagen térmica, que aprovecha la firma térmica distinta que las algas presentan debido a su humedad, densidad y exposición solar.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema se compone de diversos elementos *hardware* para la obtención de información de los sensores y la posterior comunicación de los resultados del análisis de la información. Está compuesto por:

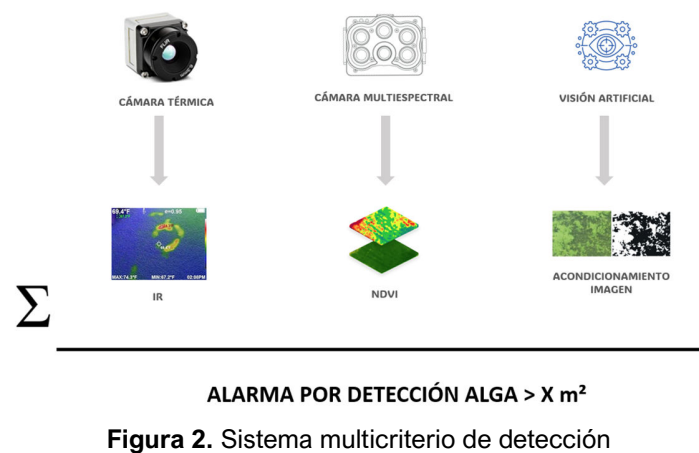
- **Armario eléctrico principal**, en el cual se dispusieron las protecciones eléctricas y la unidad de procesamiento *edge*.
- **Armario eléctrico secundario**, en el cual se dispusieron los elementos de conexión de red local y red externa, así como elementos auxiliares de alimentación de los sensores.
- **Mástil** sobre el cual se dispusieron los sensores: cámara multiespectral, cámara térmica y cámara de espectro visible.

La posición elevada del mástil permite obtener una visión clara, directa y continua de la superficie del canal de toma, garantizando la captura de imágenes adecuadas para el análisis posterior.



Figura 1. Mástil con sistema de cámaras y armario eléctrico secundario

Todos los datos obtenidos son centralizados en el servidor *edge*, el cual ejecuta un sistema multiparamétrico de detección basado en votación más *override* (anulación) en el que el algoritmo diseñado para cada sensor analiza la escena y vota de forma independiente si hay presencia de alga y tamaño. La alarma se genera por consenso cuando varios subsistemas coinciden en detectar una masa vegetal superior a $X \text{ m}^2$, siendo este valor predefinido por el usuario. Como salvaguarda, si un único sensor detecta un alga que supera claramente cierto umbral, puede generar la alarma por sí mismo, de modo que un evento evidente no se pierde por discrepancia entre canales. De esta manera se consigue generar menos falsas alarmas sin renunciar a la sensibilidad ante eventos de gran tamaño.



2.1. Cámara Multiespectral

Sensor multiespectral para aplicaciones de análisis de vegetación y caracterización de superficies. Incorpora un conjunto de cinco bandas espectrales estrechas (azul, verde, rojo, *red-edge* y NIR),

optimizadas para detectar firmas vegetales específicas que permiten diferenciar algas, materia orgánica flotante y otros elementos presentes en la lámina de agua. A esta captura multispectral se suma un canal pancromático de alta resolución con obturador global, que proporciona imágenes nítidas y sin distorsiones de movimiento, incluso en escenas con corriente rápida o turbulencias.

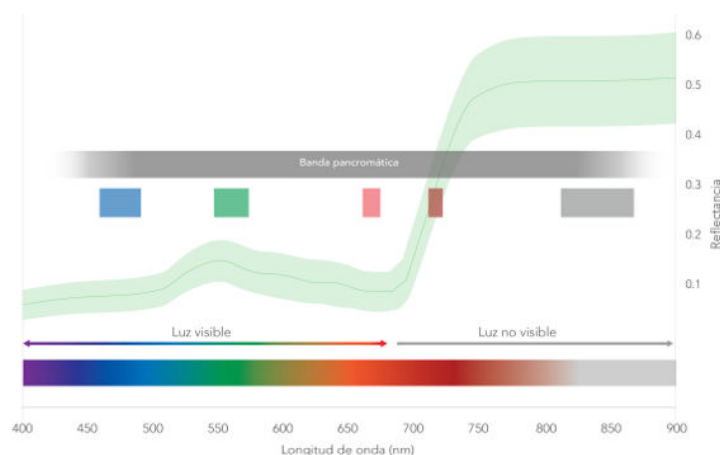


Figura 3. Detalle espectro luz captada cámara multispectral

El empleo de longitudes de onda en la región *red-edge* y NIR resulta especialmente valioso para la detección de vegetación flotante, ya que estos rangos resaltan la reflectancia característica de las algas y permiten disponer de la información suficiente para aplicar algoritmos sobre las matrices de datos para poder discriminar aquellos datos que, cumpliendo ciertos criterios, sean considerados como algas.

Gracias a estas capacidades, la cámara proporciona una vista altamente informativa que mejora la detección de algas en condiciones donde el color, contraste o iluminación hacen difícil su identificación mediante técnicas convencionales. Su capacidad para resaltar vegetación y minimizar confusiones con reflejos, sombras u objetos no vegetales la convierte en una pieza clave dentro del sistema de vigilancia y análisis implementado.

2.2. Cámara Térmica

Se ha usado un sensor térmico industrial diseñado para monitorización continua en exteriores. Opera en el rango infrarrojo LWIR (*long wave infrared* – de 8 a 14 μm), lo que la hace adecuada para distinguir diferencias de temperatura en la superficie del agua y en objetos flotantes. Su resolución térmica de 464×348 píxel permite registrar patrones térmicos en tiempo real, incluso en condiciones dinámicas de corriente y oleaje. La sensibilidad térmica es inferior a 50 mK, lo que permite detectar variaciones térmicas muy sutiles entre algas, vegetación emergente y la lámina de agua circundante. La carcasa exterior adicional le otorga resistencia a humedad y polvo, y capacidad para funcionar en un rango amplio de temperaturas ambientales, garantizando estabilidad y operación 24/7.

Gracias a estas características, esta cámara aporta una información valiosa, ya que las algas suelen presentar una firma térmica distinta debido a su humedad, densidad y exposición solar. Además, es especialmente útil en situaciones de baja iluminación, visión degradada, niebla, horas nocturnas o escenarios en los que el espectro visible puede verse afectado por reflejos solares o variaciones de color en el agua.

2.3. Procesado y Operación

El sistema ha sido diseñado para realizar todo el procesamiento de imágenes directamente en el dispositivo (arquitectura *edge*), sin dependencia de servicios en la nube ni transmisión de grandes volúmenes de datos a servidores externos. Esta arquitectura permite que la detección de algas se realice de forma autónoma, local y en tiempo real, garantizando una operación estable incluso en entornos donde la conectividad puede ser limitada o variable.

El equipo completo —que incluye la captura sincronizada de las cámaras visible, térmica y multiespectral, el procesamiento espectral y térmico, la evaluación de presencia de algas mediante los algoritmos desarrollados y el almacenamiento local de los resultados— se ejecuta con una cadencia promedio de una imagen cada 15 segundos.

El uso de procesamiento *edge* permite:

- Reducir drásticamente la latencia, asegurando decisiones rápidas.
- Disminuir la dependencia de red, evitando cuellos de botella y fallos por conectividad.
- Optimizar los recursos, enviando solamente la información relevante a sistemas superiores.
- Asegurar la privacidad y seguridad de los datos generados en la instalación.

En conjunto, esta arquitectura facilita un sistema robusto, eficiente y preparado para operación 24/7, adecuándose a las exigencias operativas del entorno industrial.

2.4. Visualización y Consulta

El sistema incorpora una plataforma web integrada, accesible para el personal autorizado de la central, que permite consultar de forma visual y estructurada todas las imágenes capturadas y procesadas por el sistema. Esta interfaz ha sido diseñada como herramienta de apoyo operativo, facilitando la revisión rápida de eventos y el histórico de detecciones de algas en el canal de refrigeración. La plataforma muestra tanto las imágenes originales como las imágenes procesadas (visible, térmica y multiespectral), junto con los resultados del algoritmo de detección para la consulta y auditoría de evaluación del sistema.

La web permite realizar diferentes tipos de filtrado, incluyendo el filtrado por fecha o rango temporal, que facilita la navegación por eventos históricos o la revisión de periodos específicos de interés operativo; el filtrado por estado de detección, pudiendo mostrar únicamente las imágenes donde se ha identificado presencia de algas; y la búsqueda rápida de eventos, permitiendo al usuario localizar incidentes concretos de manera eficiente. A su vez, se ha proporcionado una web para el visionado en directo de la cámara de espectro visible y térmica.

Esta visualización web constituye un complemento esencial para la supervisión del sistema, permitiendo al personal contrastar detecciones, revisar condiciones ambientales asociadas y disponer de un histórico de capturas procesadas de forma clara y accesible.

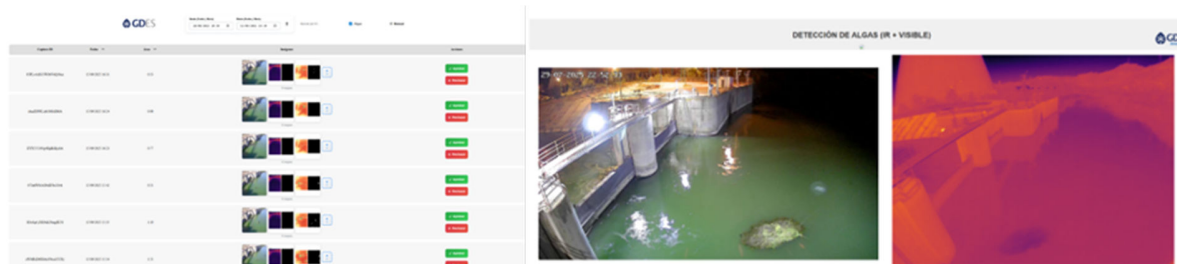


Figura 4. Plataforma web para consulta y visualización en directo

3. RESULTADOS

Los ensayos se realizaron durante un periodo representativo en cuanto a variabilidad ambiental, entre los meses de mayo y octubre de 2025. Durante este tiempo se registraron condiciones pertinentes para evaluar la robustez del sistema, incluyendo:

- Días de alta luminosidad y días nublados.
- Horas con reflejo solar intenso sobre el agua, especialmente durante el amanecer y el atardecer, donde se dan los escenarios más críticos de deslumbramiento.
- Variación de temperatura entre amanecer, mediodía, tarde y noche.
- Episodios de mayor caudal y otros de flujo más estable en el río.
- Días de viento, lluvia, niebla, etc.
- Afectación sobre el sistema de vida animal (insectos, arañas, pájaros, etc.).

El sistema ha adquirido un total de 1 089 219 imágenes durante 144 días, las cuales han sido procesadas en *edge* en su totalidad, almacenando el resultado en la base de datos del servidor. Las imágenes se almacenaban durante los siguientes 15 días, a partir del cual un código automático eliminaba aquellas que no tenían asociada una detección de alga. La media de imágenes por día ha sido de 7 564, lo que supone más de cinco imágenes por minuto.

Se han detectado de forma automática 710 mantas de algas, de las cuales 20 tuvieron una superficie mayor a 5 m². La media del área de las algas detectadas ha sido de 0,84 m². Con estas 20 algas se habría generado, en promedio, una alarma por semana a sala de control.

3.1. Detecciones Diurnas

Durante el ciclo día se han registrado detecciones de algas de muy distinta morfología y en condiciones diversas: algas disgregadas en pequeños grupos, algas pequeñas en días de lluvia, algas con reflejos altos en la superficie del agua y algas relativamente grandes con sombras sobreponiéndose. Cabe destacar la detección de algas de 0,53 m² no visibles a simple vista, así como que los eventos de mayor tamaño, del orden de 4,51 y 6,03 m² cerca de la compuerta, fueron detectados por ambas cámaras.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de detecciones en ciclo día:



Figura 5a. Detección alga con luz natural – 0,53 m²

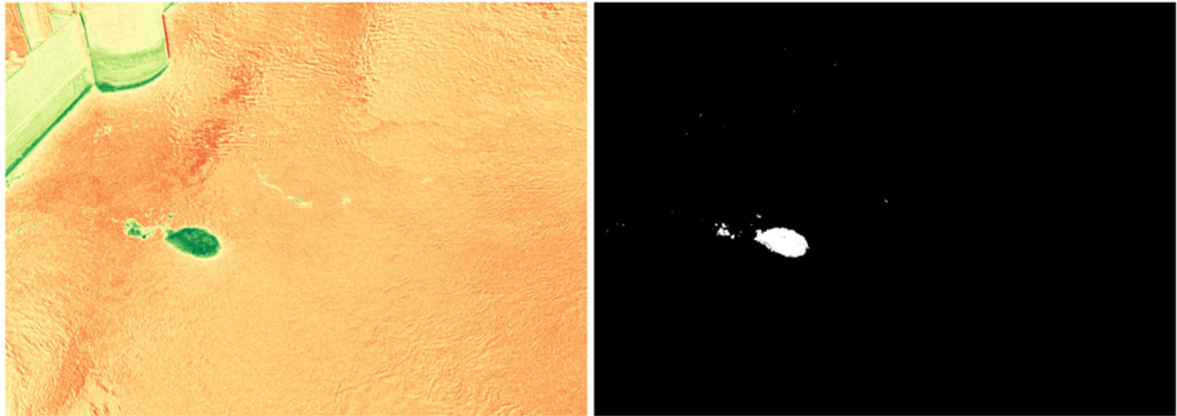


Figura 5b. Detección alga con luz natural – 0,53 m²

3.2. Detecciones Nocturnas

En fases de ciclo noche la cámara multispectral no puede ser utilizada con la iluminación actual, ya que no se dispone de emisión de luz en las franjas en las que esta cámara trabaja. En esas condiciones la detección recae sobre la cámara térmica, que ha proporcionado resultados consistentes sobre algas de entre 4,47 y 5,64 m² en horario nocturno y de madrugada. Se considera esencial para ciclos noche, ya que la diferencia entre la temperatura del río y del ambiente es mayor y mejoran los resultados de la detección.

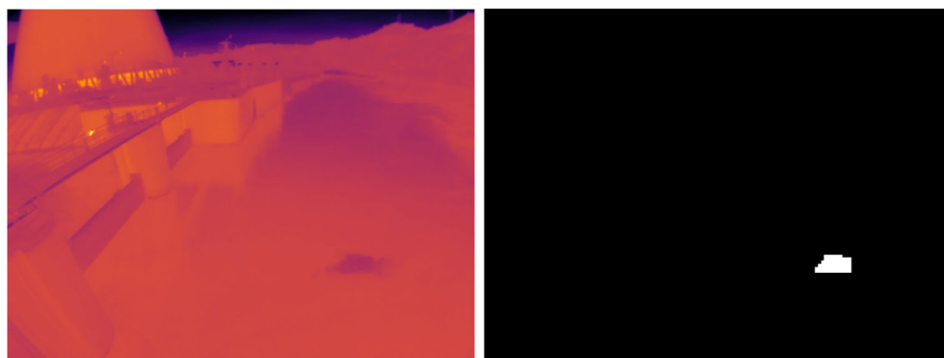
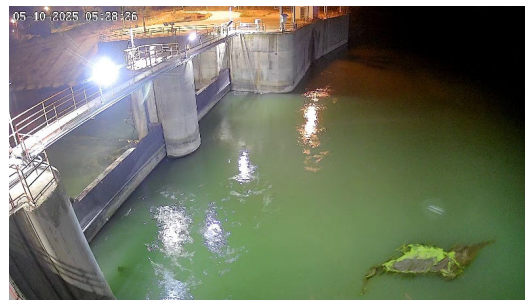


Figura 6. Detección de alga nocturna – 4,47 m²

4. CONCLUSIONES

La campaña de ensayo desarrollada en la C.N. Ascó confirma la viabilidad del uso combinado de la imagen multispectral y térmica para la detección automática de algas y masas vegetales flotantes en la captación del río Ebro. El comportamiento observado se traduce en una cadencia de alarmas plenamente asumible

desde el punto de vista de la carga de trabajo del operador y coherente con el carácter anticipativo que se busca en la alerta.

La sensibilidad alcanzada supera ampliamente el requisito de partida: el umbral de trabajo aplicado se situó muy por debajo del objetivo de alarma, lo que ha permitido registrar masas vegetales que no resultarían perceptibles a simple vista por un observador. En el extremo opuesto del rango, los eventos de mayor entidad fueron detectados de forma independiente y simultánea por ambas tecnologías, evidenciando la redundancia efectiva del esquema multicriterio. La complementariedad de las tecnologías empleadas ha quedado plenamente acreditada. La cámara multiespectral, apoyada en las bandas *red-edge* y NIR, resuelve con solvencia los escenarios diurnos más exigentes, en los que el color de las algas se confunde con el brillo de la lámina de agua, con la espuma o con las sombras proyectadas sobre la superficie. La cámara térmica sostiene la capacidad de detección en ausencia total de iluminación, con resultados consistentes en horario nocturno y de madrugada, franja en la que el mayor contraste entre la temperatura del río y la del ambiente favorece incluso los resultados. La votación por consenso entre canales, con salvaguarda de disparo individual ante eventos de gran tamaño, permite reducir de forma notable las falsas alarmas sin renunciar a la sensibilidad, y mantiene detecciones estables frente a agua turbulenta, reflejos solares y morfologías de alga muy diversas, tanto dispersas como compactas.

En conjunto, el sistema propuesto cumple los requisitos definidos —identificación de algas en movimiento, operación en tiempo real con mínima latencia y adaptación a condiciones ambientales cambiantes— y aporta una robustez claramente superior a la que ofrecería una solución basada exclusivamente en el espectro visible. La plataforma web de consulta, con acceso al histórico de capturas procesadas y al visionado en directo, completa la solución dotándola de trazabilidad y de capacidad de auditoría para el personal de planta. Sobre esta base consolidada, la segunda fase del proyecto aborda la industrialización del equipo y la incorporación del seguimiento de trayectoria, del modelo de visión y del sistema de alarmas, con el objetivo de disponer de un sistema robusto para una operación desatendida en continuo que ofrezca a sala de control una alerta fiable y anticipada ante la presencia de algas en el canal de alimentación de la C.N. Ascó.

5. REFERENCIAS

- [1] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, «Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS», Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 1974.
- [2] W. Ding y C. Li, «Algal blooms forecasting with hybrid deep learning models from satellite data in the Zhoushan fishery», *Ecol. Inform.*, vol. 82, p. 102664, jun. 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102664.
- [3] A. Rahul, G. Lokesh, S. Goswami, R. N. Ponnalagu y R. Sudha, «Automatic area estimation of algal blooms in water bodies from UAV images using texture analysis», *Water Sci. Eng.*, vol. 17, n.º 1, pp. 62-71, mar. 2024, doi: 10.1016/j.wse.2023.08.001.
- [4] F. Barrientos-Espillco, E. Gascó, C. I. López-González, M. J. Gómez-Silva y G. Pajares, «Semantic segmentation based on deep learning for the detection of cyanobacterial harmful algal blooms (CyanoHABs) using synthetic images», *Appl. Soft Comput.*, vol. 141, p. 110315, jul. 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2023.110315.
- [5] J. Park, K. Patel y W. H. Lee, «Recent advances in algal bloom detection and prediction technology using machine learning», *Sci. Total Environ.*, vol. 938, p. 173546, ago. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173546.