

Muela Pillajo, J.; Jiménez Michavila, M.; Peón Garcia, J.; Gutiérrez de la Cámara Ara, Ó.; Muñoz Sánchez, F.; Cendrero-Mateo, M.; Moncholí-Estornell, A.; Chardi-Raga, C.; Gómez-Giraldez, P.; Aragonés, D. Intercomparación “outdoor” de espectrorradiómetros de campo dentro del plan de calibración y validación SpaFLEX

Intercomparación “outdoor” de espectrorradiómetros de campo dentro del plan de calibración y validación SpaFLEX

Muela Pillajo, Jimmy A.¹ Jiménez Michavila, Marcos¹ Peón Garcia, Juan J.¹ Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar¹ Muñoz Sánchez, Félix¹ Cendrero-Mateo, M^a Pilar² Moncholí-Estornell, Adrián² Chardi-Raga, Cynthia² Gómez-Giraldez, Pedro J.³ Aragonés, David³

¹ Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España

² Universidad de Valencia, Paterna, España

³ Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), Sevilla, España

ORCID: Muela Pillajo 0009-0002-9524-5483 Jiménez Michavila 0000-0002-6852-2732 Peón Garcia 0000-0001-7551-2236 Gutiérrez de la Cámara Ara 0000-0003-2555-9292 Muñoz Sánchez 0000-0002-6421-8725 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Moncholí-Estornell 0000-0002-8832-2594 Chardi-Raga 0009-0007-7886-4801 Gómez-Giraldez 0000-0002-1247-7557 Aragonés 0000-0003-4989-9005

Correspondencia: jmuepil@inta.es jimenezmm@inta.es jpeogar@inta.es gutierrezcao@inta.es munozsfs@inta.es m.pilar.cendrero@uv.es adrian.moncholi@uv.es cynthia.chardi@uv.es pedro.gomez@ebd.csic.es daragones@ebd.csic.es

RESUMEN

El proyecto SpaFLEX está implementando un sistema integral de Calibración y Validación (Cal/Val) para la misión en tándem Fluorescence Explorer-Sentinel 3 (FLEX-S3). Con el fin de alcanzar medidas fiduciales in-situ, SpaFLEX establece un protocolo de intercomparaciones en interior y exterior de espectrorradiómetros de campo. En este trabajo se presenta el experimento de intercomparación llevado a cabo en conjunto con la campaña de Cal/Val en Doñana (Huelva, España) en Julio de 2025. En una configuración de mesas y trípodes, se registraron conjuntos de medidas de varios objetivos y paneles de referencia con diferentes propiedades de reflectancia. Para la adquisición de datos se emplearon cuatro espectrorradiómetros con diferentes características (ASD FieldSpec 3 y FLOX). Como último paso del protocolo de intercomparación, con el objetivo de evaluar la consistencia e interoperabilidad de los instrumentos empleados durante la campaña, se realizó un chequeo radiométrico y espectral de radiancia (L) e irradiancia (E) frente a las simulaciones de L y E del código de transferencia radiativa LibRadtran. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre las mediciones realizadas con el ASD FieldSpec 3 y las realizadas con FLOX. Por otro lado, las comparaciones intra-instrumento revelaron una mayor concordancia. El uso de simulaciones radiativas como referencia complementaria demuestra ser una herramienta eficaz para reforzar la robustez del protocolo y apoyar la evaluación de la calidad de las mediciones en el contexto de actividades de Cal/Val de FLEX.




Palabras clave: SpaFLEX, Cal/Val, espectrorradiómetros, intercomparación, LibRadtran

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026


Intercomparación “outdoor” de espectrorradiómetros de campo dentro del plan de calibración y validación SpaFLEX

Muela Pillajo, Jimmy A. ⁽¹⁾, Jiménez Michavila, Marcos ⁽¹⁾, Peón Garcia, Juan J. ⁽¹⁾, Gutiérrez de la Cámara Ara, Óscar ⁽¹⁾, Muñoz Sánchez, Félix ⁽¹⁾, Cendrero-Mateo, M^a Pilar ⁽²⁾, Moncholí-Estornell, Adrián ⁽²⁾, Chardi-Raga, Cynthia ⁽²⁾, Gómez-Giraldez, Pedro J. ⁽³⁾, Aragonés, David ⁽³⁾



⁽¹⁾ Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España.

 0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es ;  0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es
 0000-0001-7551-2236, jpeogar@inta.es ;  0000-0003-2555-9292, gutierrezcao@inta.es
 0000-0002-6421-8725, munozsf@inta.es.

⁽²⁾ Universidad de Valencia, España.

 0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es ;  0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es
 0009-0007-7886-4801, cynthia.chardi@uv.es.

⁽³⁾ Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC), España.

 0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ;  0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es

Resumen: El proyecto SpaFLEX está implementando un sistema integral de Calibración y Validación (Cal/Val) para la misión en tándem Fluorescence Explorer-Sentinel 3 (FLEX-S3). Con el fin de alcanzar medidas fiduciales in-situ, SpaFLEX establece un protocolo de intercomparaciones en interior y exterior de espectrorradiómetros de campo. En este trabajo se presenta el experimento de intercomparación llevado a cabo en conjunto con la campaña de Cal/Val en Doñana (Huelva, España) en Julio de 2025. En una configuración de mesas y trípodes, se registraron conjuntos de medidas de varios objetivos y paneles de referencia con diferentes propiedades de reflectancia. Para la adquisición de datos se emplearon cuatro espectrorradiómetros con diferentes características (ASD FieldSpec 3 y FLOX). Como último paso del protocolo de intercomparación, con el objetivo de evaluar la consistencia e interoperabilidad de los instrumentos empleados durante la campaña, se realizó un chequeo radiométrico y espectral de radiancia (L) e irradiancia (E) frente a las simulaciones de L y E del código de transferencia radiativa LibRadtran. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre las mediciones realizadas con el ASD FieldSpec 3 y las realizadas con FLOX. Por otro lado, las comparaciones intra-instrumento revelaron una mayor concordancia. El uso de simulaciones radiativas como referencia complementaria demuestra ser una herramienta eficaz para reforzar la robustez del protocolo y apoyar la evaluación de la calidad de las mediciones en el contexto de actividades de Cal/Val de FLEX.

Palabras clave: SpaFLEX, Cal/Val, espectrorradiómetros, intercomparación, LibRadtran

Outdoor intercomparison of field spectroradiometers within the SpaFLEX calibration and validation plan

Abstract: The SpaFLEX project is implementing a comprehensive Cal/Val plan for the Fluorescence Explorer – Sentinel 3 tandem mission (FLEX-S3). In order to achieve in-situ fiducial measurements, SpaFLEX establishes a protocol for indoor and outdoor intercomparisons of field spectroradiometers. This work presents the intercomparison experiment carried out in Doñana (Huelva, Spain) in July 2025. At a set-up with tables and tripods, sets of measurements were recorded for various targets and reference panels with different reflectance properties. Four spectroradiometers with distinct characteristics were employed for data acquisition (ASD FieldSpec 3 and FLOX). At the final step of the intercomparison protocol, in order to evaluate the consistency, and interoperability of the instruments employed during the campaign the L and E measurements were checked radiometrically and spectrally against LibRadtran radiative transfer code L and E simulations. The results indicate that there are significant differences between the ASD Fieldspec 3 and FLOX measurements. In contrast, intra-instrument comparisons revealed greater agreement. The use of radiative transfer simulations as a complementary reference proves to be an effective strategy to strengthen the robustness of the protocol and support the assessment of measurement quality within FLEX calibration and validation activities.

Keywords: SpaFLEX, Cal/Val, spectroradiometers, intercomparison, LibRadtran

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo nace dentro del marco del proyecto SpaFLEX (SpaFLEX.org), liderado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) que coordina el plan nacional de Calibración y Validación (Cal/Val) para la misión FLuorescence Explorer-Sentinel 3 (FLEX-S3) de la Agencia Espacial Europea (ESA). El INTA aspira a ser fundamental en el desarrollo de dicha misión y para ello, contribuye con sus avanzados sensores aerotransportados hiperespectrales y de fluorescencia de clorofila, en colaboración con equipos interdisciplinarios de la Universitat de València (LEO-UV) y la Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) (Gómez-Giráldez *et al.*, 2025).

En este enfoque, la espectrorradiometría juega un papel fundamental al ser una técnica usada para caracterización de superficies, desarrollo de modelos empíricos o físicos en varias disciplinas y apoyo a la Cal/Val en teledetección y la evaluación de incertidumbre (Badura & Dąbski, 2022). Dicha técnica es posible gracias a los espectrorradiómetros que permiten evaluar la fisiología de la vegetación, estudiar ecosistemas, agricultura de precisión y validar productos de teledetección. Sin embargo, puesto que estos instrumentos suelen caracterizarse y calibrarse en un laboratorio, bajo condiciones ambientales y de iluminación estables (Pacheco-Labrador *et al.*, 2024), al momento de usarlos en el campo, surgen diversas dificultades y factores (inestabilidades ambientales, variaciones de temperatura, humedad, polvo, y otros) que conllevan a diferencias importantes en el registro de mediciones, provocando mayor o menor incertidumbre y dificultando la exactitud de los datos, haciendo más difícil su comparación.

Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar y proponer un protocolo de inter e intra-comparación en exteriores para espectrorradiómetros de campo (ASD FieldSpec 3, FLuorescence bOX) en el marco del plan de Cal/Val de FLEX-S3, utilizando simulaciones de transferencia radiativa (LibRadtran) como referencia física. A partir de esta intercomparación, lo que se busca es garantizar una consistencia entre las medidas registradas en campo, dentro de unas condiciones ambientales y técnicas lo más similares posibles, para que puedan ser un referente sólido en los futuros procesos de Cal/Val de la misión FLEX-S3; de esta forma, poder aumentar la calidad y precisión de los productos de SIF y reflectancia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la campaña

Este trabajo presenta los resultados de un experimento de intercomparación radiométrica en exteriores realizado el 7 de julio de 2025 en el marco de la campaña de Cal/Val del proyecto SpaFLEX, llevada a cabo en el Parque Natural de Doñana, Huelva, España.

La campaña se desarrolló bajo condiciones atmosféricas favorables, caracterizadas por cielos mayormente despejados y baja variabilidad nubosa durante el periodo de adquisición, todo ello permitió realizar las mediciones bajo un régimen de iluminación solar estable. La zona de medida corresponde a un área abierta con topografía prácticamente plana y sin obstáculos cercanos que pudieran producir sombras o reflexiones.



Figura 1. Campaña de Cal/Val del proyecto SpaFLEX en el Parque Natural de Doñana (Huelva, España).

2.2. Descripción de la instrumentación

Para este experimento se emplearon cuatro espectrorradiómetros, cada uno con características espectrales y radiométricas propias:

- Dos espectrorradiómetros ASD FieldSpec3 (serie 16040) y ASD FieldSpec4 (serie 18864) (Malvern Panalytical, Reino Unido), con rango espectral nominal de 350–2500 nm y configuración VNIR + SWIR. Adecuados para mediciones de reflectancia y radiancia de campo. El instrumento ASD 16040 se calibró en abril de 2021 y el ASD 18864, en noviembre de 2020.
- Dos sistemas FLOX (JB Hyperspectral Devices, Düsseldorf, Alemania), consta de dos módulos: FLUO (650–800 nm), con alta resolución para detectar la señal SIF en las líneas de absorción de oxígeno (O_2A y O_2B), y el módulo FULL, que cubre un rango de 400 a 1000 nm para la medición de reflectancia. El sistema FLOX JB-022 fue calibrado en mayo de 2025 y FLOX JB-060 se calibró en junio de 2025.

2.3. Adquisición de datos

2.3.1. Condiciones Meteorológicas

Durante la intercomparación se prestó especial atención a la monitorización de las condiciones atmosféricas y radiación solar, factores que pueden introducir variabilidad significativa en las mediciones espectrales. Además, se caracterizó el estado de la atmósfera mediante un fotómetro solar Microtops II que proporcionó medidas de espesor óptico de aerosoles (AOD) y contenido de vapor de agua, necesarios para la posterior simulación de transferencia radiativa.

2.3.2. Procedimiento de medición

Los cuatro sensores se instalaron en un soporte común (trípode modificado) sobre una mesa de trabajo, alineando las fibras ópticas en una geometría de observación al Nadir, Figura 1. Cada instrumento fue operado por un técnico dedicado, responsable de la adquisición de datos y del registro de la información operativa. Sincronizaron los espectrorradiómetros a la hora UTC+0 y se encendieron 30 minutos antes del inicio para asegurar la estabilidad térmica de los detectores.

Se emplearon los siguientes paneles de referencia:

- Panel Blanco de Referencia (WR): Panel de Spectralon (Labsphere Inc.) de ~99% de reflectancia (calibrado), tamaño [10 × 10 cm]
- Panel Gris de Referencia (GRAY): Spectralon de ~25% de reflectancia, tamaño [10 × 10 cm]

La adquisición se organizó en 5 rondas temporales. Cada ronda, siguió la secuencia: *WR* → *GRAY* → *WR*.

2.4. Procesamiento de datos

Se inició con un preprocesado que consistió en aplicar los respectivos ficheros de calibración para obtener las radiancias en el caso del ASD y de las radiancias e irradiancias para FLOX. Se promediaron las repeticiones sobre cada panel para tener la media representativa de cada panel en cada ronda.

Dado que los sensores FLOX y ASD presentan diferentes Funciones de Respuesta Espectral (SRF) y muestreos, la comparación directa no es posible. Por ello, se definió una "malla espectral común" correspondiente a la intersección de los rangos espectrales de los instrumentos.

Además, los espectros de alta resolución del FLOX (E_{FLOX}) fueron convolucionados utilizando las funciones de respuesta gaussianas del ASD (SRF_{ASD}).

2.5. Modelado de Transferencia Radiativa

Para validar la precisión absoluta de los sensores, se generaron simulaciones de irradiancia total (directa + difusa) (E_{model}), utilizando el código de transferencia radiativa LibRadtran. El modelo fue alimentado con los parámetros atmosféricos medidos in situ por el Microtops II (AOD, Vapor de Agua, Ozono) y la geometría solar exacta (SZA) del momento de cada ronda de medición.

2.6. Intercomparación y análisis de métricas

Para evaluar cuantitativamente el grado de concordancia entre instrumentos y su proximidad a la referencia física simulada con LibRadtran, se calcularon las siguientes métricas espectrales estándar:

$$\text{Bias espectral: } Bias(\lambda) = E_{ins}(\lambda) - E_{model}(\lambda) \quad (1)$$

$$\text{Error rel. espectral: } RE(\lambda) = \frac{E_{inst} - E_{model}}{E_{model}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{RMSE espectral: } RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (E_i - E_{model})^2} \quad (3)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez procesados los datos y homogeneizados espectralmente, se procedió con la intercomparación espectral entre los instrumentos de campo (ASD y FLOX) y las simulaciones obtenidas mediante el modelo de transferencia radiativa LibRadtran.

La Figura 2 muestra la comparación de irradiancia espectral medida por los sistemas FLOX y ASD junto con la simulación radiativa para la quinta ronda. Se puede apreciar como la curva del ASD presenta valores sistemáticamente superiores a los registrados por FLOX en gran parte del dominio espectral analizado. Además, el espectro simulado mediante LibRadtran se sitúa entre ambos instrumentos, lo que sugiere que cada sensor presenta un sesgo característico respecto al modelo. La forma espectral general se conserva entre los tres, indicando coherencia en la estructura radiativa y ausencia de desviaciones espectrales severas.

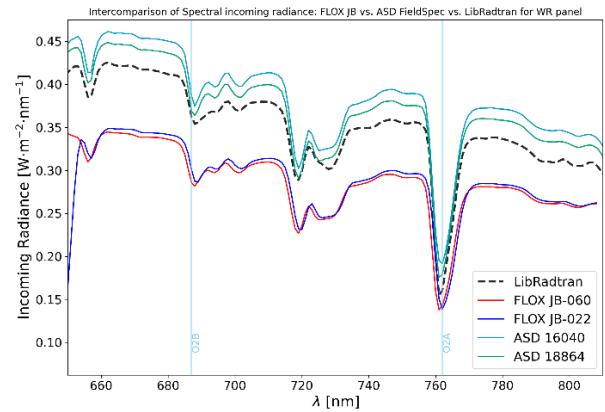


Figura 2. Comparación de irradiancia espectral entre los instrumentos FLOX JB y ASD FieldSpec frente a la simulación radiativa de LibRadtran. Las bandas O_2B (~687 nm) y O_2A (~760 nm) se indican mediante líneas verticales celestes.

La figura 3 presenta la comparación de la radiancia reflejada medida por los cuatro instrumentos enfocándose específicamente en el comportamiento de los espectrómetros en módulo "FULL" de los sistemas FLOX. Se aprecia saturación de los valores registrados por los sistemas FLOX en el rango ~450 – 680 nm.

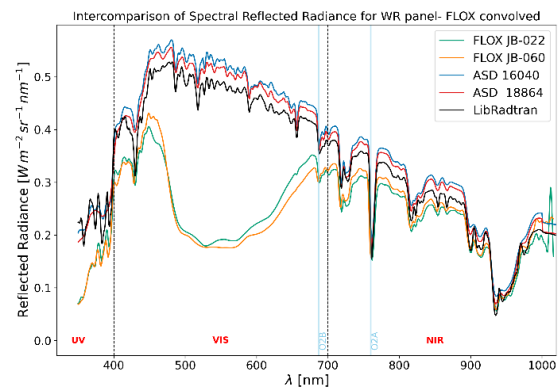


Figura 3. Comparación de radiancia espectral reflejada entre los cuatro espectrorradiómetros frente a la simulación

radiativa de LibRadtran. Las bandas O_2B (~687 nm) y O_2A (~760 nm) se indican mediante líneas verticales celestes.

La Figura 4 muestra los espectros de reflectancia aparente, calculada como el cociente entre la radiancia reflejada y la irradiancia. Se compararon los dos sistemas FLOX (módulo FLUO) y los dos ASD FieldSpec. El resultado muestra una alta concordancia entre los espectrorradiómetros con valores que oscilan aproximadamente entre 0,23 y 0,25, situándose las estimaciones de ASD entre las obtenidas por ambos sistemas FLOX. Esto permite verificar una buena consistencia inter-instrumental en la estimación de la reflectancia aparente en mediciones de campo.

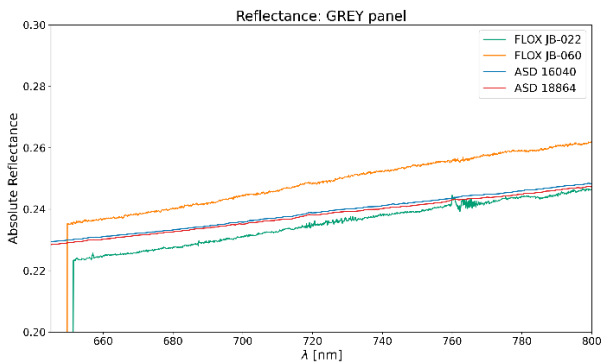


Figura 4. Intercomparación de la Reflectancia Absoluta entre las FLOX JB en modo FLUO y los ASD FieldSpec para el panel Gris.

Además del análisis gráfico, se calcularon métricas estadísticas estándar, recopiladas en la Tabla 1, que permiten sintetizar las diferencias espectrales y compararlas de forma objetiva.

Tabla 1. Métricas de intercomparación para ASD y FLOX JB respecto a LibRadtran.

Instrumento	Bias	RMSE	Error Relativo
ASD 16040	0.0241	0.0295	9.20 %
ASD 18864	0.0136	0.0211	6.29 %
FLOX-022-MP [FULL]	-0.0617	0.0673	18.08 %
FLOX-022-MP [FLUO]	-0.0600	0.0612	17.09 %
FLOX-060-MP [FULL]	-0.0625	0.0732	18.46 %
FLOX-060-MP [FLUO]	-0.0640	0.0650	18.23 %

El bias espectral confirma las tendencias observadas en las gráficas. Los instrumentos ASD presentan un sesgo positivo moderado respecto a la simulación, indicando una ligera sobreestimación de la irradiancia, mientras que los sistemas FLOX presentan sesgos negativos más pronunciados, lo que sugiere una posible subestimación radiométrica consistente.

El RMSE proporciona una medida integrada del error a lo largo del espectro. Los valores obtenidos muestran

que el ASD presenta menor dispersión respecto al modelo. Por otro lado, FLOX JB muestra mayor desviación total, coherente con su mayor error relativo.

El error relativo medio confirma que ambos instrumentos se mantienen dentro de rangos aceptables para aplicaciones de Cal/Val, aunque con claras diferencias: ~6–9% para ASD y ~17–18% para FLOX.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un ensayo de intercomparación de espectrorradiómetros de campo que va encaminado al desarrollo de un protocolo para estimar la consistencia de las medidas de estos instrumentos. La incorporación de simulaciones de transferencia radiativa (LibRadtran) resultó crítica para caracterizar el desempeño de los sensores. La irradiancia simulada por LibRadtran se sitúa consistentemente entre las medidas de los ASD (sesgo positivo) y los sistemas FLOX (sesgo negativo) confirmando la consistencia física de las observaciones.

Este comportamiento de acotación ("bracketing") valida el protocolo planteado de intercomparación y determina que la combinación de medidas de campo y modelado físico es indispensable para establecer una incertidumbre radiométrica robusta que asegure un referente sólido en los futuros procesos de Calibración y Validación.

La comparación de la reflectancia aparente entre los instrumentos muestra una alta convergencia entre los valores recuperados. Este comportamiento indica que, pese a las discrepancias sistemáticas observadas en irradiancia y radiancia, la estimación de reflectancia resulta robusta; mostrando así, que los sesgos de calibración son proporcionales y tienden a cancelarse durante el proceso de cociente L/E que recupera el factor de reflectancia.

Finalmente se puede concluir que existe una consistencia espectral general entre instrumentos es adecuada; sin embargo, hay que considerar las diferencias sistemáticas en el balance de incertidumbre.

5. REFERENCIAS

Badura, I., & Dąbski, M. (2022). Reflectance spectroscopy in geology and soil sciences: Literature review. *Quaestiones Geographicae*, 41(3), 157-167. doi:https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0031

Gómez-Giráldez, P., Aragonés, D., Jiménez, M., Cendrero-Mateo, M., Van Wittenberghe, S., Peón, J., . . . Díaz-Delgado, R. (2025). SpaFLEX: Field campaign for calibration and validation of FLEX-S3 mission products. *Engineering Proceedings*, 94(1), 13. doi:https://doi.org/10.3390/engproc2025094013

Pacheco-Labrador, J., Peón, J., Jiménez, M., Rodríguez-Pérez, J., Jiménez-Berni, J., Aragonés, D., . . . Martín, M. (2024). Quantifying the compatibility of optical reflectance factors in a field intercomparison experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3488785