



El módulo del generador de escena del Simulador end-to-end de la misión Tándem FLEX/Sentinel-3

End-to-End Simulator Scene Generator Module of the FLEX/Sentinel-3 tandem mission

Carolina Tenjo¹, Juan Pablo Rivera² Neus Sabater³ Jorge Vicent⁴ Luis Alonso⁵
Jochem Verrelst y José Moreno

Para citar este artículo: Tenjo, C., Rivera, J., Sabater, N., Vicent, J., Verrelst, J. y Moreno, J. (2016). El módulo del generador de escena del Simulador end-to-end de la misión Tándem FLEX/Sentinel-3. *Revista de Topografía Azimut*, (7), 36-44.

Recibido: 02-septiembre-2016 / **Aceptado:** 02-octubre-2016

Resumen

La misión FLEX (Fluorescence Explorer) seleccionada como el octavo Earth Explorer de la Agencia Espacial Europea (ESA), permite medir globalmente la emisión de la fluorescencia de la vegetación terrestre. FLEX volará en tándem con el satélite Sentinel-3 (S3) de Copernicus, y así obtendrá la información necesaria para la obtención de la fluorescencia. Como parte de las fases tempranas de la misión tándem FLEX/S3, se ha desarrollado un Simulador End-to-end (FLEX-E). Este documento describe el diseño del Módulo de Generación de Escenas (SGM) de FLEX-E; el SGM es capaz de generar escenas sintéticas complejas 3D, que combinan los efectos de la superficie, la topografía, la atmósfera y la geometría de observación/iluminación. El SGM se basa en la utilización de modelos de transferencia radiativa de vegetación y atmósfera, para generar escenas de radiancia en el techo de la atmósfera en alta resolución espacial y espectral para los múltiples instrumentos de la misión tándem FLEX-S3; el SGM está estructurado en cuatro bloques principales: Definición de la escena, Interacción Escena-Geometría, Modelo de propagación y Remuestreo de la escena. Cada uno de estos bloques se

detallan aquí y todo el proceso SGM es demostrado por una escena generada FLEX/S3.

Palabras clave: FLEX, fluorescencia, generador de escena, MODTRAN, SCOPE, sentinel-3, Simulador end-to-end, Tándem.

Abstract

The FLUorescence EXplorer (FLEX) mission, selected as ESA's 8th Earth Explorer, aims to globally measure the fluorescence emission from terrestrial vegetation. FLEX will fly in tandem with Copernicus' Sentinel-3 (S3) satellite that together will deliver the necessary information for fluorescence retrieval. As part of the early phase of the FLEX/S3 tandem mission, an End-to-End Mission Performance Simulator (FLEX-E) has been developed. This paper describes the design of the FLEX-E Scene Generator Module (SGM). The SGM is capable to generate complex 3D synthetic scenes that combines the effects of surface, topography, atmosphere and viewing/illumination geometry. Based on the use of vegetation and atmospheric radiative transfer models, the SGM generates high spatial and

1 Image Processing Laboratory, Universidad de Valencia (España). Correo electrónico: carolina.tenjo@uv.es
2 Image Processin Laboratory, Universidad de Valencia (España). Correo electrónico: juan.rivera@uv.es
3 Image Processing Laboratory, Universidad de Valencia (España). Correo electrónico: m.neus.sabater@uv.es
4 Image Processin Laboratory, Universidad de Valencia (España). Correo electrónico: jorge.vicent@uv.es
5 Image Processin Laboratory, Universidad de Valencia (España). Correo electrónico: luis.alonso@uv.es

spectral resolution top of atmosphere radiance scenes for the multiple instruments of the FLEX-S3 tandem mission. The SGM is built of four principal blocks: (1) Scene definition, (2) Geometry-Scene interaction (3) Forward Model and (4) Scene Resampling. Each

of these blocks are detailed here and the whole SGM process is demonstrated by a generated FLEX/S3 scene.

Keywords: end-to-end Simulator, FLEX, fluorescence, MODTRAN, scene generator, SCOPE, sentinel-3, Tandem.

INTRODUCCIÓN

La misión Fluorescence Explorer (FLEX) es la octava misión Earth Explorer de la Agencia Espacial Europea (ESA) y se lanzará en 2022; esta es la primer misión especialmente diseñada para la observación de la fluorescencia de la vegetación por medio de sensores remotos. La misión se enfoca en la obtención de la emisión de fluorescencia en el rango de las bandas de absorción del oxígeno (Cogliati, *et al.*, 2015). FLEX consiste de una plataforma sencilla con un sensor hiperespectral llamado Fluorescence Imaging Spectrometer (FLORIS, por sus siglas en inglés) que consta de dos espectrómetros de barrido que adquieren en el rango espectral entre 500–780 nm a (1) 2 nm y (2) a 0.1 nm y 0.3 nm. FLORIS tiene 300 m de resolución espacial y un tamaño de imagen de 150 km (ESA, 2015). FLEX volará en tándem con el satélite de Copernicus

Sentinel-3 (S3) (Donlon, *et al.*, 2012) para caracterizar el estado de la atmósfera y determinar los parámetros biofísicos de la vegetación necesarios para la obtención de la fluorescencia usando los instrumentos OLCI y SLSTR a bordo de S3 (Figura 1).

El simulador End-to-End (E2ES) de FLEX (FLEX-E) se ha desarrollado como parte de las fases tempranas de la misión y del proceso de selección del Earth Explorer de la ESA (Vicent, *et al.*, 2016).

FLEX-E considera todos los elementos clave del concepto de la misión tándem FLEX/S3, incluyendo la plataforma, los instrumentos y el procesamiento de datos. Los requerimientos y objetivos de la misión se pueden consolidar y verificar por medio del análisis detallado del rendimiento calculado.

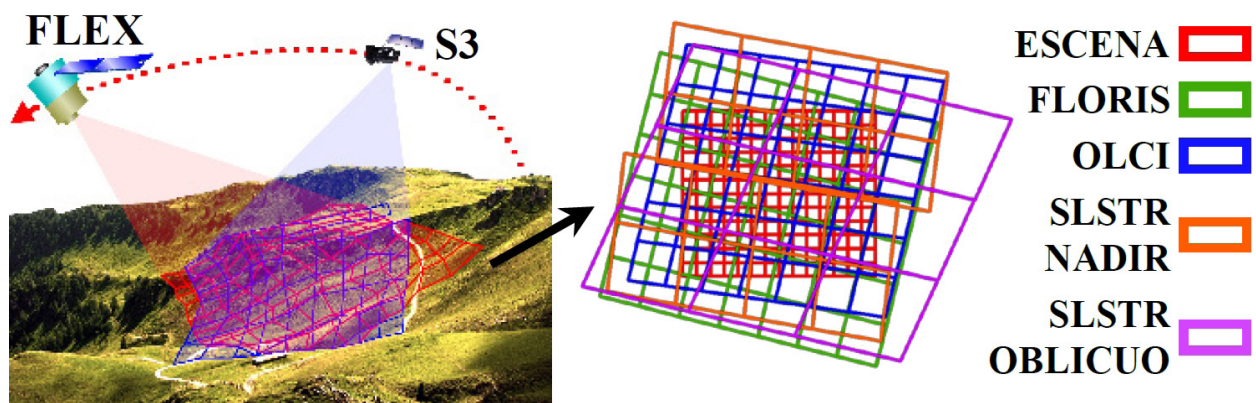


Figura 1. Izq: Sinergia entre FLEX y S3. Der: ejemplo de la superposición de las rejillas de píxeles de FLORIS (verde), OLCI (azul), SLSTR nadir (naranja) y SLSTR oblicuo (morado) sobre la escena (rojo)

La Figura 2, muestra la arquitectura modular de alto nivel de FLEX-E (Negueruela, *et al.*, 2012), la cual incluye el Módulo de Geometría (GM), el Módulo Generador de Escena (SGM), el Módulo del Instrumento (IM), el Módulo de procesado de Nivel-1 (L1PM), el Módulo de obtención de parámetros (L2RM) y el Módulo de Evaluación de la Misión (PEM).

Todos los módulos se desarrollaron por diferentes socios industriales y científicos de manera independiente, estos se han integrado dentro de una estructura genérica de simulación para facilitar la configuración y la ejecución de una cadena de simulación (Vicent *et al.*, 2016). Para facilitar la operatividad de FLEX-E, los módulos se ejecutan de manera secuencial tal como se muestra en la Figura 2. GM se ejecuta primero, proporcionando la geometría de observación de cada sensor sobre la escena definida. Esta geometría, junto con los parámetros de configuración de la escena, se utiliza entonces por el SGM, para generar las escenas de alta resolución

espectral/espacial para cada sensor involucrado en la misión tándem FLEX/S3. Luego la escena es adquirida por IM y procesada por L1PM. Por último, el L2RM lleva a cabo las operaciones de obtención de la fluorescencia utilizando el conjunto combinado de datos de Nivel-1 de FLEX y S3. El PEM se ejecuta al final de la cadena de simulación y compara los productos de Nivel-1 y Nivel-2 (salidas desde L1PM y L2RM) contra los datos de referencia de la geometría y de la escena (GM y SGM) (Vicent. *et al.*, 2016).

El SGM juega un papel clave en el análisis, desarrollo y diseño de futuras misiones espaciales. La escena consiste en un hipercubo de radiancias en el techo de la atmósfera (TOA) que ha sido simulado teniendo en cuenta la superficie (topografía, firma espectral, los efectos del subsuelo, etc.), las características atmosféricas (absorción / dispersión de aerosoles, vapor de agua, oxígeno, ozono, nubes, temperatura, etc.) y la geometría de observación e iluminación (sombras).

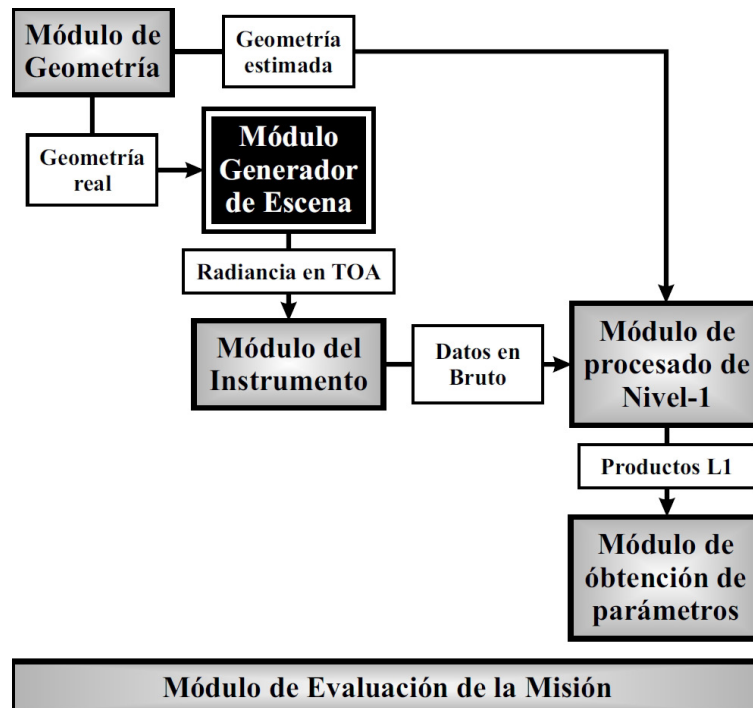


Figura 2. Estructura Modular y flujo de datos del E2E

Este documento describe el diseño y desarrollo del SGM de FLEX-E y muestra una escena simulada situada en la isla de Mallorca (España).

MÓDULO GENERADOR DE ESCENA DE FLEX-E

El SGM se encarga de la simulación de la escena que será observada por los instrumentos de FLEX y S3; para una misión óptica pasiva, la escena consiste en un hipercubo de radiancias en TOA con una resolución espectral/espacial más alta que la del instrumento. La generación de la escena incluye la topografía superficial, la distribución espacial de los parámetros bio/geofísicos y la geometría de observación/iluminación.

Estas variables sirven como entrada para la generación de la radiancia en TOA mediante el uso de modelos de transferencia radiativa (RTMs) de superficie/atmósfera o de datos radiométricos externos. El SGM se divide en cuatro bloques (Figura 3) que se detallan las secciones siguientes: definición de la escena, interacción geometría-escena, modelo de Propagación, y remuestreo de la escena.

Definición de la escena

El SGM de FLEX-E genera una rejilla UTM ortogonal definida por la ubicación y fecha seleccionadas por el usuario; la escena no se define por la geometría de plano focal del sensor. Esta rejilla común mantiene la consistencia en las escenas generadas por diferentes instrumentos/plataformas de la misión FLEX / S3 volando sobre ella (Figura 1).

El ejemplo de la escena de Mallorca consta de un área de 109 x 84 km con un tamaño de rejilla de la escena de 100 m definido por cuatro esquinas en las coordenadas UTM [436000 545000] E y [4343000 4427000] N zona UTM Z31N.

La geometría de observación/iluminación y los efectos atmosféricos sobre la superficie dependen de la topografía de la superficie; la topografía se puede simular usando un modelo de elevación digital (DEM) sintético o realista, en la escena de Mallorca se utilizó un DEM realista.

El RTM SCOPE (Van der Tol *et al.*, 2009), que utiliza como entradas el contenido de clorofila (Cab) y el índice de área foliar (LAI), se utilizó para

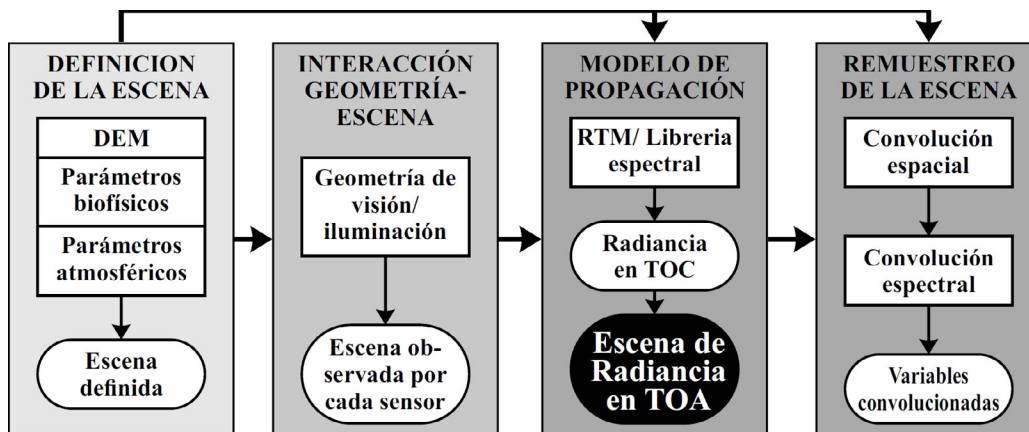


Figura 3. Estructura de bloques del SGM

generar los espectros de reflectividad y de fluorescencia de vegetación de alta resolución. La distribución espacial de estos parámetros en la escena, se hace mediante un mapa de clases, cada una de estas clases se caracteriza por un mínimo y un máximo valor de Cab y LAI que se distribuyen de manera lineal, radial, concéntrica o aleatoria dentro de cada clase. Para las clases que no corresponden a la vegetación, se utilizan librerías espectrales características de cada superficie, por ejemplo, agua, tierra, asfalto, etc.; en el ejemplo de Mallorca, se utilizó el mapa de usos del suelo de Corine Land Cover, y la distribución de Cab y LAI se hizo de acuerdo a datos reales.

La atmósfera se define sobre la rejilla de la escena a través de un conjunto de parámetros atmosféricos importantes; de acuerdo con Guanter *et al.*, (2009), el espesor óptico de aerosoles (AOT), el tipo de aerosol y la columna de vapor de agua (CWV) son los parámetros clave adecuados para describir adecuadamente el estado atmosférico de la escena. La modelización atmosférica se realiza principalmente por medio de tablas de búsqueda (LUT) atmosféricas creadas previamente a partir del RTM atmosférico MODTRAN (Berk *et al.*, 1987); el tipo de atmósfera se selecciona de acuerdo a la ubicación y fecha de la escena (atmósfera tipo latitud media de verano/invierno, tropical o sub-ártico de verano/invierno), cada tipo atmosférico se caracteriza por sus perfiles de temperatura/presión y concentración de gases. Debido al impacto sobre los productos de la misión FLEX y su variabilidad espacial y temporal, el CWV y el ozono se modifican con respecto a sus valores por defecto; estos valores se distribuyen sobre la escena teniendo en cuenta la topografía de la superficie. La distribución de los tipos de aerosoles (es decir, rural, urbano, marítimo y desierto) se realiza de acuerdo a la asignación en el mapa de clases.

La simulación de nubes se tiene en cuenta también, las nubes brillantes pueden producir efectos de los instrumentos como la dispersión luminosa, la saturación de píxeles o sombras; el modelado espectral de la nube en el SGM se hace mediante el uso de

una LUT generada con MODTRAN de acuerdo con la geometría de observación/iluminación y un conjunto de propiedades ópticas/físicas de nubes. Especialmente, las nubes en la escena se consideran como un conjunto de vectores en un espacio cartesiano 3D definido por las altitudes superiores e inferiores en la nube, la distribución espacial puede ser una máscara sintética o una máscara realista. El modelamiento de la dinámica temporal de las nubes se simula mediante un cambio en la máscara de nubes visto por FLORIS con respecto a cada instrumento de S3, de acuerdo con una base de datos sobre los campos de viento extraída del ECMWF (ECMWF, 2015). En la escena de Mallorca se define una cobertura de 10% nubes con distribución espacial realista.

Interacción geometría-escena

Cada instrumento de la misión FLEX/S3 observará la escena desde una posición y tiempo diferente, la geometría de visión de cada instrumento se obtiene a partir de la posición del satélite y la línea de visión de cada píxel en el instrumento expresada en coordenadas ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed). Se realiza la transformación del vector de observación expresa en ECEF en un sistema local ENU (East North Up) cartesianas referenciado por punto de la escena (Grewal *et al.*, 2006). Teniendo en cuenta la geometría 3D completa (ubicación y topografía) y la fecha de adquisición de la escena, los ángulos solares y de iluminación se calculan de acuerdo con Reda & Andreas, (2003); las intersecciones de las geometrías de visualización/solares con el terreno y las nubes se calculan ambas de la misma manera: para cada punto de la escena se proyecta un perfil topográfico de dos dimensiones dado por los ángulos azimutales solar/visualización, luego, se calcula la intersección entre el vector de iluminación/visión y el perfil topográfico; por una parte, si el vector solar se cruza con el perfil topográfico o con un vector de nubes, es un punto de sombra (Figura 4); por otra parte, el punto de la escena que es realmente visto por el sensor será el último en la intersección (Figura 4b), este puede ser otro punto de la escena o una nube.

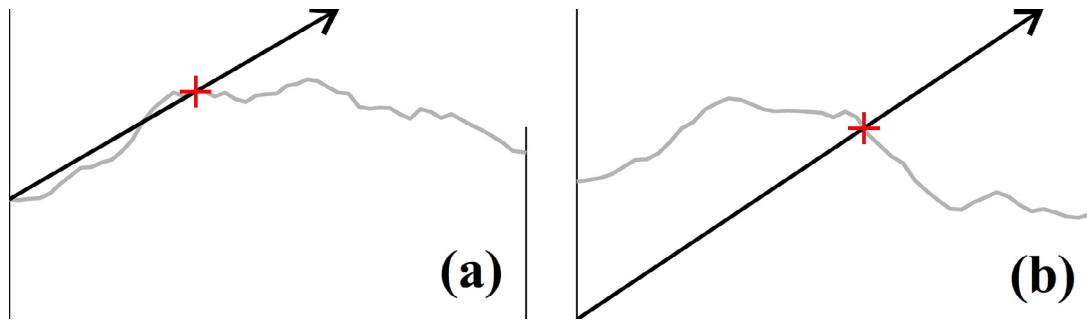


Figura 4. Intersección de los vectores solar (a) y de visión (b) con el DEM

Modelo de propagación

La radiancia en TOA se calcula a partir de la reflectividad de la superficie y los mapas de emisión de fluorescencia y la propagación de la radiancia a través de la atmósfera; el SGM de FLEX-E se basa en el uso del RTM MODTRAN; la reflectividad de la superficie y la emisión de fluorescencia dependen de la radiación solar y de la caracterización de atmósfera. Los factores se tienen en cuenta para definir los flujos de radiancia hacia abajo y hacia arriba, esto permite acoplar los RTM de

superficie y de atmósfera y mantener la coherencia entre ellos; el acoplamiento entre los RTM en el SGM de FLEX-E se hace según Verhoef y Bach (2012), teniendo en cuenta la función de distribución de reflectividad bidireccional (BRDF). Las contribuciones de la radiancia TOA provienen de la atmósfera (L_{p0}), la escena ($L_{BOA}\tau_{oo}$) y los alrededores ($L_{adj}\tau_{do}$) (Figura 5). Teniendo en cuenta que la emisión de fluorescencia es una pequeña perturbación en la ecuación de transferencia radiativa, puede ser tomada como una fuente adicional de radiancia emitida por la superficie.

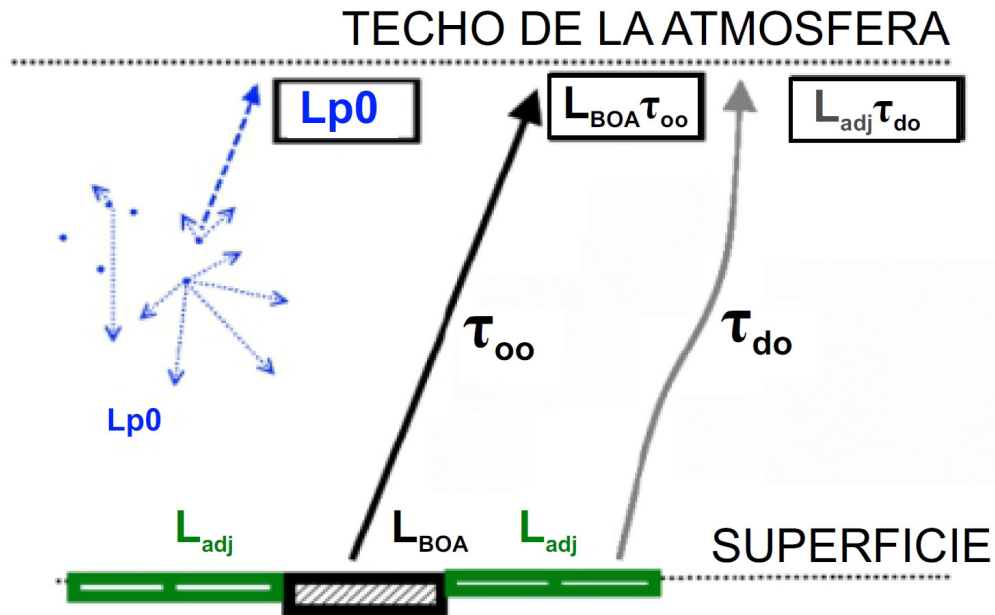


Figura 5. Contribuciones a la radiancia en TOA total

En la figura 6, se muestra un ejemplo de la cadena de procesamiento de SGM.

Remuestreo de la escena

En este bloque se hace el remuestreo espacial/espectral de la escena a la resolución de cada instrumento, las salidas remuestreadas se utilizan como datos de referencia para la evaluación del

desempeño de los productos de nivel 1 y 2 en el PEM. La reclasificación espacial se realiza mediante una función cuadrada de dispersión de punto utilizada para la convolucionar las salidas de alta resolución espacial del SGM a cada píxel de cada instrumento (Figura 7). El remuestreo espectral se realiza mediante la aplicación de la función de respuesta espectral del instrumento para cada canal espectral de cada instrumento.

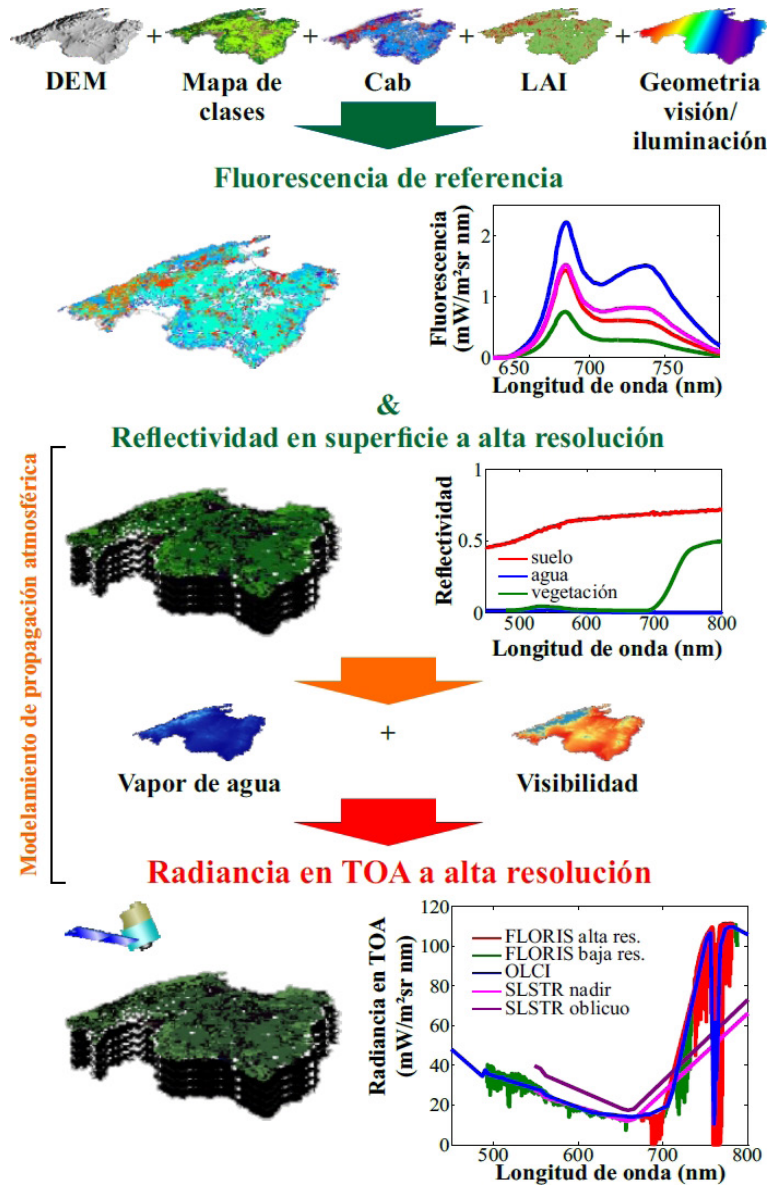


Figura 6. Ejemplo de la cadena de procesamiento del SGM, simulando la radiancia en TOA de la isla de Mallorca. Los espectros de fluorescencia y de reflectividad de la vegetación son generados por el RTM SCOPE. En el gráfico inferior, se muestra un espectro de vegetación de radiancia en TOA común para cada uno de los sensores

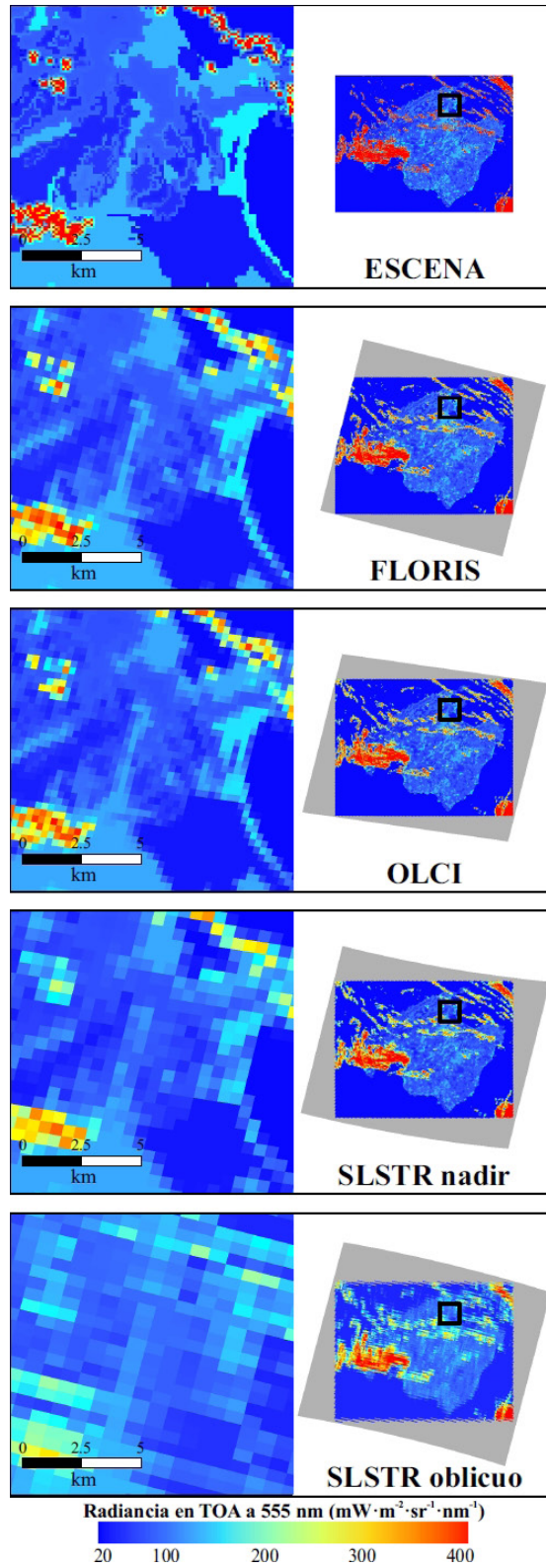


Figura 7. Mapas de validación de radiancia en TOA a 555 nm obtenidos para cada instrumento. Der: posición de la escena con respecto al paso instrumento. Las sombras grises son las huellas de los sensores. Izq: zoom del cuadrado negro que está en la parte superior

CONCLUSIONES

El desarrollo del SGM de FLEX-E se ha presentado en este documento, la complejidad de la misión FLEX/S3 que incorpora diversos instrumentos (FLORIS, OLCI y SLSTR) con diferente resolución espectral/espacial y rango espectral abre la posibilidad de implementar el SGM en cualquier misión óptica pasiva.

El SGM de FLEX-E ha sido determinante en la selección de FLEX como misión Earth Explorer debido al realismo de los efectos ambientales simulados, por ejemplo, la variabilidad natural de los parámetros atmosféricos / biofísicas clave, el uso de RTMs, o la consideración de los efectos de reflectividad bidireccional.

REFERENCIAS

- Berk, A., Bernstein, L.S. y Robertson, D.C. (1987). *MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN*.
- Cogliati, S., et al., (2015). Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. *Remote Sens Environ*, 169, 344–357.
- de Negueruela, et al., (2012). *ARCHEO-E2E: A reference Architecture for Earth Observation end-to-end Mission Performance Simulators*. SESP, Simulation and EGSE facilities.
- Donlon, C., et al., (2012). The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sens Environ*, 120, 37–57.
- ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). (XXXX). *MACC Project - Reanalysis of Global Atmospheric Composition*. Recuperado de <https://www.gmes-atmosphere.eu/services/gac/reanalysis/>
- ESA (2015). *Report for Mission Selection: FLEX (SP-1330-2)*.
- Grewal, M.S., Weill, L.R. y Andrews, A.P. (2006). Appendix C: Coordinate Transformations. In: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley y Sons, Inc., pp.456–501.
- Guanter, L., Richter, R. y Kaufmann, H. (2009). On the application of the {MODTRAN4} atmospheric radiative transfer code to optical remote sensing. *Int J Remote Sens*, 30(6), 1407-1424.
- Reda, I. y Andreas, A. (2003). *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*. NREL-National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep. NREL/TP-560-34302.
- Van Der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, A. y Su, Z. (2009). An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 6(12), 3109–3129.
- Verhoef, W. y Bach, H. (2012). Simulation of Sentinel-3 images by four-stream surface-atmosphere radiative transfer modeling in the optical and thermal domains. *Remote Sens Environ*, 120, 197–207.
- Vicent, J., et al., (2016). FLEX End-to-End Mission Performance Simulator. *IEEE T Geosci Remote*, 54(7), 4215–4223.