

Aragonés Borrego, D.; Gómez-Giráldez, P.; Romero, G.; Barbero, L.; Cobos, J. Evaluación de sensores hiperespectrales para UAV dentro del proyecto SpaFLEXImp en Doñana

# Evaluación de sensores hiperespectrales para UAV dentro del proyecto SpaFLEXImp en Doñana

Aragonés Borrego, David <sup>1</sup> Gómez-Giráldez, Pedro J. <sup>1</sup> Romero, Gabriela P. <sup>1</sup>  
Barbero, Luis <sup>2</sup> Cobos, Joaquín <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de SIG y Teledetección, Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) CSIC, Sevilla, España

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus internacional de excelencia en Investigación Marina (CEIMAR), Universidad de Cádiz, España

ORCID: Aragonés Borrego 0000-0003-4989-9005 Gómez-Giráldez 0000-0002-1247-7557 Barbero 0000-0002-3513-2025  
Cobos 0000-0003-0285-7617

Correspondencia: [daragones@ebd.csic.es](mailto:daragones@ebd.csic.es) [pedro.gomez@ebd.csic.es](mailto:pedro.gomez@ebd.csic.es) [gabrielap.romero@ebd.csic.es](mailto:gabrielap.romero@ebd.csic.es)  
[luis.barbero@uca.es](mailto:luis.barbero@uca.es) [joaquin.cobos@ebd.csic.es](mailto:joaquin.cobos@ebd.csic.es)

## RESUMEN




La misión FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como objetivo mapear la fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF). La validación de estos productos requiere una caracterización precisa de la reflectancia en superficie. Este trabajo presenta una comparativa entre dos tecnologías hiperespectrales aeroportadas: un sensor de barrido lineal (push-broom, Headwall Hyperspec®) y un sensor de imagen instantánea (snapshot, Cubert FirefLEYE 185), integrados en una plataforma UAV DJI Matrice 600. La metodología emplea el Empirical Line Model (ELM) mediante blancos artificiales y medidas de verdad-terreno con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4. Los resultados revelaron que el sensor Headwall posee una mayor robustez estadística global ( $R^2=0.996$ ) y una estabilidad superior en condiciones de baja señal (10%), donde mantuvo una desviación mínima. Por el contrario, el sensor Cubert mostró una sobreestimación sistemática en reflectividad bajas y menor consistencia por debajo de los 600 nm, aunque superó al Headwall en precisiones de rango medio y alto (30% y 50%). Se concluye que la tecnología push-broom es más fiable para la extracción de la SIF en las bandas de absorción del oxígeno, donde la radiancia es mínima, garantizando la precisión necesaria para el monitoreo funcional de la vegetación en ecosistemas complejos como Doñana.


**Palabras clave:** Modelo Lineal Empírico, Teledetección de proximidad, Cal/Val

Fecha de recepción: 30 enero 2026 · Fecha de aceptación: 30 enero 2026

# Evaluación de sensores hiperespectrales para UAV dentro del proyecto SpaFLEXImp en Doñana

Aragonés Borrego, David <sup>(1)</sup>, Gómez-Giráldez, Pedro J. <sup>(1)</sup>, Romero, Gabriela P. <sup>(1)</sup>, Barbero, Luis <sup>(2)</sup>, Cobos, Joaquín <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratorio de SIG y Teledetección, Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) CSIC, España,  0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es ;  0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es gabrielap.romero@ebd.csic.es ;  0000-0003-0285-7617, joaquin.cobos@ebd.csic.es.

<sup>(2)</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Campus internacional de excelencia en Investigación Marina (CEIMAR), Universidad de Cádiz, España  0000-0002-3513-2025, luis.barbero@uca.es.

**Resumen:** La misión FLuorescence EXplorer (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como objetivo mapear la fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF). La validación de estos productos requiere una caracterización precisa de la reflectancia en superficie. Este trabajo presenta una comparativa entre dos tecnologías hiperespectrales aeroportadas: un sensor de barrido lineal (*push-broom*, Headwall Hyperspec®) y un sensor de imagen instantánea (*snapshot*, Cubert FirefLEYE 185), integrados en una plataforma UAV DJI Matrice 600. La metodología emplea el *Empirical Line Model* (ELM) mediante blancos artificiales y medidas de verdad-terreno con un espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4. Los resultados revelaron que el sensor Headwall posee una mayor robustez estadística global ( $R^2=0.996$ ) y una estabilidad superior en condiciones de baja señal (10%), donde mantuvo una desviación mínima. Por el contrario, el sensor Cubert mostró una sobreestimación sistemática en reflectividades bajas y menor consistencia por debajo de los 650 nm, aunque superó al Headwall en precisiones de rango medio y alto (30% y 50%). Se concluye que la tecnología *push-broom* es más fiable para la extracción de la SIF en las bandas de absorción del oxígeno, donde la radiancia es mínima, garantizando la precisión necesaria para el monitoreo funcional de la vegetación en ecosistemas complejos como Doñana.

**Palabras clave:** Modelo Lineal Empírico, Teledetección de proximidad, Cal/Val.

## English Title

**Abstract:** The FLuorescence EXplorer (FLEX) mission by the European Space Agency (ESA) aims to map solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF). The validation of these products requires an accurate characterization of surface reflectance. This study presents a comparison between two airborne hyperspectral technologies: a *push-broom* scanning sensor (Headwall Hyperspec®) and a *snapshot* imaging sensor (Cubert FirefLEYE 185), both integrated into a DJI Matrice 600 UAV platform. The methodology is based on the application of the *Empirical Line Model* (ELM) using artificial targets and ground-truth measurements obtained with an ASD FieldSpec 4 spectroradiometer. Results revealed that the Headwall sensor possesses greater overall statistical robustness ( $R^2=0.996$ ) and superior stability under low-signal conditions (10%), where it maintained minimal deviation. In contrast, the Cubert sensor showed a systematic overestimation at low reflectance levels and lower consistency at wavelengths below 650 nm, although it outperformed the Headwall in terms of precision within medium and high reflectance ranges (30% and 50%). It is concluded that the Headwall system's *push-broom* technology is more reliable for SIF extraction in the oxygen absorption bands, where radiance is minimal, ensuring the necessary precision for functional vegetation monitoring in complex ecosystems such as Doñana.

**Keywords:** Empirical Line Model, Proximal Remote sensing, Cal/Val

## 1. INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la fluorescencia de la clorofila inducida por el sol (SIF) permite monitorear el estado

funcional de la vegetación y su eficiencia fotosintética, constituyendo uno de los indicadores más directos de la actividad fotosintética a escala de hoja y ecosistema (Frankenberg *et al.*, 2014). La próxima misión

*Fluorescence Explorer* (FLEX) de la Agencia Espacial Europea (ESA), que volará en tándem con Sentinel-3, operará en las bandas de absorción del oxígeno (O<sub>2</sub>A a 760 nm y O<sub>2</sub>B a 687 nm) permitiendo la estimación global de la SIF con alta resolución espectral (Drusch *et al.*, 2017). Dado que la señal SIF representa apenas una fracción de la radiación total reflejada, cualquier error en la estimación de la reflectancia de la superficie invalida la extracción de la fluorescencia, lo que exige una corrección radiométrica rigurosa.

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) permite cerrar la brecha escalar entre las medidas de campo y las satelitales, proporcionando información hiperespectral a muy alta resolución espacial (Aasen *et al.*, 2018). Sin embargo, la diversidad de sensores hiperespectrales (*push-broom* vs. *snapshot*) introduce incertidumbres que deben ser mitigadas mediante protocolos de corrección radiométrica rigurosos.

Dentro de los objetivos del proyecto SpaFLEX, se encuentra el de realizar campañas de calibración y validación multisensor para la correcta elaboración de protocolos Cal/Val para la consecución de errores finales admisibles que cumplan el requerimiento de la misión FLEX (Gómez-Giráldez *et al.*, 2024). En este contexto, este estudio evaluó la consistencia espectral de estos sensores en un entorno de alta complejidad ecológica como es el Parque Nacional de Doñana, utilizando el modelo lineal empírico (o ELM por sus siglas en inglés *Empirical Line Model*) y validado con datos de verdad terreno tomados con el espectroradiómetro en campo.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio y Equipamiento

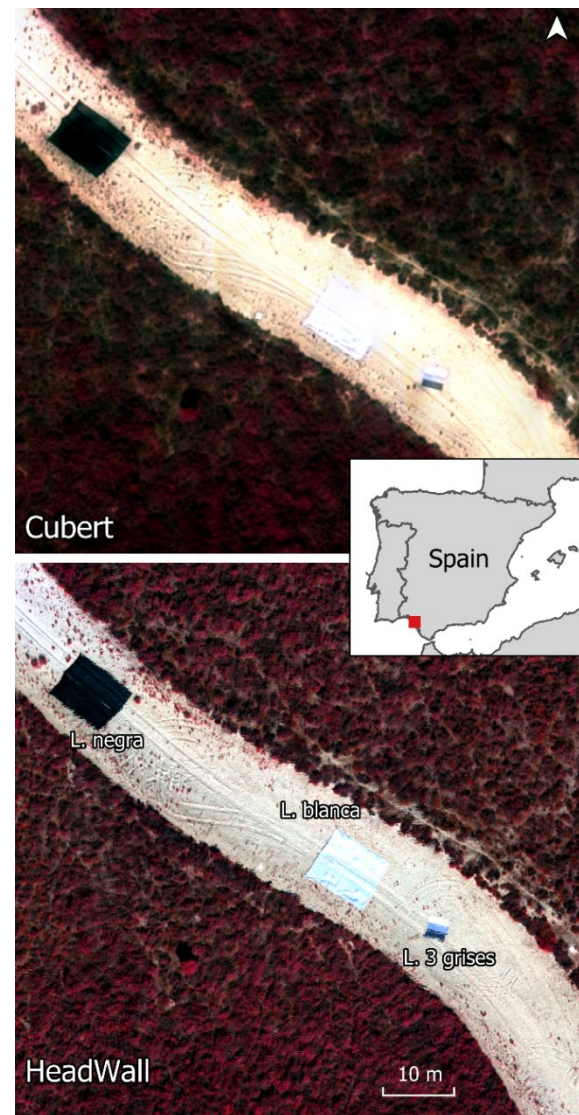
La campaña de campo se llevó a cabo en áreas de brezal higrófilo (*Erico scopariae-Ulicetrum australis*, conocido como Monte Negro) en el Parque Nacional de Doñana (Huelva, España) el 08 de octubre de 2025. La logística en estas zonas es compleja debido a la inaccesibilidad y la sensibilidad del ecosistema.

Se emplearon dos sensores a bordo del dron **DJI Matrice 600 PRO**, hexacóptero de alta estabilidad y 6 kg de carga útil. Los sensores evaluados fueron:

- **Headwall Hyperspec® Co-Aligned + LiDAR** del servicio de drones de la Universidad de Cádiz (UCA), sensor *push-broom* que cubre tanto el VNIR (400-1000 nm) como el SWIR (1000-2500 nm), que captura 273 bandas en el VNIR, con un registro espacial y espectral continuo, con una resolución espectral de 6 nm, se voló a una altura de 80 m y con una resolución espacial de 5 cm
- **Cubert FireflyEYE S185** (Cubert GmbH, Ulm, Alemania) del Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana, sensor *snapshot* en el rango VNIR (450-950 nm) que captura un pancromático y 125 bandas, eliminando distorsiones geométricas por movimiento, aunque con menor resolución espectral de 4 nm, voló a una altura de 120 m con una resolución espacial de

4 cm en el pancromático y de 40 cm en el resto de las bandas.

Como referencia en tierra se utilizó un **ASD FieldSpec 4** (350-2500 nm), calibrado para medir radiancia y reflectancia absoluta mediante un panel de referencia *Spectralon* (99% de reflectividad). Se desplegaron dos **lonas agrícolas** de 10×10 metros, sobre un cortafuego de arena dentro de la zona de estudio, con propiedades espectrales casi constantes (del 3,5% y 50% de reflectividad en la lona negra y la lona blanca respectivamente) para cubrir el rango dinámico de la vegetación y el suelo junto a una **lona calibrada** de 3×3 metros con tres tonos de grises que se usaron para evaluar el modelo (Fig.1).



**Figura 1.** Ubicación de las lonas y comparación de las imágenes con una composición RGB (900, 650 y 550 nm).

### 2.2. Metodología

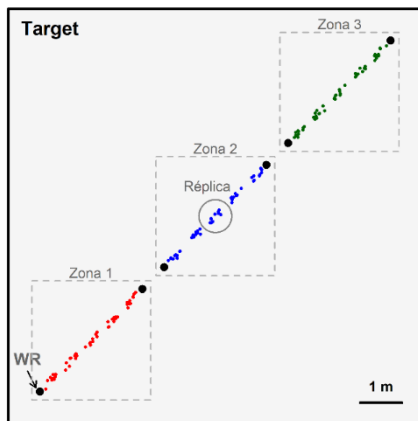
Durante los vuelos, se realizaron medidas simultáneas (máx. 1 h de diferencia) con el ASD sobre las lonas, que actuaron como *targets* artificiales. Un total de 30 espectros, cinco réplicas con 10 mediciones cada una y 10 mediciones del *Spectralon* (WR) antes y después del

grupo de réplicas en 3 zonas de cada *target* (Fig. 2). Los espectros fueron medidos en radiancias y transformados a reflectividad usando la media de las medidas del WR antes y después, posteriormente se pasaron a reflectividad absoluta utilizando la firma calibrada del *Spectralon*.

Las imágenes fueron procesadas convirtiendo los niveles digitales a reflectividad en el sensor y con la corrección geométrica o mosaico de las imágenes según el tipo de sensor. Para transformar la reflectividad en el sensor ( $r$ ) registrados por los drones a reflectividad en superficie ( $\rho$ ), se aplicó el modelo lineal empírico, una metodología ampliamente utilizada (p.e. Smith & Milton 1999). Este método asume una relación lineal para cada banda que corrige tanto la respuesta del sensor como los efectos de la atmósfera (Eq. 1).

$$\rho_{\lambda} = a_{\lambda}r_{\lambda} + b_{\lambda} \quad (1)$$

Donde la pendiente ( $a$ ) y el intercepto ( $b$ ) se calculan para cada banda mediante regresión lineal simple entre los valores de reflectividad medidos en el sensor promediados sobre los píxeles de las lonas y sus firmas de reflectividad en superficie medidos por el ASD.



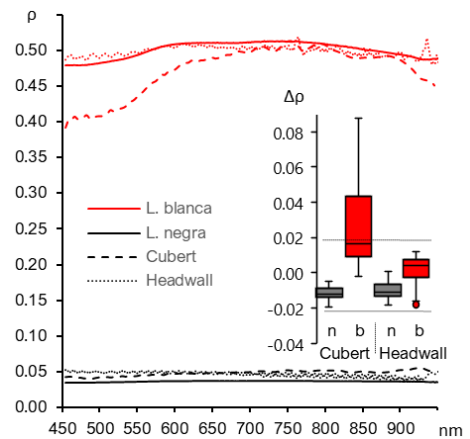
**Figura 2.** Ejemplo de toma de medidas espectrales sobre un target artificial.

Se promediaron unos 26000 píxeles por lona y sensor descartándose los píxeles de los bordes de la lona. A fin de agilizar el tratamiento de la información, no se procedió con la homogeneización espectral de los sensores. El uso de funciones de respuesta espectral gaussianas para igualar las resoluciones al sensor Cubert se consideró prescindible para este flujo de procesamiento, priorizando la disponibilidad inmediata de los datos originales al obtener los datos de la banda más cercana, al ser un primer análisis exploratorio.

Se usó una lona con tres niveles de gris (50%, 30% y 10% aproximadamente) para evaluar el ajuste del modelo utilizando como métricas: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). Se promediaron unos 770 píxeles por nivel de gris.

### 3. RESULTADOS

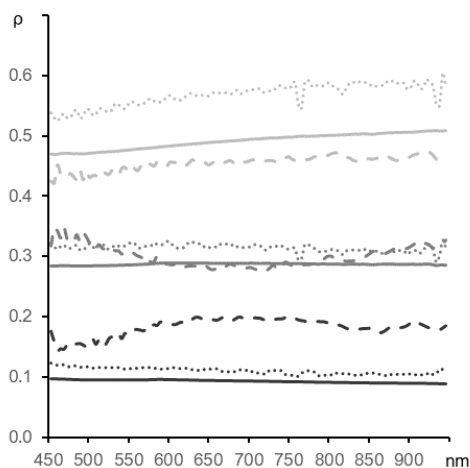
La evaluación de la respuesta espectral de los sensores en el rango de 450 a 950 nm, muestra una alta estabilidad en la caracterización de la lona negra y una mínima dispersión entre sensores. Sin embargo, en la lona blanca, se observan discrepancias significativas: el sensor Cubert presenta una firma espectral menos consistente, especialmente en longitudes de onda inferiores a los 650 nm, donde muestra una caída pronunciada en comparación con la referencia. Este comportamiento se aprecia mejor en el diagrama de caja de diferencias de reflectividad ( $\Delta\rho$ ), entre el espectro tomado con el ASD y el del sensor, donde la lona blanca (b) revela una mayor variabilidad y un sesgo más marcado en el sensor Cubert frente a la mayor precisión y centralidad mostrada por el sistema Headwall (Fig.3).



**Figura 3.** Comparativa de la reflectividad ( $\rho$ ) medida por los sensores Cubert (línea discontinua) y Headwall (línea punteada) sobre las lonas blanca (rojo) y negra (negro) tomadas con el ASD. El gráfico insertado muestra la distribución de las diferencias de reflectividad ( $\Delta\rho$ ) para cada sensor y superficie (n: negra; b: blanca).

Tras la aplicación del ELM y comparar las firmas espectrales corregidas de ambos sensores con los valores de referencia del ASD sobre la lona de tres niveles de gris (Fig. 4), observamos cómo el sensor Cubert se adapta bien en los niveles alto e intermedio, pero no se consigue adaptar en el nivel bajo (Gris 10 %), mientras que el sensor Headwall ofrece una respuesta más lineal y fiable en este nivel.

El ajuste del modelo lineal empírico permitió cuantificar la precisión de ambos sensores tras la corrección radiométrica. El comportamiento de los sensores evaluados muestra una dependencia marcada respecto a la magnitud de la reflectividad medida (Tabla 1). A nivel global, el sensor Headwall presenta una mayor robustez estadística ( $R^2=0.996$ ), explicada por su mínima desviación en el rango bajo de la señal (MAE = 0.0152), donde la respuesta del sensor se mantiene próxima a la línea de identidad. Por el contrario, el sensor Cubert manifiesta un error sistemático por sobreestimación en niveles bajos de reflectancia, duplicando prácticamente el valor de referencia. Es notable, sin embargo, que la precisión del sensor Cubert supera a la de Headwall en los intervalos medio y alto (RMSE de 0.0247 y 0.0401 respectivamente).



**Figura 4.** Comparativa de la reflectividad ( $\rho$ ), medida por los sensores Cubert (línea discontinua) y Headwall (línea punteada), corregidas con el ELM y sobre la lona con tres niveles de grises tomadas con el ASD.

**Tabla 1.** Evaluación estadística del ajuste del modelo. Los estadísticos fueron calculados de manera global y organizados en tres bloques correspondientes a niveles de reflectividad de los grises.

Intervalo	Métrica	Cubert	Headwall
Global	R <sup>2</sup>	0.981	0.996
	RMSE	0.053	0.038
	MAE	0.047	0.034
Gris 50 %	RMSE	0.040	0.058
	MAE	0.037	0.057
Gris 30 %	RMSE	0.025	0.029
	MAE	0.021	0.028
Gris 10 %	RMSE	0.088	0.016
	MAE	0.084	0.015

#### 4. CONCLUSIONES

La disparidad en el rendimiento de los sensores analizados subraya la influencia crítica de la arquitectura de captura (tecnología *push-broom* frente a *snapshot*) en la calidad de los productos hiperespectrales. Mientras que el sensor Cubert demostró una precisión competitiva en rangos de reflectividad medios y altos, su inestabilidad espectral por debajo de los 650 nm y la marcada sobreestimación en niveles de baja señal sugieren limitaciones en su linealidad o en la gestión de la luz dispersa bajo condiciones de alta exigencia radiométrica. En contraposición, el sistema Headwall exhibió una mayor robustez frente al ELM, manteniendo una respuesta significativamente más fiel en el intervalo del 10% de reflectividad. Esta estabilidad del sistema *push-broom* es fundamental para garantizar la consistencia escalar necesaria entre las medidas de campo y las futuras observaciones satelitales de misiones como FLEX.

Estas diferencias tienen implicaciones directas en la viabilidad de la cuantificación del SIF, una señal cuya magnitud representa apenas una fracción de la radiación

total y cuya extracción exige una corrección radiométrica extremadamente rigurosa. Dado que la recuperación de la SIF se realiza específicamente en las bandas de absorción del oxígeno (O<sub>2</sub>A y O<sub>2</sub>B), donde la radiancia registrada es mínima, la precisión demostrada por el sensor Headwall en niveles de baja reflectancia resulta determinante para evitar errores que invaliden la extracción de la señal. Por lo tanto, aunque el sensor Cubert presenta ventajas operativas por su naturaleza *snapshot*, la superioridad del sistema Headwall en el rango de baja señal lo posiciona como la herramienta más fiable para misiones que requieran monitorizar el estado funcional de la vegetación con alta precisión espectral.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a los proyectos SpaFLEXVal (PID2022-137022OB-C33) y FLEX-S3 (PCI2023-145988-2) financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores también participan en las Plataformas Temáticas Interdisciplinarias (PTI) del CSIC PTI EcoBioDiv y PTI Teledetect y en la red temática NetOps (RED2022-134438-T). El apoyo logístico y técnico fue proporcionado por ICTS-RBD-CSIC.

#### 6. REFERENCIAS

- Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, *10*(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., et al. (2017). The FLuorescence EXplorer Mission Concept—ESA's Earth Explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *55*(3), 1273–1284. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2621820>
- Frankenberg, C., O'Dell, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., et al. (2014). Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment*, *147*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.007>
- Gómez-Giráldez, P.J.; Jiménez, M.; Cendrero-Mateo, M.P.; Van Wittenberghe, S.; Peón, J.J.; Moncholí-Estornell, A.; Díaz-Delgado, R. (2024) The Spafleximp Project: Spanish Flex-S3 Mission Calibration and Validation Plan Implementation. In: IGARSS 2024–2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2024; pp. 296–300. <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10640946>
- Smith, G. M., & Milton, E. J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, *20*(13), 2653–2662. <https://doi.org/10.1080/014311699211994>