



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,  
Cartográfica y Topográfica

Aplicación de modelos de transferencia radiativa en una  
metodología para la obtención de aerosoles a partir de  
imágenes de satélites de alta resolución

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación

AUTOR/A: Solá Ferrer, Javier

Tutor/a: Porres de la Haza, María Joaquina

Cotutor/a: Coll Aliaga, Peregrina Eloína

Director/a Experimental: Lorenzo Sáez, Edgar

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## **COMPROMISO**

"El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía"

## RESUMEN

Este trabajo propone una metodología avanzada para la obtención de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) a partir de imágenes de alta resolución proporcionadas por el satélite Sentinel-2 y utilizando modelos de transferencia radiativa en forma de LUTs (Look-Up Tables). El proceso comienza con la descarga y el filtrado de imágenes satelitales mediante un proceso automatizado desarrollado en Google Earth Engine (GEE). Estas imágenes se seleccionan cuidadosamente para asegurar que sean representativas de las condiciones atmosféricas en los días de interés. Para la caracterización precisa de las propiedades atmosféricas en los días seleccionados, se utilizan datos de la red AERONET (AErosol RObotic NETwork), que proporciona información detallada sobre la concentración de aerosoles y sus características atmosféricas.

El modelo de transferencia radiativa 6SV (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) se emplea para generar las LUTs necesarias para el cálculo del AOD. Estas tablas de búsqueda permiten una rápida y eficiente conversión de las señales radiométricas observadas por el satélite y la información de AERONET en valores de AOD. El cálculo del AOD se realiza pixel a pixel utilizando un código desarrollado en Python, que integra los datos de las imágenes satelitales con las LUTs.

Los resultados obtenidos demuestran que la metodología propuesta permite la estimación de AOD a partir de imágenes satelitales de alta precisión, incluso en entornos urbanos complejos. Esta metodología tiene como objetivo no solo proporcionar una herramienta valiosa para el monitoreo continuo de la calidad del aire, sino que también facilitar la evaluación del impacto de los aerosoles en la salud pública y el clima. La capacidad para realizar estos cálculos con una alta resolución espacial y temporal ofrece un potencial significativo para mejorar la gestión ambiental y la investigación sobre la influencia de los aerosoles en la atmósfera.

**Palabras claves:** AOD, Sentinel-2, 6SV, teledetección, GEE.

## **ABSTRACT**

This work proposes an advanced methodology for obtaining Aerosol Optical Depth (AOD) from high-resolution images provided by the Sentinel-2 satellite, using radiative transfer models in the form of Look-Up Tables (LUTs). The process begins with the automated downloading and filtering of satellite images through a script developed in Google Earth Engine (GEE). These images are carefully selected to ensure they are representative of atmospheric conditions on the days established. For precise characterization of atmospheric properties on the selected days, data from the AERONET (AErosol RObotic NETwork) network are utilized, providing detailed information on aerosol concentration and its atmospheric characteristics.

The 6SV radiative transfer model (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) is used to generate the necessary LUTs for AOD retrieval. These look-up tables enable rapid and efficient conversion of radiometric signals observed by the satellite and AERONET data into AOD values. AOD calculations are performed pixel by pixel using a Python code, which integrates satellite image data with the LUTs.

The results demonstrate that the proposed methodology allows for the estimation of AOD from satellite images with high precision, even in complex urban environments. This methodology aims not only to provide a valuable tool for continuous air quality monitoring but also to facilitate the assessment of aerosol impacts on public health and climate. The ability to perform these calculations with high spatial and temporal resolution offers significant potential for enhancing environmental management and research on the influence of aerosols in the atmosphere.

**Keywords:** AOD, Sentinel-2, 6SV, remote sensing, GEE

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Geolocalización de las estaciones fijas de calidad del aire (rojo) y la red de sensores de dosimetría pasivos (azul).....	9
Figura 2. Imagen del satélite Terra incorporado con el instrumento MODIS .....	15
Figura 3. Imagen del producto de NO <sub>2</sub> obtenida a partir del satélite Sentinel-5P sobre la ciudad de Valencia.....	16
Figura 4. Estructura de los procesos llevados a cabo en el proyecto.....	23
Figura 5. Interfaz principal de ALG, configuración general de la LUT.....	28
Figura 6. Interfaz principal de ALG, datos clave de entrada.....	28
Figura 7. Interfaz principal de ALG, configuración espectral.....	29
Figura 8. Esquema del proceso de la generación de las LUTs .....	31
Figura 9. Ejemplo de variables de entrada y valores para la fecha 15 de febrero de 2018.	32
Figura 10. Esquema del proceso de cálculo de la imagen AOD .....	34
Figura 11. Esquema del cálculo pixel a pixel de la radiancia TOA .....	35
Figura 12. Esquema del cálculo de imagen AOD .....	37
Figura 13. Imagen AOD obtenida sobre la ciudad de Valencia, a partir de la metodología descrita en el trabajo .....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de algunas de las características de algunos de los satélites empleados para la obtención de productos AOD .....	17
Tabla 2. Listado de las bandas espectrales pertenecientes al Sentinel-2 .....	18
Tabla 3. Primera selección de imágenes Sentinel-2 (filtrado por fecha y porcentaje de cobertura nubosa). .....	19
Tabla 4. Extracto de datos del producto AOD nivel 2.0 generada por la estación AERONET de Burjassot.....	22
Tabla 5. Listado de metadatos de las imágenes descargadas de Sentinel-2 Nivel 1C.....	26

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	6
1.1	<i>Introducción</i> .....	8
1.2	<i>Objetivos</i> .....	13
1.2.1	<i>Objetivo General</i> .....	13
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	13
2.	DATOS .....	14
2.1	<i>Datos satelitales</i> .....	14
2.1.1	<i>Selección de la herramienta satelital</i> .....	14
2.1.2	<i>Sentinel-2(MSI)</i> .....	17
2.2	<i>Aerosoles</i> .....	20
2.2.1	<i>Propiedades</i> .....	20
2.2.2	<i>AERONET</i> .....	21
3.	METODOLOGÍA .....	23
3.1	<i>Estructura de procesos</i> .....	23
3.2	<i>Imágenes Sentiel-2 BOA y TOA</i> .....	24
3.2.1	<i>Procesado de imágenes en Google Earth Engine (GEE)</i> .....	24
3.2.2	<i>Enmascaramiento de nubes y sombras S2Cloudless</i> .....	24
3.2.3	<i>Metadatos de las imágenes Sentinel-2</i> .....	25
3.3	<i>Generación de Look-up tables (LUTs)</i> .....	26
3.3.1	<i>Modelos de transferencia radiativa (RTM) – 6SV</i> .....	26
3.3.2	<i>La herramienta Atmospheric Look-up table Generator (ALG)</i> .....	27
3.3.2.1	<i>Descripción del software</i> .....	27
3.3.2.2	<i>Proceso de creación LUT – ALG</i> .....	29
3.3.3	<i>Cálculo del AOD</i> .....	34
4.	RESULTADOS .....	38
5.	CONCLUSIONES .....	40
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	41
7.	ANEXOS .....	44
7.1	<i>Anexo 1: Fichas de misiones Satelitales</i> .....	44

7.2	<i>Anexo 2: Imágenes Sentinel-2 y sus parámetros atmosféricos (AERONET) .....</i>	<i>48</i>
7.3	<i>Anexo 2: Código GEE – Enmascaramiento S2Cloudless .....</i>	<i>49</i>
7.4	<i>Anexo 4a: Código Python – Función lectura y tratamiento de las LUTs .....</i>	<i>51</i>
7.5	<i>Anexo 4b: Código Python – Lectura de imágenes Sentinel-2 .....</i>	<i>52</i>
7.6	<i>Anexo 4c: Código Python – Cálculo del AOD .....</i>	<i>53</i>
7.7	<i>Anexo 4d: Código Python – Creación de la imagen ráster de AOD.....</i>	<i>54</i>
7.8	<i>Anexo 5: Código Python – Programa principal que ejecuta todas las funciones para la creación de la imagen AOD.....</i>	<i>55</i>

# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

La contaminación del aire es la principal causa ambiental de muertes prematuras en la Unión Europea (UE), causando aproximadamente 659.000 muertes al año (Lelieveld et al., 2019). El último informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (European Environmental Agency, 2020) señala que la exposición a la contaminación atmosférica, tanto a corto como a largo plazo, está relacionada con diversas enfermedades, incluyendo derrames cerebrales, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cánceres de tráquea, bronquios y pulmón, agravamiento del asma e infecciones de las vías respiratorias bajas. Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) presenta evidencia sobre la asociación entre la contaminación del aire y afecciones como la diabetes tipo 2, la obesidad, la inflamación sistémica, la enfermedad de Alzheimer y la demencia.

La ciudad de Valencia es la tercera ciudad más grande de España con 800.000 habitantes y representa el 16% de la población de la Comunitat Valenciana. Por su tamaño también sufre muchos de los problemas de las grandes aglomeraciones urbanas, La mayoría de los europeos viven, principalmente, en las zonas urbanas y metropolitanas, donde la contaminación atmosférica puede alcanzar niveles elevados por diversos motivos, uno de ellos siendo las emisiones generadas del tráfico rodado impulsado por motores de combustión.

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer ha clasificado la contaminación atmosférica, en particular las PM2.5, como una de las principales causas de cáncer. Por otro lado, una reciente revisión mundial ha descubierto que la exposición crónica a este tipo de contaminantes puede afectar a todos los órganos del cuerpo, complicando y agravando las condiciones de salud existentes previamente. Así, por ejemplo, según Liu C. et al. (2019), la ciudad de València es la segunda ciudad con peor calidad del aire en España (detrás de Barcelona y muy por delante de Madrid) con valores de partículas PM2,5 estimados en 16,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , afectando también al total de la zona metropolitana.

La UE lleva décadas trabajando para mejorar la calidad del aire controlando las emisiones de sustancias nocivas a la atmósfera, mejorando la calidad de los combustibles e integrando los requisitos de protección del medio ambiente en los sectores del transporte, la industria y la energía.

La política de aire limpio de la UE se basa en tres pilares principales:

- (1) las Directivas sobre la calidad del aire (UE, 2004, 2008), que establecen normas de calidad del aire de calidad del aire y exigen a los Estados miembros a evaluar la calidad del aire y a aplicar planes de calidad del aire para mejorar o mantener la calidad del mismo
- (2) la Directiva NEC (UE, 2016), que establece compromisos nacionales de reducción de emisiones;
- (3) La legislación sobre fuentes específicas que establece normas específicas de emisión y eficiencia energética para fuentes clave de contaminación atmosférica contaminación del aire.

Actualmente, las redes de vigilancia de la calidad del aire en España disponen de más de 600

estaciones de medición fijas distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional, con más de 4.000 analizadores en funcionamiento.

La Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica (R.V.V.C.C.A.) fue establecida a mediados de los años 90 para monitorear la calidad del aire en las principales zonas urbanas e industriales de la Comunidad Valenciana. En la ciudad de Valencia, existen varias estaciones que integran esta red. Compuesta por estaciones fijas distribuidas a lo largo del territorio valenciano, la red realiza el seguimiento de los niveles de contaminantes en el aire (Figura 1). El objetivo principal de la RVVCCA es informar a la población sobre la calidad del aire y contribuir a prevenir el incumplimiento de los límites de contaminación fijados por la OMS, adoptando medidas para evitar que estos límites sean superados. La calidad del aire se evalúa conforme a la normativa derivada de la Directiva Europea 2008/50/CE sobre la calidad del aire y una atmósfera más limpia en Europa, implementada en España a través del Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, modificado por el Real Decreto 39/2017, de 27 de enero.

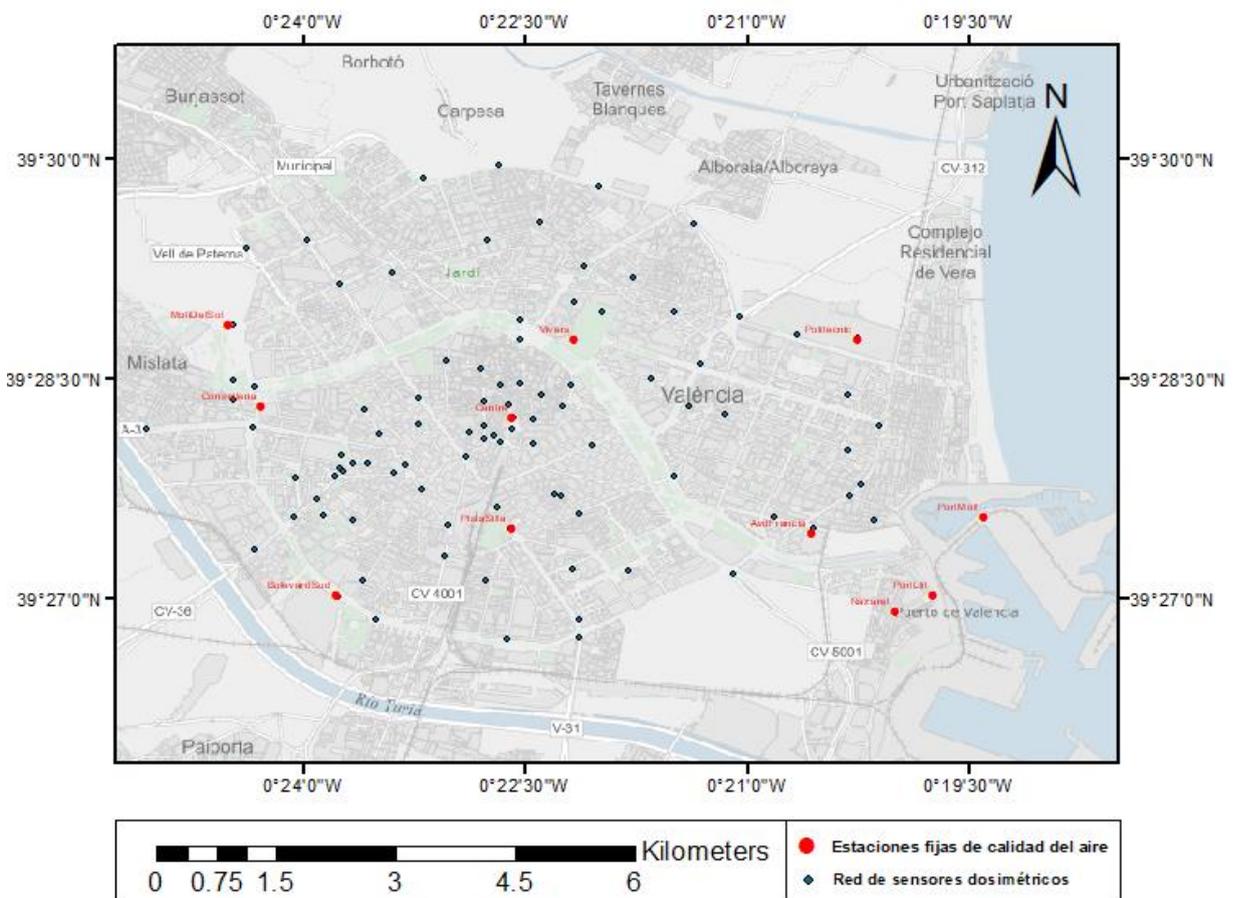


Figura. 1. Geolocalización de las estaciones fijas de calidad del aire (rojo) y la red de sensores de dosimetría pasivos (azul).

Esta normativa define los Objetivos de Calidad del Aire para cada uno de los contaminantes

regulados, como SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Pb, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CO, O<sub>3</sub>, As, Cd, Ni y B(a)P, además de especificar los criterios de agregación y cálculo correspondientes (artículo 4). Se establecen valores límite y umbrales de alerta para estos contaminantes, excepto para el ozono, que tiene valores objetivo, umbrales de información y alerta. La normativa también regula la evaluación, el mantenimiento y la mejora de la calidad del aire en relación con estas sustancias.

La representatividad de las medidas en las ciudades es claramente insuficiente para establecer valores medios fiables para establecimiento de niveles de alerta (Lorenzo-Sáez et al. 2021), pero tampoco estas pocas estaciones pueden representar la distribución de la contaminación para cada microambiente de la ciudad (barrio o manzana). Esto refleja que los niveles de calidad del aire ofrecidos por las estaciones fijas no son representativas ni fiables para el control de la calidad del aire ciudad. Por lo tanto, las estaciones fijas que operan actualmente no brindan información confiable sobre las áreas de la ciudad donde la mayoría de la población respira aire con mayor nivel de contaminación. Esto demuestra que es necesario un sistema complementario que aporte mayor resolución espacial para obtener valores representativos de la calidad del aire de la ciudad.

Debido a la deficiencia en la cobertura espacial y temporal de las observaciones en campo de los contaminantes anteriormente nombrados, surge la necesidad de una nueva aproximación para la adquisición de estos datos mediante el uso de sistemas de teledetección satelitales. Para ello, es necesario la estimación precisa de la carga de aerosoles en la atmósfera debido a su estrecha relación con el contenido en partículas en el aire y a su vez el impacto en el clima, el ecosistema y la salud (Shiraiwa et al., 2017). Aerosol optical Depth/thickness o Espesor Óptico de Aerosoles (AOD/AOT) es una medida adimensional que describe la cantidad de aerosoles presentes en una columna vertical de la atmósfera. Específicamente, el AOD indica la fracción de luz solar que es absorbida o dispersada por los aerosoles a lo largo de esa columna atmosférica. Un valor de AOD bajo indica una atmósfera más clara con menos aerosoles, mientras que un valor alto sugiere una mayor concentración de aerosoles. Es una variable clave para evaluar el impacto de los aerosoles en el clima y la calidad del aire.

En los últimos 50 años, se han desarrollado varios métodos avanzados para mejorar la precisión y la resolución espacial de la recuperación del AOD a partir de mediciones satelitales sobre diversos tipos de superficies terrestres. Entre estos métodos se encuentra, el algoritmo Dark Object Subtraction (DOS), el Deep Blue (DB) (Hsu et al., 2013), el Dark Target (DT) (Kaufman et al., 1997), el Minimum Reflectance Technique (MRT), el Land Surface Reflectance Code (LaSRC) o el Sen2cor (Marujo et al., 2021). Estos algoritmos se basan en la inversión de modelos de transferencia radiativa (RTM) cuya función es la modelización de la dispersión y absorción de la radiación solar por culpa de los aerosoles, gases y moléculas de agua en la atmósfera. La función principal del AOD en el ámbito satelital es la corrección atmosférica de las imágenes y generar productos de reflectancia superficial (reflectancias reales). A partir de la reflectancia aparente (top-of-atmosphere/TOA) (previa a la corrección) que reciben los sensores satelitales y conociendo la reflectancia superficial (bottom-of-atmosphere/BOA), el AOD puede obtenerse (1):

$$\rho_{TOA} = \rho_{ATM} + \frac{T_{atm}(\theta_s)T_{atm}(\theta_v)\rho_{BOA}}{(1 - S_{atm}\rho_{BOA})} \quad (1)$$

Donde,  $\rho_{TOA}$  es la reflectancia TOA,  $\rho_{ATM}$  es la reflectancia atmosférica,  $\rho_{BOA}$  es la reflectancia superficial,  $S$  es el ratio de dispersión atmosférico,  $T_{atm}(\theta_s)$  and  $T_{atm}(\theta_v)$  son las transmitancias de la atmósfera de los ángulos cenitales para el sol( $\theta_s$ ) y el satélite( $\theta_v$ ).

### **Dark Object Subtraction**

El método DOS necesita de la existencia de objetos oscuros en la imagen. La reflectancia superficial ( $\rho_{BOA}$ ) de las zonas oscuras es próxima a 0, mientras que las reflectancias en el sensor ( $\rho_{TOA}$ ) adquieren valores distintos a 0, que son el resultado del paso de la radiación por la atmósfera, ( $\rho_{ATM} = \rho_{TOA}$ ). Para calcular la reflectancia en la superficie ( $\rho_{BOA}$ ), se resta la  $\rho_{TOA}$  obtenida en los píxeles oscuros de la imagen, a todos los píxeles de la imagen. Este método asume que la atmósfera es espacialmente uniforme sobre la imagen.

### **Dark Target**

El método DT se fundamenta en que la atmósfera apenas afecta a la reflectancia aparente ( $\rho_{TOA}$ ) de un objeto oscuro (por ejemplo, vegetación densa) en la banda infrarrojo medio (Mid-IR), por lo que la reflectancia aparente de ese objeto en esa banda es prácticamente igual a su reflectancia superficial ( $\rho_{SUP}$ ). Utiliza también, la relación que se establece entre la reflectancia de la banda del infrarrojo medio y la reflectancia de las bandas azul y roja. A partir de aquí, al tomar una imagen, la banda Mid-IR permitirá calcular la reflectancia superficial en las bandas azul y roja. Este método tiene el inconveniente de que sólo es posible calcular la reflectividad superficial en áreas de vegetación densa donde es ampliamente utilizado.

### **Deep Blue**

El método DB es similar al DT, salvo que este algoritmo permite el cálculo de la reflectancia superficial en áreas que reflejan la luz, como regiones desérticas, semiáridas y urbanas. El método se fundamenta en las características de la banda "azul profundo" (0,412  $\mu$ m). En esta banda se diferencian bien los valores debidos a los aerosoles (que tienden a ser elevados), de la reflectancia de la superficie (con valores menores, entre 0 y 0,1). Este método permite una mayor cobertura espacial frente al método DT, que sólo es válido para superficies oscuras.

En la última década, gracias a la mejora de la accesibilidad de las bases de datos de imágenes, a la posibilidad de combinar información entre las imágenes de sensores distintos y a la aparición de plataformas y recursos que permiten el análisis de grandes cantidades de información, se han desarrollado metodologías basadas en series temporales. Estos métodos asumen que la reflectancia de la superficie es constante en un determinado intervalo de tiempo y que solo algunos de los valores del píxel se ven afectados significativamente por los aerosoles.

#### **Minimum Reflectance Technique**

El método MRT consiste en construir imágenes donde cada pixel (invariante en el tiempo) almacene el valor más bajo de una serie temporal amplia. Para evitar errores provocados por sombras o nubes, en ocasiones, se modifica la metodología seleccionando el segundo valor más bajo. Se realiza una imagen MRT para cada época del año.

#### **Land Surface Reflectance Code**

El método LaSRC se basa en las fuertes relaciones espectrales entre la banda del rojo y del azul, y la relación del rojo y el infrarrojo medio. Para parametrizar dicha relación se realizó un ajuste a partir de las imágenes obtenidas, durante 10 años, en esas bandas por el sensor Terra de MODIS. Se compararon las reflectancias superficiales de cada banda para obtener la ecuación que las relacionaba y se obtuvieron las relaciones entre los ratios espectrales y el índice de NDVIMIR (poco influenciado por los aerosoles y por tanto más útil para caracterizar la superficie).

Estos métodos han conseguido que los productos de AOD basados en satélites alcancen resoluciones a escala kilométrica. Ejemplos de estos productos incluyen los del Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) con resoluciones de 10 km (Levy et al., 2013); el Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) con una resolución de 6 km (Jackson et al., 2013); los Advanced Himawari Imagers (AHI) con una resolución de 5 km (Kikuchi et al., 2018); y el Sentinel-5P con resoluciones de 5.5 x 3.5 km (Wang et al., 2021).

Estos productos de AOD a resoluciones espaciales moderadas han sido empleados para estudios climáticos o de calidad del aire a gran escala (globales o nacionales), pero son insuficientes para zonas urbanas debido a la alta heterogeneidad espacial. Actualmente los satélites Landsat-8 y Sentinel-2, que fueron lanzados recientemente, proporcionan la capacidad de derivar datos de AOD (Profundidad Óptica de Aerosoles) con resoluciones de 30 m y 10 m, respectivamente, lo que los posiciona como herramientas valiosas para el monitoreo de aerosoles en entornos urbanos. En un estudio, se compararon los valores de AOD obtenidos a partir de Landsat-8 OLI con resolución de 30 m reescalados espacialmente a una resolución de 500 m, con mediciones simultáneas de AOD realizadas por la red de monitoreo terrestre AERONET (Aerosol Robotic Network) en la ciudad de Beijing, China (Sun et al., 2015).

La obtención de AOD con alta resolución espacial en áreas urbanas supone un desafío significativo debido a la falta de algoritmos de recuperación adecuados. La precisión en la estimación de AOD en entornos urbanos con alta carga de aerosoles requiere una representación precisa de las propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles (Jeong et al., 2005), ya que los tipos de aerosoles pueden variar considerablemente en espacio y tiempo, sobre todo en áreas urbanas

con focos de emisión y composiciones de aerosoles complejas. Actualmente, los productos de AOD operativos, como el empleado por el MODIS, suelen asumir tipos de aerosoles (Remer et al., 2005). Este enfoque generalizado no captura adecuadamente las características específicas de los aerosoles a nivel regional, lo que provoca errores sistemáticos en la obtención de AOD.

La mayoría de los algoritmos de recuperación de aerosoles por satélite se basan en la estrategia de tablas de búsqueda (Look-up-tables/LUT) (por ejemplo, MODIS, VIIRS, etc.). Las LUTs contienen una serie de reflectancias calculadas bajo diversas geometrías, tipos y cargas de aerosoles. Las principales propiedades de los aerosoles, incluidas el AOD y el tipo de aerosol, se obtienen comparando la reflectancia observada por el satélite frente la reflectancia simulada en la parte superior de la atmósfera (TOA) almacenada en las LUTs.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo de este trabajo de fin de máster es realizar una propuesta de metodología para el cálculo del AOD a partir de imágenes de alta resolución, en este caso se emplearán imágenes de nivel 2A (imágenes de reflectancia superficial BOA) y nivel 1C (imágenes de reflectancia aparente TOA) de Sentinel-2, datos de aerosoles atmosféricos resultantes de la red AERONET y mediante el uso de modelos de transferencia radiativa en forma de LUTs.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- 1) Descargar y procesar imágenes satelitales de Sentinel-2 mediante Google Earth Engine, enfocándose en imágenes TOA (Top of Atmosphere) y BOA (Bottom of Atmosphere) para los periodos comprendidos entre 2017 y 2021.
- 2) Recopilar la información necesaria para la generación de las LUTs (Look-Up Tables), que incluyen datos atmosféricos de aerosoles obtenidos de la red AERONET.
- 3) Seleccionar las imágenes adecuadas dentro del periodo especificado en función de la disponibilidad de datos de calidad de la estación AERONET, proceder con el enmascaramiento de nubes y sombras utilizando el algoritmo S2cloudless en Google Earth Engine y recopilar información de los metadatos de las imágenes TOA.
- 4) Proponer una metodología para el cálculo del AOD (Aerosol Optical Depth) basada en la diferencia entre los valores de reflectancia de una imagen TOA simulada, obtenida mediante el modelo de transferencia radiativa 6SV, y la reflectancia aparente real de una imagen multiespectral de Sentinel-2.

## **2. DATOS**

### **2.1 Datos satelitales**

#### **2.1.1 Selección de la herramienta satelital**

Conocer las características y el funcionamiento básico de la adquisición de imágenes y de los sensores satelitales disponibles, es imprescindible a la hora de disponer de la máxima información posible y abarcar cualquier tipo de aplicaciones. Las características de los sensores, instalados en los diferentes satélites, se desarrollan con objetivos distintos y por lo tanto los diferentes satélites pueden ofrecer diferentes productos, ya sean relacionados con la atmósfera, los océanos o el terreno. El aspecto más relevante a la hora de seleccionar una misión adecuada para una aplicación en concreto, es la resolución del sensor. La resolución se separa en cuatro campos específicos, la resolución espacial, la espectral, la radiométrica y la temporal.

La utilización de imágenes satelitales para el monitoreo de la contaminación atmosférica tuvo sus inicios en la década de 1970 con el empleo de instrumentos como el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Landsat y GOES. Aunque originalmente fueron diseñados para el seguimiento de la superficie terrestre y variables meteorológicas, se aprovecharon para detectar ciertos contaminantes atmosféricos como partículas sobre los océanos y sulfato proveniente de erupciones volcánicas. Los diferentes satélites dedicados a la observación de la Tierra ofrecen una variedad de resoluciones espaciales y temporales. Estas resoluciones determinan la capacidad de estos instrumentos para capturar detalles específicos en el espacio y en el tiempo.

Las principales diferencias entre estos tipos de sensores son el número de bandas (resolución espectral), el tiempo de revisita (resolución temporal), la escala (resolución espacial) y el coste. Una mejor resolución espacial permite observar con más detalle, pero el coste y la complejidad de análisis aumenta, una mejor resolución temporal aumenta considerablemente el tiempo de procesado y de computación, pero permite disponer de gran variabilidad de datos y obtener resultados más robustos.

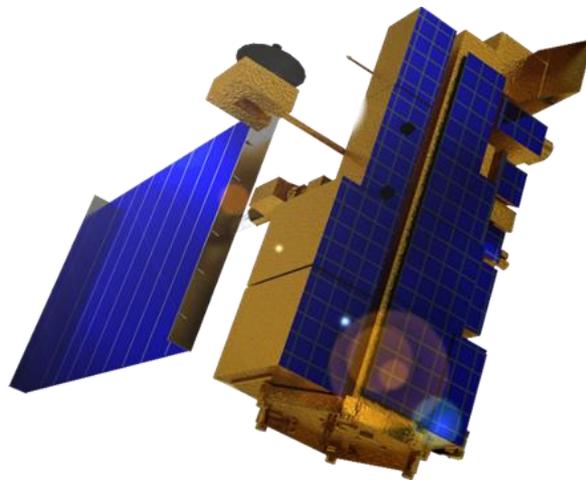
La resolución espectral y radiométrica son de gran importancia a la hora de realizar análisis de las imágenes, ya que éstas indican el número de bandas espectrales que incorpora el satélite y la sensibilidad de cada una de estas bandas respectivamente. El número y rango de las bandas varía entre satélites y dependen del objetivo por el cual se han desarrollado. Por último, uno de los aspectos más importantes que afectan a la resolución de una misión, es su frecuencia temporal. El periodo de revisita de una constelación depende de las características de la órbita de los satélites (altura, velocidad e inclinación), por lo tanto, satélites con resoluciones temporales altas presentan una peor resolución espacial.

Actualmente disponemos de varias misiones satelitales que ofrecen productos en el ámbito de la calidad ambiental, se han estudiado sus características y los productos AOD que ofrecen para seleccionar el sensor adecuado a la hora de evaluar la calidad ambiental a nivel urbano. Entre estos satélites se encuentra:

### **Terra y Aqua (MODIS)**

MODIS (Figura 2) es un instrumento satelital desarrollado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) de Francia. Actualmente está a bordo de los satélites Terra y Aqua. El sensor MODIS captura imágenes en 36 bandas espectrales, abarcando desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda larga. Como se ha comentado anteriormente, las imágenes de MODIS tienen una resolución espacial de 250 metros, 500 metros y 1 kilómetro, dependiendo de la banda espectral. La órbita que recorre le permite proporcionar una cobertura completa del planeta en un período de tiempo relativamente corto, generalmente de 1 a 2 días.

El producto de MODIS que se enfoca en la estimación del AOD a una longitud de onda específica de 550 nm se denomina MOD04 con una resolución espacial de 3 km (MOD04\_3K) y 10 km (MOD04\_L2).



*Figura 2. Imagen del satélite Terra incorporado con el instrumento MODIS*

### **NOAA-20 (VIIRS)**

VIIRS está a bordo del satélite Suomi NPP y de los satélites JPSS (NOAA-20, NOAA-21), ayudando a medir propiedades de nubes, aerosoles, temperaturas de superficie, movimientos de hielo, incendios y albedo, mejorando el entendimiento del cambio climático global. El instrumento VIIRS recopila datos satelitales globales en longitudes de onda visibles (9 bandas) e infrarrojas (11) sobre tierra, océano y atmósfera. Tiene 22 canales, incluida una banda única de Día/Noche que detecta luces nocturnas con alta sensibilidad. La resolución espacial de las imágenes del VIIRS es de 750m y recorre órbita polar generando imágenes 2 veces por día.

VIIRS genera un producto de AOD 6min/6km con información global sobre la superficie y el océano de las propiedades de los aerosoles.

### **Sentinel-5P (TROPOMI)**

La misión Sentinel-5p perteneciente al programa Copernicus resultado de la colaboración entre la European Spatial Agency (ESA) y la Comisión Europea , se destaca por su instrumento a bordo, TROPOMI. Este avanzado espectrómetro de imagen tiene como objetivo principal el monitoreo preciso de la composición atmosférica terrestre. Mediante mediciones detalladas de contaminantes como NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y aerosoles.

TROPOMI tiene una resolución espacial de aproximadamente 5.5 x 3,5 kilómetros, lo que significa que cada pixel de en una imagen de Sentinel-5P de los productos sobre la ciudad de Valencia ocupa gran parte de ella y la precisión y significado pierde valor a la hora de comparar las mediciones tomadas en campo (Figura 3).

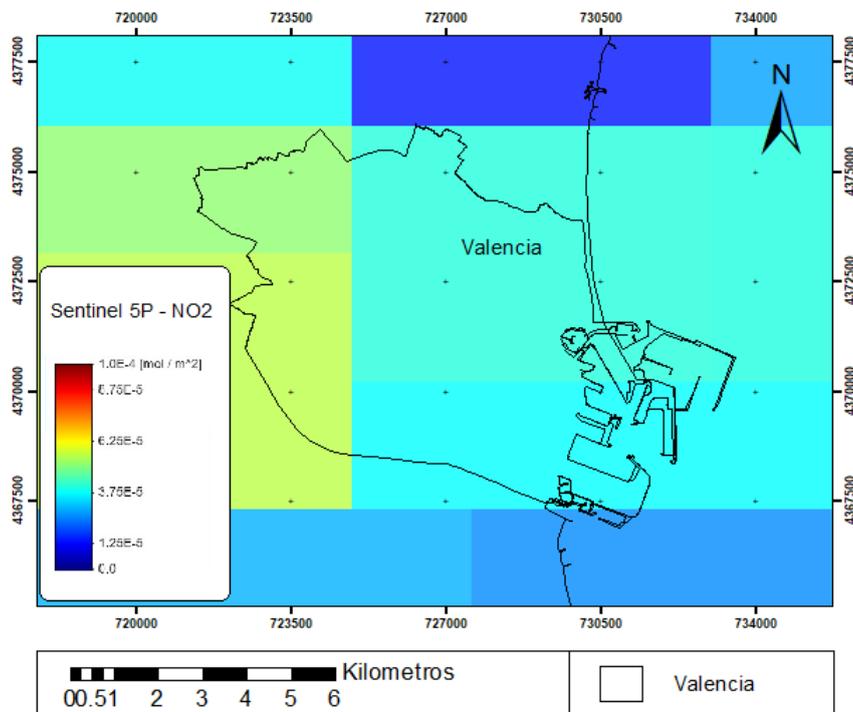


Figura 3. Imagen del producto de NO<sub>2</sub> obtenida a partir del satélite Sentinel-5P sobre la ciudad de Valencia

### **Sentinel-3 (OLCI)**

Sentinel-3 es parte del programa Copernicus y está diseñado para monitorear océanos, tierra y atmósfera. Equipado con instrumentos como OLCI, SLSTR, SRAL y MWR, mide temperatura, color del agua, altimetría oceánica y vigilancia del hielo. Sentinel-3A fue lanzado en 2016 y Sentinel-3B en 2018, operando juntos para una cobertura global. El instrumento OLCI tiene una resolución espacial de 300m, está conformado por 21 bandas espectrales y una revisita global de 2 días gracias a incorporación de los dos satélites.

Sentinel-3 dispone de un producto de AOD mide la cantidad de aerosoles en la atmósfera, usando principalmente datos de OLCI, con una resolución de 4.5km cada 1 o 2 días.

### **Landsat 8 y 9 (OLI)**

El satélite Landsat-8, lanzado en febrero de 2013, está equipado con los sensores multiespectrales avanzados Operational Land Imager (OLI), que poseen un ángulo de campo de visión de 15°, una cobertura de 185 × 185 km y un ciclo de repetición de 16 días. El sensor OLI abarca nueve bandas espectrales, desde el azul profundo hasta el infrarrojo medio, con una resolución espacial de 30 m en cada banda, excepto la banda pancromática (B8), que presenta una resolución de 15 m. Equipado con un sensor multiespectral de 12 bits, el OLI de Landsat-8 ofrece alta sensibilidad y baja sobresaturación en superficies brillantes con alta reflectancia, y una gran precisión de calibración radiométrica en órbita .

En la tabla 1 se muestra un resumen de las características claves para la toma de decisión de las imágenes que utilizar. Como ya se ha comentado anteriormente los parámetros a tener en cuenta son la resolución espacial y temporal. El MODIS, el VIIRS, Sentinel-5p y Sentinel-3 muestran una alta resolución de como máximo dos días, pero a diferencia de Sentinel-2 y Landsat la resolución espacial no es lo suficiente mente alta para detectaren detalle la variabilidad en una zona urbana. Po lo tanto, se decide el uso de imágenes de Sentinel-2 (a pesar de no disponer un producto AOD directo).

*Tabla 1. Listado de alguno de las características de algunos de los satélites empleados para la obtención de productos AOD*

Satélite	R. Espacial	R. espectral	R. radiométrica	R. Temporal	Producto AOD
Sentinel 2	10m/ 30m/ 60m	13 bandas	12 bits	5 días	No
Landsat 8 y 9	15m/ 30m/ 100m	11 bandas	12 bits	8 días	No
Sentinel 3	300m/4500m	21 bandas	12 bits	1/2 días	Si
VIIRS	750m	22 bandas	12 bits	0.5 días	Si
MODIS	500m/ 1000m	36 bandas	12 bits	1-2 días	Si
Sentinel 5P	3500m x 5500m	10 bandas	12 bits	1 día	Si

### **2.1.2 Sentinel-2(MSI)**

El Sentinel-2, al igual que el Sentinel-5p pertenece a la misma familia de satélites desarrollados por la ESA y a su vez pertenecientes al programa Copernicus. El sistema Sentinel-2 consta de dos satélites idénticos, el Sentinel-2A y el Sentinel-2B, que operan en órbitas complementarias, que permiten una mayor cobertura espacial de la superficie terrestre y reduciendo así tiempo de revisita y una frecuencia de adquisición más rápida de imágenes. Estos satélites están equipados con instrumentos avanzados que capturan imágenes multiespectrales de alta resolución de la superficie terrestre.

Las imágenes S2 están compuesta por trece bandas espectrales con diferentes resoluciones espaciales (tabla 2), cuatro bandas (B2-B3-B4-B8) con una resolución de 10, seis bandas con 20 metros (B5-B6-B7-B8a-B11-B12) y tres bandas con 60 metros (B1-B9-B10). Los productos disponibles son el Nivel-1C, que aporta las reflectancias TOA y Nivel-2A, con las reflectancias BOA, estos productos abarcan áreas en la Tierra de 100x100 km<sup>2</sup>. El tiempo de revisita para cada satélite Sentinel-2 es de 10 días que, con el uso de ambos satélites (2A y 2B) se reduce a 5 días.

Las imágenes capturadas por los satélites Sentinel-2 contienen información de la radiación solar reflejada y emitida por la superficie terrestre. Sin embargo, esta radiación también es afectada por la interacción con la atmósfera, especialmente debido a la presencia de aerosoles, partículas suspendidas en el aire. La presencia de aerosoles puede afectar la calidad de las imágenes, ya que pueden dispersar o absorber la radiación solar y afectar la luz reflejada por la superficie terrestre. Por lo tanto, es necesario realizar una corrección atmosférica para obtener mediciones más precisas de la superficie terrestre y eliminar los efectos atmosféricos.

Tabla 2. Listado de las bandas espectrales pertenecientes al Sentinel-2

Sentinel-2 MSI			
Banda	Descripción	Longitud de onda (nm)	Resolución E. (m)
1	Coastal aerosol	433-453	60
2	Blue	458-523	10
3	Green	543-578	10
4	Red	650-680	10
5	Red Edge (RE1)	698-712	20
6	Red Edge (RE2)	733-748	20
7	Red Edge (RE3)	773-793	20
8	Near infrared (NIR)	785-900	10
8a	Narrow NIR	855-875	20
9	Water vapor	935-955	60
10	Shortwave infrared - Cirrus	1360-1390	60
11	Shortwave infrared (SWIR1)	1565-1655	20
12	Shortwave infrared (SWIR2)	2100-2280	20

La elaboración de este proyecto se llevó a cabo en paralelo a un estudio mediante la colocación de una campaña de dosimetría de NO<sub>2</sub>, de la calidad del aire en la ciudad de Valencia, por lo tanto, para facilitar la futura colaboración entre proyectos se planteó la descarga de imágenes coincidente a los periodos de las campañas entre los años 2017 y 2021. En consideración con lo anterior, se obtienen imágenes en los meses de las campañas (febrero, mayo, agosto y noviembre)(tabla 3).

El procesado de imágenes actualmente se ha visto influenciado de gran forma por el desarrollo de tecnologías de computación en la nube, una de las más influyentes actualmente el portal de Google Earth Engine (GEE) que permite el acceso y procesado del catálogo de imágenes satelitales de libre acceso.

En primera instancia, entre ambas fechas de las campañas de dosimetría disponemos de 289 imágenes Nivel-1C de reflectancias TOA. Para un cálculo riguroso es necesario que en la zona de estudio (ciudad de Valencia) la presencia de nubes y sombras sea mínima, ya que en estos pixeles afectados por nubes mostrarían resultados erróneos. Un primer lugar se seleccionando así un porcentaje máximo de cobertura nubosa de un 10% y determinar la huella de la imagen. En GEE

cada imagen de Sentinel-2 tiene un formato establecido,

Imagen: 20180101T105441\_20180101T105913\_T30SYJ

donde la primera parte numérica representa la fecha y hora de la captura de la imagen, la segunda parte numérica corresponde a la fecha y hora de creación de la imagen y los últimos 6 caracteres son un identificador único de cada una de las huellas en el sistema MGSR (Military Grid Reference System), los tres primeros indican el sistema de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) y los tres últimos el sistema de proyección UPS (Universal Polar Estereográfica).

En cada una de las imágenes descargadas cabe la posibilidad de que aún existan masas de nubes en la imagen, y debido a su gran influencia en la gran mayoría de longitudes de onda de los sensores del satélite se le aplica un método de enmascaramiento de nubes. Existen varios algoritmos para la realización de los enmascaramientos de nubes, de los cuales se ha escogido el que ha permitido un filtrado de nubes y sombras con resultados más ajustados a la realidad.

Tabla 3. Primera selección de imágenes Sentinel-2 (filtrado por fecha y porcentaje de cobertura nubosa).

2018		2019		2020		2021	
Fecha	Válida	Fecha	Válida	Fecha	Válida	Fecha	Válida
05/02/2018	✗	05/02/2019	✓	05/02/2020	✗	04/02/2021	✗
10/02/2018	✗	10/02/2019	✗	10/02/2020	✓	09/02/2021	✗
15/02/2018	✓	15/02/2019	✗	15/02/2020	✓	14/02/2021	✗
20/02/2018	✓	20/02/2019	✓	20/02/2020	✓	19/02/2021	✓
25/02/2018	✓	25/02/2019	✓	25/02/2020	✓	24/02/2021	✗
01/05/2018	✗	01/05/2019	✗	-	-	-	-
06/05/2018	✗	06/05/2019	✓	05/05/2020	✓	05/05/2021	✗
11/05/2018	✓	11/05/2019	✓	10/05/2020	✓	-	-
16/05/2018	✗	16/05/2019	✗	15/05/2020	✗	15/05/2021	✗
21/05/2018	✓	21/05/2019	✗	20/05/2020	✓	20/05/2021	✓
26/05/2018	✓	26/05/2019	✓	25/05/2020	✗	25/05/2021	✗
31/05/2018	✓	31/05/2019	✓	30/05/2020	✓	30/05/2021	✓
04/08/2018	✓	04/08/2019	✓	03/08/2020	✗	03/08/2021	✗
09/08/2018	✓	09/08/2019	✓	08/08/2020	✗	08/08/2021	✗
14/08/2018	✓	14/08/2019	✓	13/08/2020	✓	13/08/2021	✓
19/08/2018	✓	19/08/2019	✓	18/08/2020	✓	18/08/2021	✗
24/08/2018	✓	24/08/2019	✓	23/08/2020	✓	23/08/2021	✗
29/08/2018	✓	29/08/2019	✗	28/08/2020	✓	28/08/2021	✓
02/11/2018	✗	02/11/2019	✗	01/11/2020	✓	01/11/2021	✓
07/11/2018	✓	07/11/2019	✗	06/11/2020	✗	06/11/2021	✓
12/11/2018	✗	12/11/2019	✓	11/11/2020	✓	11/11/2021	✗
17/11/2018	✗	17/11/2019	✗	16/11/2020	✗	16/11/2021	✓
22/11/2018	✗	22/11/2019	✗	21/11/2020	✓	21/11/2021	✗
27/11/2018	✓	27/11/2019	✗	26/11/2020	✗	26/11/2021	✓

## 2.2 Aerosoles

### 2.2.1 Propiedades

En la atmósfera terrestre, la materia suspendida (es decir, los aerosoles) es un contribuyente importante a la absorción y dispersión de la luz, específicamente en el rango espectral del visible al infrarrojo de onda corta (de 400 nm a 2500 nm). Con respecto a su impacto en la transferencia radiativa de la luz, los aerosoles pueden describirse por sus propiedades ópticas y su distribución vertical de densidad de partículas en la atmósfera. Las propiedades ópticas de los aerosoles se caracterizan típicamente por su coeficiente de extinción ( $\varepsilon_k$ ) compuesto por la absorción ( $\varepsilon_a$ ) y la dispersión ( $\varepsilon_s$ )(2):

$$\varepsilon_k = \varepsilon_a + \varepsilon_s \quad (2)$$

el single scattering albedo (SSA), que es la proporción de dispersión respecto al total de la extinción (3) en una longitud de onda ( $\lambda$ ) concreta:

$$w_0 = \varepsilon_s / \varepsilon_k \quad (3)$$

El coeficiente de extinción y su comportamiento espectral dependen del número y la proporción de partículas pequeñas (modo fino) y grandes (modo grueso). Ambos modos se pueden modelar empíricamente usando la ley de Ångström (4):

$$\varepsilon_k(\lambda) = \varepsilon_k(\lambda_0) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\alpha \quad (4)$$

donde  $\alpha$  es el exponente de Ångström. Además, debido a la distribución angular de la luz dispersada con respecto al haz incidente depende de la forma y el tamaño de las partículas del aerosol. La función de fase se modela mediante la aproximación empírica de Henyey-Greenstein, que es independiente del espectro. (Henyey & Greenstein, 1941)(5).

$$\Phi(\theta)_{HG} = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

donde  $\Phi$  es la función de fase de aerosoles en función del ángulo de dispersión  $\theta$  y  $g$  es el parámetro de asimetría de Henyey-Greenstein.

Con estas propiedades ópticas de los aerosoles, los efectos de los aerosoles sobre la radiancia detectada por un sensor pueden describirse considerando la distribución vertical (es decir, el perfil de altura) de la densidad de partículas de aerosoles. La densidad de partículas de aerosoles sigue típicamente una distribución vertical decreciente. La integral del coeficiente de extinción sobre toda la columna atmosférica (0–100 km) corresponde con el AOD.

### 2.2.2 AERONET

AERONET (Aerosol Robotic Network) es una red automatizada de monitoreo de aerosoles con cobertura global en la superficie terrestre. Esta red mide propiedades microfísicas, ópticas y de radiación solar que se utilizan para caracterizar los aerosoles atmosféricos, como el espesor óptico de aerosoles (AOD), la distribución del volumen, el albedo de dispersión simple (SSA), el factor de asimetría H-S (G), el exponente de Ångström (A), las funciones de fase, entre otros parámetros que ayudan a describir el comportamiento de dispersión de la atmósfera.

AERONET está equipado con fotómetros solares que miden con alta resolución temporal (generalmente cada 3 minutos) los parámetros anteriormente nombrados. Las mediciones de AERONET proporcionan mediciones de AOD altamente precisas, sin embargo, debido a su distribución espacial limitada, los datos de AERONET no cubren todas las regiones, por lo que se recurre a las mediciones de AOD obtenidas por satélite para obtener una mejor cobertura espacial, concretamente en la Comunitat Valenciana solo se dispone de una estación AERONET situada en el municipio de Burjassot.

Como se ha comentado en el apartado anterior se han nombrado otros parámetro que describen los aerosoles (SSA,  $\alpha$ , G), estos parámetros sirven de información auxiliar para guiar en la obtención de un AOD preciso a partir de las imágenes satélites, estos parámetros permitirán determinar el tipo aerosol y que en los siguientes apartados se explicara con más detalle.

AERONET proporciona diferentes niveles de calidad de datos, como el nivel 1.0 (sin filtrar), nivel 1.5 (con filtrado de nubes y control de calidad) y nivel 2.0 (con garantía de calidad). Los productos de nivel 1.5 tienen una mejor disponibilidad de datos en comparación con los productos de nivel 2.0, ya este nivel de procesamiento requiere de tiempo y es posible la información no cumpla los requisitos de calidad. Por lo tanto, se emplean los datos de nivel 2.0 y en caso de falta de disponibilidad se utilizan los de nivel 1.5.

La tabla 4 corresponde a un extracto de las primeras 20 filas del producto de AOD nivel 2.0 de las estación AERONET de Burjassot, como se puede observar ofrece información a una alta resolución temporal, pero también presenta saltos temporales tanto de varias horas como de días completos debido, como ya se ha comentado, eventos meteorológicos, mantenimiento de los instrumentos o problemas de calidad de la información. Referente a los valores de AOD, se observa diferentes mediciones de AOD en diferentes longitudes de onda, y es importante saber que todos los cálculos de AOD mediante imágenes satelitales se calculan en la longitud de onda 550nm, por lo tanto, para solucionar este pequeño inconveniente se interpola el AOD en 500nm a 550nm mediante el exponente de Angstrom que también se ofrece en los productos de AERONET (6).

$$AOD_{550nm} = AOD_{500nm} \left( \frac{550}{500} \right)^{-\alpha} \quad (6)$$

Para cada una de las 37 imágenes disponibles después de los filtrados de nubes y por las fechas de las campañas dosimétricas, es importante ver las disponibilidad de datos de AERONET para estas fechas, ya que sin los datos que proporciona AERONET no es posible determinar los tipos de aerosoles para ese día. Para ello se conoce que el satélite Sentinel-2 sobrepasa y captura

imágenes sobre la ciudad de Valencia aproximadamente entre las 11:00 y las 12:00. Finalmente, al comprobar la disponibilidad de datos AERONET y se descartan las imágenes que no dispongan de ellos, quedándonos finalmente con 31 imágenes. El anexo 2 muestra la base de datos final de las imágenes Sentinel-2 seleccionadas y los datos de AERONET correspondientes a la fecha y hora de la imagen.

Tabla 4. Extracto de datos del producto AOD nivel 2.0 generada por la estación AERONET de Burjassot

Date	Time	Day_Year	AOD_1640nm	AOD_1020nm	AOD_870nm	AOD_555nm	AOD_500nm
0.06572	8:20:01	1	0.007379	0.014507	0.016901	-999	0.025575
0.06572	8:24:23	1	0.007263	0.014588	0.016824	-999	0.026128
0.06572	8:29:26	1	0.008657	0.015963	0.018155	-999	0.02804
0.06572	8:35:28	1	0.008518	0.016115	0.018402	-999	0.028217
0.06572	8:42:57	1	0.009438	0.016707	0.018967	-999	0.029218
0.06572	14:05:56	1	0.013226	0.02271	0.025766	-999	0.038301
0.06572	15:05:55	1	0.011493	0.02042	0.023559	-999	0.03612
0.06572	15:13:56	1	0.011731	0.021292	0.024618	-999	0.037741
0.06572	15:19:28	1	0.011807	0.021236	0.023904	-999	0.036564
0.06572	15:28:11	1	0.012233	0.021466	0.024468	-999	0.037342
0.06572	15:29:59	1	0.012435	0.021836	0.02472	-999	0.037705
0.06572	15:36:24	1	0.011413	0.020606	0.023733	-999	0.036333
0.06572	15:42:29	1	0.012279	0.021744	0.024799	-999	0.037489
0.06572	15:47:33	1	0.012292	0.021826	0.024783	-999	0.037659
0.06572	15:51:54	1	0.012554	0.02221	0.025009	-999	0.037566
0.19072	8:20:02	4	0.043931	0.047633	0.048491	-999	0.056709
0.19072	8:24:16	4	0.036534	0.040439	0.041525	-999	0.050015
0.19072	8:29:18	4	0.035986	0.040278	0.041379	-999	0.049344
0.19072	9:52:15	4	0.034249	0.03843	0.039531	-999	0.048975
0.19072	10:07:17	4	0.012876	0.018963	0.021078	-999	0.031587
0.19072	10:15:09	4	0.009796	0.015957	0.018786	-999	0.030262
0.19072	10:22:15	4	0.007497	0.014681	0.016669	-999	0.027862
0.19072	10:37:15	4	0.006172	0.013533	0.016092	-999	0.028286

Además de las propiedades de los aerosoles (Single-scattering albedo, exponente de Ångström, factor de asimetría Henyey-Greenstein) también se han obtenido los valores de ozono ( $O_3$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ), parámetros que participan en el apartado de la absorción atmosférica y permiten establecer un modelo atmosférico.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Estructura de procesos

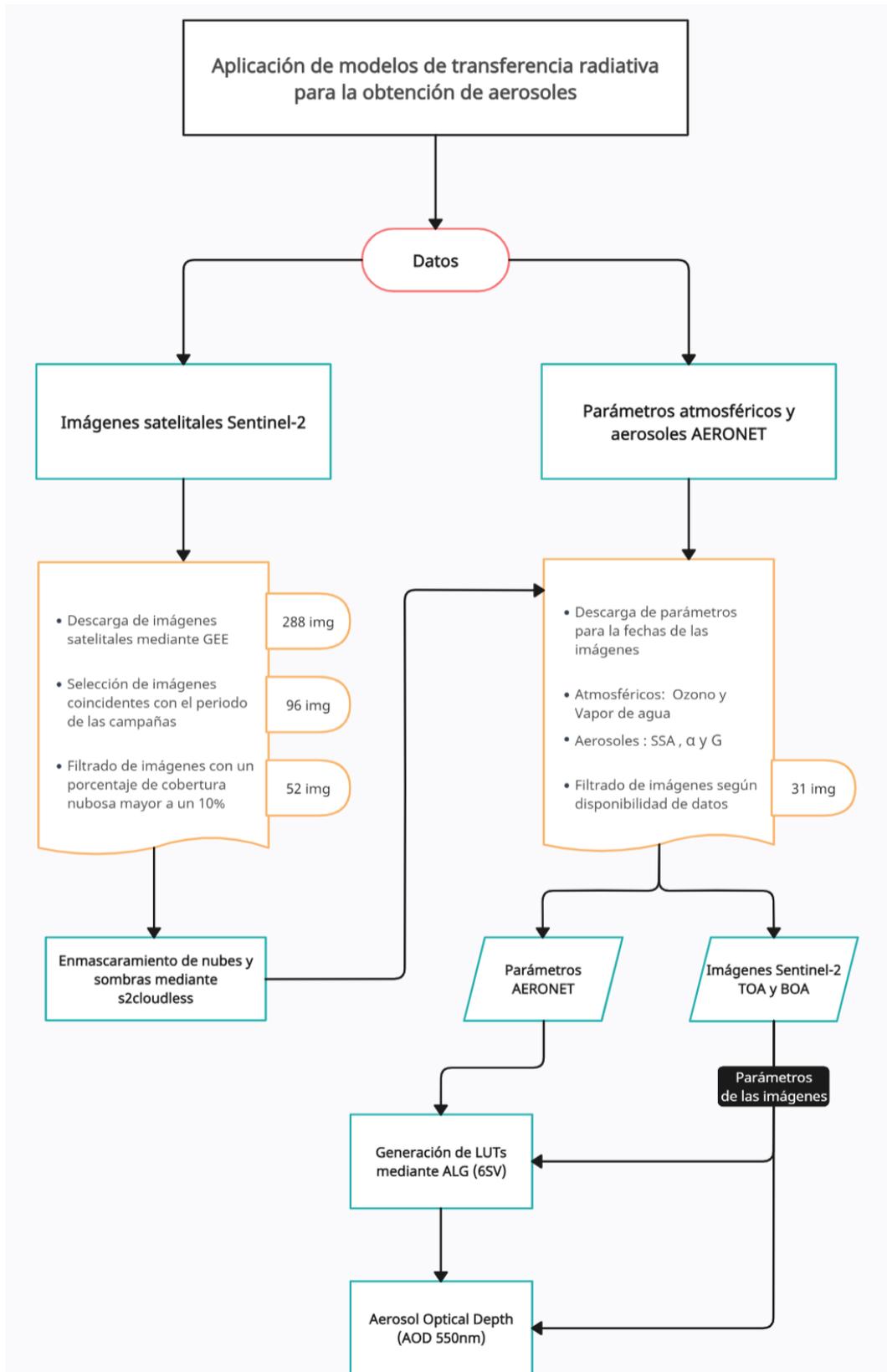


Figura 4. Estructura de los procesos llevados a cabo en el proyecto

## 3.2 Imágenes Sentinel-2 BOA y TOA

### 3.2.1 Procesado de imágenes en Google Earth Engine (GEE)

La descarga masiva de imágenes satelitales se ha realizado mediante Google Earth Engine (GEE) (<https://code.earthengine.google.com>). GEE es una plataforma de análisis geoespacial en la nube, basada en JavaScript, que permite visualizar, analizar y procesar grandes volúmenes de imágenes satelitales con una potencia computacional significativamente mayor que los métodos tradicionales. GEE facilita el análisis de datos a gran escala; en nuestro caso, descargar 4 años de datos puede tomar una hora, y filtrar por localización y cobertura de nubes en unas pocas líneas de código. Comparativamente, descargar imágenes a través de Copernicus HUB es más tedioso, con largos tiempos de espera en la solicitud de imágenes (particularmente de Sentinel-2) y la necesidad de librerías externas para el procesamiento en ráster, lo que complica y hace ineficiente el flujo de trabajo.

La descarga se configura especificando el rango de fechas, la zona de interés y el producto, identificado por su ID en el catálogo de GEE. Los datos se filtran por calidad para evitar imágenes degradadas, asegurando la integridad de los análisis posteriores. En el catálogo de GEE aparecen las colecciones de imágenes de los satélites más empleados.

El proceso realizado es el siguiente:

- 1) Selección de las colecciones de Sentinel-2 nivel 1-C (TOA) y Nivel 2-A (BOA).
- 2) Selección de las fechas de las campañas
- 3) Selección del identificador de la huella correspondiente a la ciudad de Valencia (T30SYJ)
- 4) Filtro de imágenes con más de un 10% de cobertura nubosa
- 5) Aplicación de la máscara de nubes y sombras `s2cloudless`
- 6) Creación de un archivo CSV con la información relevante para el cálculo del AOD

La ejecución de los cuatro primeros puntos requiere el uso de los diferentes métodos de filtrado que ofrece GEE, una vez seleccionada la colección de imágenes Sentinel-2, ya sea TOA o BOA, aplicamos `filterDate` para la selección de la fecha de entrada y de salida, y luego aplicamos `filterMetadata` donde podemos encontrar diferentes propiedades de la imagen, como el identificador de la huella (punto 3) y el porcentaje de nubes sobre la imagen (punto 4). Con esta primera colección creada eliminamos las imágenes que coincidan con las fechas donde no disponemos de datos de AERONET.

### 3.2.2 Enmascaramiento de nubes y sombras S2Cloudless

La aplicación de máscaras de nubes y sombras cumple una función determinante a la hora de la obtención del AOD, debido a que los valores de los píxeles en una imagen con nubes o sombras presentan valores erróneos. Existen múltiples posibilidades para el enmascaramiento de nubes y se ha estudiado cuál sería la mejor opción para el proyecto:

- Método QA60 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/cloud-masks>): este método de filtrado de nubes consiste en la utilización de unas de las bandas propias de las imágenes Sentinel-2, la banda QA60 nombrada así en el catálogo de GEE. Esta banda tiene una resolución espacial de 60 metros y contiene, mediante un algoritmo de la ESA para la detección de nubes basados en criterios espectrales, una clasificación de nubes opacas y nubes tipo cirrus.
- Método Cloud Probability (<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/user-guides/cloud-masks/#cloud-masks-and-cloud-probabilities>): este método emplea la colección de imágenes S2 Cloud Probability creada mediante la utilización de “sentinel-2-cloud-detector”. Todas las bandas interpoladas con una resolución de 10 metros donde cada píxel indica la probabilidad del 1 al 100.
- Método S2Cloudless (<https://github.com/sentinel-hub/sentinel2-cloud-detector>): es un algoritmo de detección automática de nubes para imágenes Sentinel-2. Este algoritmo utiliza los valores de reflectancia TOA de las imágenes Sentinel-2 Nivel 1C para crear un mapa de probabilidad de nubes. Según el criterio del usuario este método permite la modificación de los criterios de agresividad a la hora de la detección de las nubes y sombras. Este método emplea el mismo mapa de probabilidad de nubes empleado por el método anterior.

El algoritmo que ha generado mejores resultados es el método s2cloudless que además de enmascarar de manera efectiva las nubes también permite el enmascaramiento de las sombras que estas generan (Anexo 3).

### 3.2.3 Metadatos de las imágenes Sentinel-2

Además de los valores de reflectancia de las imágenes TOA y BOA seleccionadas, para la creación de las LUTs también son necesarios propiedades auxiliares de las imágenes que permiten el cálculo del AOD. Para ello mediante el uso del filtro *filterMetadata* de GEE podemos seleccionar las propiedades (tabla 5):

- Solar Zenith angle (SZA): esta variable controla la intensidad de la irradiancia solar (ponderada por  $\cos(\text{SZA})$ ). Además, define la longitud y la geometría de la trayectoria óptica entre el sol y el objetivo, lo cual aumenta o disminuye los efectos de absorción y dispersión causados por gases y aerosoles.
- Visual Zenith angle (VSA): esta variable define la longitud y la geometría de la trayectoria óptica entre el objetivo y el sensor, también influye en el aumento o disminución de los efectos de absorción y dispersión causados por gases y aerosoles.
- Solar irradiance (SI): es el equivalente al extra-terrestial solar spectrum y depende de la respuesta espectral de las bandas de Sentinel-2.
- Reflectance conversion correction (RCC): es la corrección de la variación de la distancia sol-Tierra en unidades astronómicas.

Tabla 5. Listado de metadatos de las imágenes descargadas de Sentinel-2 Nivel 1C

FECHA	PRODUCT_ID	MEAN_SOLAR_ZENITH_ANGLE		SOLAR_IRRADIANCE		RCC
		B2	B4	B2	B4	
15/02/2018	S2B_MSIL1C_20180215T105129_N0206_R051_T30SYJ	54.63397966	3.741386576	1959.77	1512.79	1.026565251
20/02/2018	S2A_MSIL1C_20180220T105051_N0206_R051_T30SYJ	52.92280898	3.756056837	1959.72	1512.06	1.024591811
21/05/2018	S2A_MSIL1C_20180521T105031_N0206_R051_T30SYJ	22.5470226	3.766709494	1959.72	1512.06	0.977772116
31/05/2018	S2A_MSIL1C_20180531T105031_N0206_R051_T30SYJ	21.20339557	3.732809118	1959.72	1512.06	0.974023219
14/08/2018	S2B_MSIL1C_20180814T105019_N0206_R051_T30SYJ	28.70166336	3.705701825	1959.77	1512.79	0.973558347
19/08/2018	S2A_MSIL1C_20180819T105031_N0206_R051_T30SYJ	30.01247748	3.754295601	1959.72	1512.06	0.975289604
24/08/2018	S2B_MSIL1C_20180824T105019_N0206_R051_T30SYJ	31.42270387	3.67433109	1959.77	1512.79	0.977205132
07/11/2018	S2A_MSIL1C_20181107T105231_N0207_R051_T30SYJ	56.47805404	3.739869512	1959.72	1512.06	1.016960271
27/11/2018	S2A_MSIL1C_20181127T105401_N0207_R051_T30SYJ	61.39354304	3.703624115	1959.72	1512.06	1.026033572
20/02/2019	S2B_MSIL1C_20190220T105059_N0207_R051_T30SYJ	53.0043721	3.755056683	1959.77	1512.79	1.024716006
25/02/2019	S2A_MSIL1C_20190225T105021_N0207_R051_T30SYJ	51.2212282	3.729147883	1959.72	1512.06	1.022574029
11/05/2019	S2B_MSIL1C_20190511T105039_N0207_R051_T30SYJ	24.58927197	3.790454878	1959.77	1512.79	0.982334161
26/05/2019	S2A_MSIL1C_20190526T105031_N0207_R051_T30SYJ	21.82280329	3.723458119	1959.72	1512.06	0.975920652
31/05/2019	S2B_MSIL1C_20190531T105039_N0207_R051_T30SYJ	21.21524417	3.76442701	1959.77	1512.79	0.974125403
14/08/2019	S2A_MSIL1C_20190814T105031_N0208_R051_T30SYJ	28.62378351	3.754234085	1959.72	1512.06	0.973460158
24/08/2019	S2A_MSIL1C_20190824T105031_N0208_R051_T30SYJ	31.33546482	3.753830775	1959.72	1512.06	0.977084691
12/11/2019	S2A_MSIL1C_20191112T105301_N0208_R051_T30SYJ	57.81547942	3.759906765	1959.72	1512.06	1.019306596
10/02/2020	S2A_MSIL1C_20200210T105201_N0209_R051_T30SYJ	56.39113717	3.663353171	1959.66	1512.06	1.028544226
15/02/2020	S2B_MSIL1C_20200215T105029_N0209_R051_T30SYJ	54.79182785	3.674063018	1959.75	1512.79	1.02679063
20/02/2020	S2A_MSIL1C_20200220T105051_N0209_R051_T30SYJ	53.09625573	3.665795671	1959.66	1512.06	1.024839623
30/05/2020	S2A_MSIL1C_20200530T105031_N0209_R051_T30SYJ	21.24466601	3.792367518	1959.66	1512.06	0.974228349
09/06/2020	S2A_MSIL1C_20200609T105031_N0209_R051_T30SYJ	20.52977604	3.791403049	1959.66	1512.06	0.971199913
13/08/2020	S2B_MSIL1C_20200813T104629_N0209_R051_T30SYJ	28.56057677	3.719740361	1959.75	1512.79	0.973361736
23/08/2020	S2B_MSIL1C_20200823T104629_N0209_R051_T30SYJ	31.2661116	3.740428468	1959.75	1512.79	0.976963711
28/08/2020	S2A_MSIL1C_20200828T105031_N0209_R051_T30SYJ	32.73162653	3.756859914	1959.66	1512.06	0.979032159
11/11/2020	S2B_MSIL1C_20201111T105259_N0209_R051_T30SYJ	57.75105136	3.741753283	1959.75	1512.79	1.019159483
21/11/2020	S2B_MSIL1C_20201121T105349_N0209_R051_T30SYJ	60.24702241	3.738350263	1959.75	1512.79	1.023751973
19/02/2021	S2B_MSIL1C_20210219T104959_N0209_R051_T30SYJ	53.17658394	3.741940502	1959.75	1512.79	1.024962789
20/05/2021	S2B_MSIL1C_20210520T104619_N0300_R051_T30SYJ	22.6742112	3.767552991	1959.75	1512.79	0.978147094
13/08/2021	S2A_MSIL1C_20210813T105031_N0301_R051_T30SYJ	28.50228389	3.730609463	1959.66	1512.06	0.973265835
16/11/2021	S2B_MSIL1C_20211116T105229_N0301_R051_T30SYJ	59.00259898	3.765219098	1959.75	1512.79	1.021393518

### 3.3 Generación de Look-up tables (LUTs)

#### 3.3.1 Modelos de transferencia radiativa (RTM) – 6SV

Los modelos de transferencia radiativa atmosférica son modelos computacionales basados en la física que describen numéricamente los procesos de absorción, emisión y dispersión de la radiación en la atmósfera terrestre, desde el ultravioleta hasta la región de microondas. Dada la complejidad creciente de los modelos y la gran cantidad de simulaciones necesarias, se ha facilitado el uso de los RTMs, mediante el desarrollo de interfaces gráficas de usuario específicas para los distintos modelos, como 6SV, MODTRAN y libRadtran.

Uno de los problemas que tiene estas interfaces es que no están diseñadas para computar grandes bases de datos, lo cual es necesario debido a la alta carga computacional de realizar análisis estadísticos o ejecutar los modelos pixel por pixel.

Para abordar estas limitaciones, se empleará (ALG), un software compilado en MATLAB que permite generar LUTs basadas en un RTM atmosféricos específico. ALG permite una interacción sencilla para definir configuraciones de modelos y gestionar datos de RTM para cualquier configuración espectral en el dominio óptico. En este caso se va a emplear el RTM conocido como 6SV (Vermote et al., 1997).

El modelo Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6SV) es un código computacional avanzado diseñado para simular con alta precisión el proceso de transferencia radiativa, incluyendo la polarización de la radiación y el modelado de la atmósfera. 6SV utiliza el algoritmo *successive order of scattering* (SOS) para calcular la dispersión de Rayleigh y de los aerosoles. Este modelo permite simular observaciones desde satélites y aeronaves, y se ha empleado extensamente en la generación LUTs para algoritmos de recuperación de aerosoles satelitales. Los resultados espectrales calculados incluyen transmitancia directa y difusa, albedo esférico, radiancia del camino atmosférico y flujos de radiancia en la parte superior de la atmósfera (TOA), abarcando un rango espectral de 0.3 a 4  $\mu\text{m}$  con una resolución de 2.5 nm.

### **3.3.2 La herramienta Atmospheric Look-up table Generator (ALG)**

#### **3.3.2.1 Descripción del software**

La interfaz gráfica de ALG proporciona permite la ejecución de las simulaciones del modelo de transferencia radiativa 6SV y construir la LUT. Esta interfaz se divide en tres elementos principales: la configuración del software, la configuración de la LUT y el sistema de ayuda.

La GUI de configuración del software permite editar la ruta a los archivos ejecutables de los RTM, la carpeta para almacenar los datos de salida y los núcleos de CPU predeterminados para ejecutar un RTM. Además, permite editar y almacenar la configuración espectral de los instrumentos de teledetección existentes facilitando la generación de LUT específicas para cada sensor, en nuestro caso se configura para el uso del sensor MSI del Sentinel-2.

En la interfaz principal (configuración de LUT), se puede seleccionar las variables de entrada del RTM y los valores utilizados para ejecutar las simulaciones y almacenar las salidas espectrales en la LUT. La GUI de configuración de LUT se divide en cuatro pasos principales:

- 1) Configuración General (figura 5): se empieza seleccionando la ruta y nombre de guardado de la LUT, después el número de núcleos de CPU paralelos empleados para la ejecución del RTM especificado, seguido de la selección del RTM atmosférico utilizado para ejecutar la simulación y el método de muestreo empleado para distribuir los nodos de la LUT (es decir, la colección de puntos de las variables atmosféricas y geométricas de entrada).
- 2) Datos clave de entrada (figura 6): ALG permite introducir las variables atmosféricas y geométricas y sus valores. Concretamente, las variables de entrada se dividen en dos tipos: discretas y continuas. Las variables discretas son aquellas que solo pueden tomar un número determinado de valores, por ejemplo, el perfil atmosférico, el modelo de aerosoles o la irradiancia solar extraterrestre. Las variables continuas pueden tener cualquier valor dentro de un rango permitido. Ejemplos típicos de variables continuas son el vapor de agua columnar (CWV), el espesor óptico de aerosoles (AOD) o el ángulo cenital solar/de observación (SZA/VZA). Para las variables continuas, sus valores varían entre un rango mínimo/máximo introducido por el usuario y, en caso de muestreo en malla, se distribuyen según la distribución seleccionada (lineal, logarítmica, exponencial o coseno).

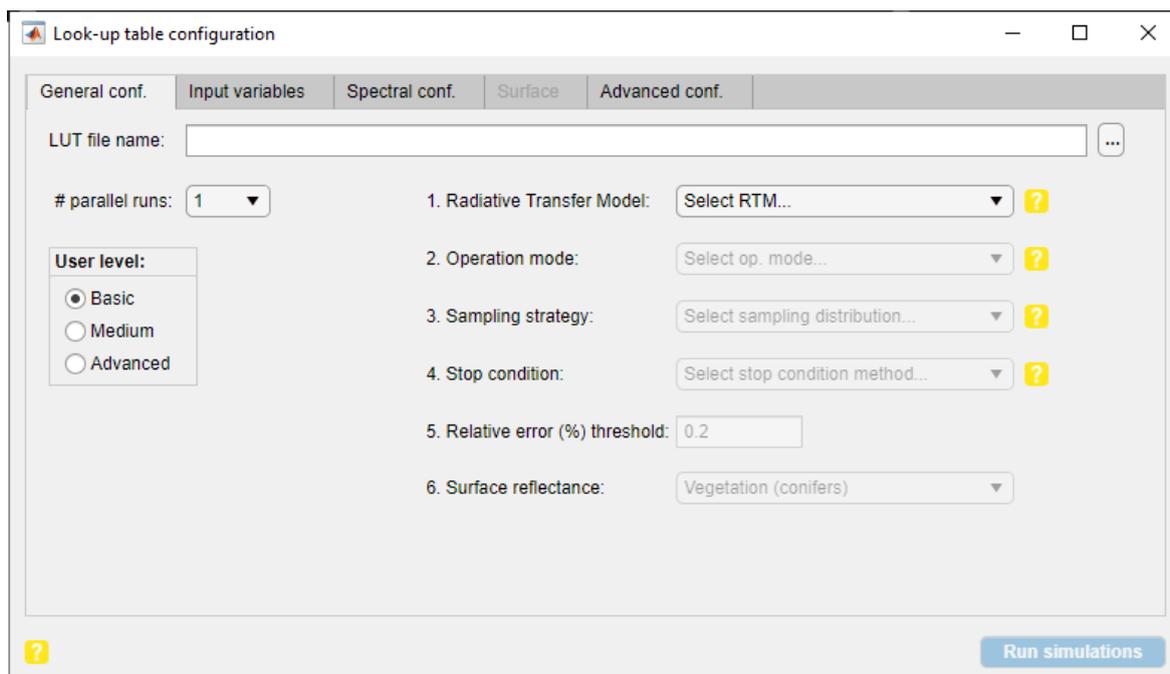


Figura 5. Interfaz principal de ALG, configuración general de la LUT.

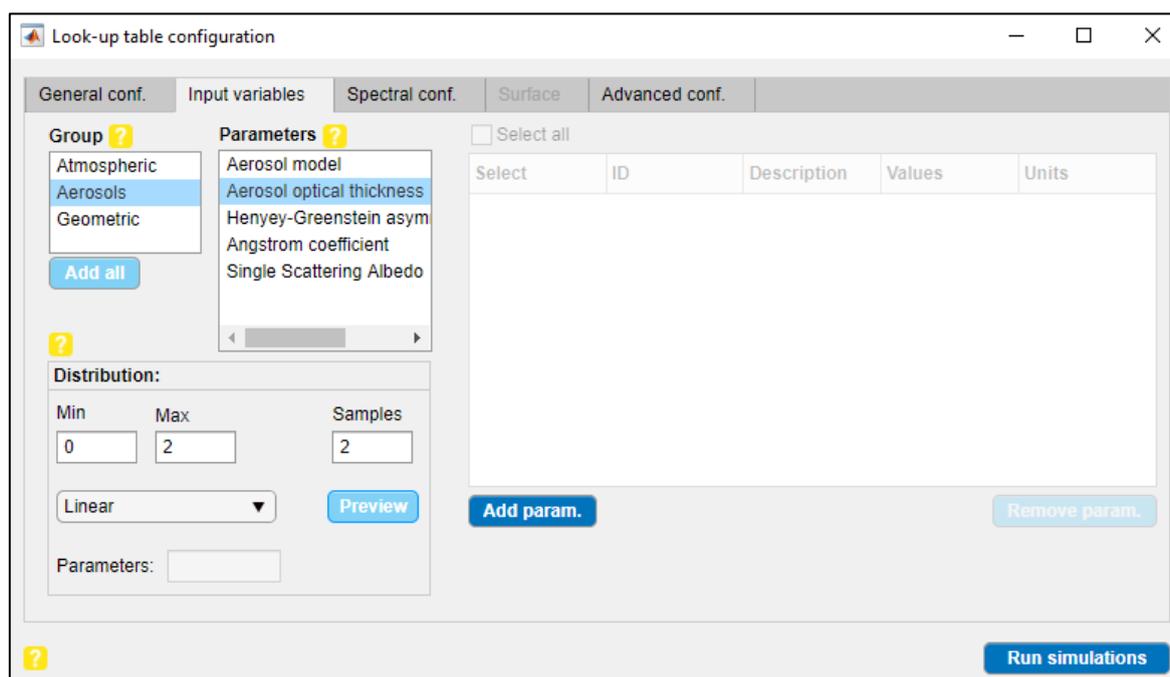


Figura 6. Interfaz principal de ALG, datos clave de entrada

- 3) Configuración espectral (figura 7): se introduce la configuración espectral de las simulaciones del RTM. Se puede establecer el rango espectral y la resolución deseados, incluso en intervalos espectrales no contiguos, lo que permite ahorrar tiempo de cálculo y espacio de almacenamiento en disco de longitudes de onda no deseadas.
- 4) Configuración avanzada: permite el uso de parámetros avanzados de la configuración de las RTM, pero en nuestro caso no será necesario su uso.

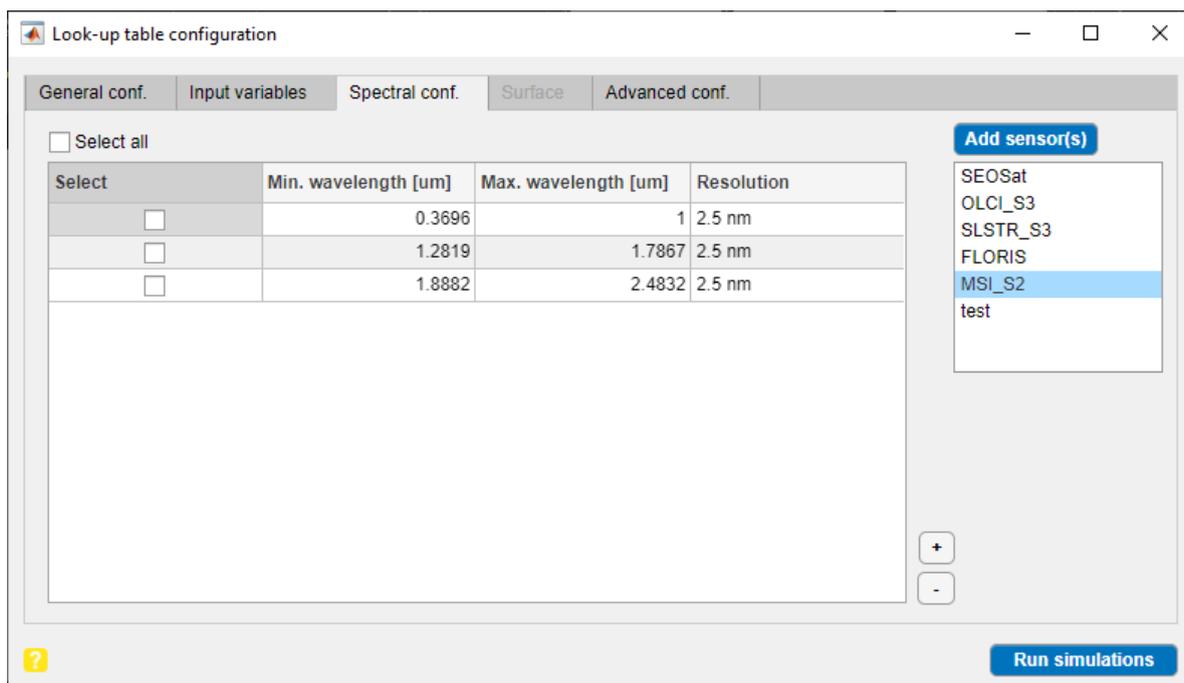


Figura 7. Interfaz principal de ALG, configuración espectral.

### 3.3.2.2 Proceso de creación LUT – ALG.

En la figura 8 se muestra un pequeño esquema de los pasos a seguir para la generación de las LUTs para el RTM 6SV.

En el apartado de configuración general las variables a introducir son la ruta de salida de las LUTs generadas, por defecto la ruta coincide con la ruta de instalación del software ALG en la carpeta denominada LUTs. La segunda variable es la selección de núcleos de CPS para la ejecución de simulaciones de RTM en paralelo, en nuestro caso 1 instancia. Y finalmente el RTM a emplear, que como ya se ha comentado es el 6SV y seleccionamos que queremos generar una LUT con las opciones de *Transfer Functions* (estas funciones incluyen salidas estándar típicas de los RTMs atmosféricos, como la radiancia del camino, la transmitancia o la irradiancia en la superficie), comúnmente empleadas en las correcciones atmosféricas.

En el segundo paso (datos clave de entrada), las variables están agrupadas en tres conjuntos claramente diferenciados:

Atmosférico: definición del perfil y de las principales concentraciones de gases en la atmósfera.

- O3:** concentración de la columna de Ozono en [atm-cm]. Las concentraciones típicas de O3 a nivel mundial y anualmente oscilan entre 0.15 atm-cm (depleción de ozono en el polo sur) y 0.45 atm-cm, con valores medios típicos alrededor de 0.3 atm-cm. La absorción de O3 contribuye principalmente en el rango espectral de 475-625 nm con una transmitancia típica del 95% a aproximadamente 550 nm.

**H2O:** concentración de la columna de vapor de agua en [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]. Las concentraciones típicas de H2O a nivel mundial y anualmente oscilan entre  $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  y  $6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , con valores medios típicos alrededor de  $3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ . El H2O tiene características específicas de absorción a 550 nm, 700 nm, 800 nm, 950 nm, 1020 nm, 1400 nm, 1900 nm y 2500 nm, con transmitancias típicas de absorción de 95%, 75%, 75%, 40%, 30%, 0%, 0% y 0%, respectivamente.

Aerosoles: definición del modelo y concentraciones de aerosoles.

**AOD:** profundidad óptica de aerosoles [adimensional]. Define el valor del coeficiente de extinción vertical de aerosoles a 550 nm. Los valores típicos de AOD a nivel mundial y anualmente para observaciones satelitales oscilan entre 0.05 y 0.4, con valores extremos de 1 y valores medios típicos alrededor de 0.12.

**G:** factor de asimetría Henyey-Greenstein [adimensional]. Define el parámetro de asimetría de la función de fase, controlando así la forma de la función de fase de los aerosoles, lo cual influye en los efectos de dispersión causados por los aerosoles. Para aerosoles típicos, los valores de G oscilan entre 0.6 y 1.

**ALPHA:** coeficiente de Angstrom [adimensional]. Define la dependencia espectral del coeficiente de extinción de aerosoles a través de la aproximación de Ångström (4). Para aerosoles típicos, los valores de  $\alpha$  oscilan entre 1 y 2.

**SSA:** albedo de dispersión simple [adimensional]. Define la relación espectralmente independiente entre los coeficientes de dispersión y extinción de aerosoles, controlando así la fracción de absorción y dispersión de los aerosoles. Sus valores oscilan entre 0 y 1, con valores típicos para aerosoles entre 0.85 y 1.

Geometría: definición de la geometría del objetivo, el sensor e iluminación.

**GNDALT:** altitud del suelo en zona de estudio [en km]. Varía de 0 km (nivel del mar, valor predeterminado) a 9 km. Esta variable controla la longitud del trayecto óptico sol-objetivo-sensor.

**SZA:** ángulo cenital solar en [deg]. Varía entre  $0^\circ$  (en el cenit) y  $90^\circ$  (sobre el horizonte). Esta variable controla la intensidad de la irradiancia solar (ponderada por  $\cos(\text{SZA})$ ). Además, define la longitud y la geometría del trayecto óptico sol-objetivo.

**VZA:** ángulo cenital visual en [deg]. Varía entre 0° (para instrumentos que miran al nadir) y 90° (para instrumentos que apunten al limbo). Esta variable define la longitud y la geometría del trayecto óptico objetivo-sensor.

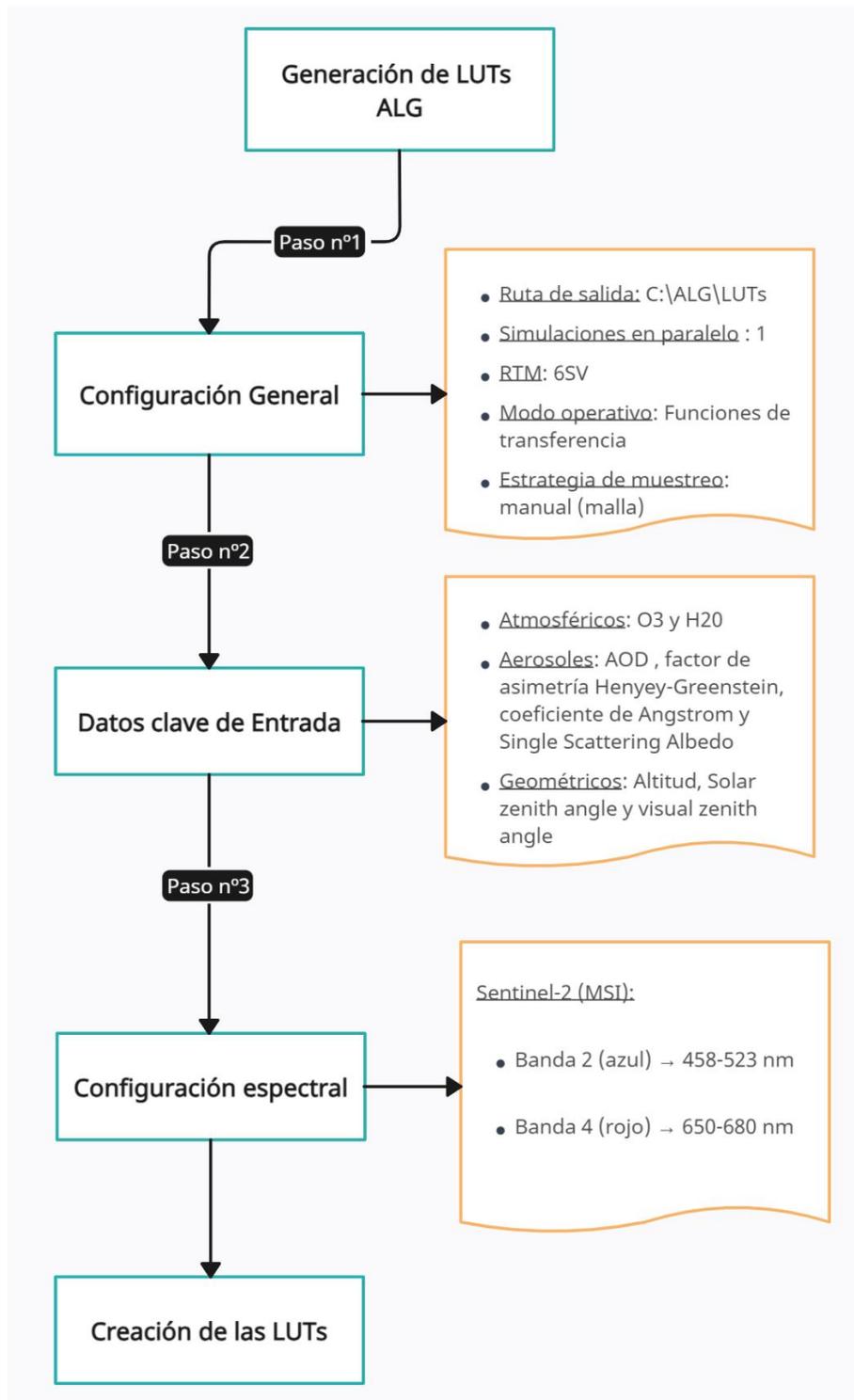


Figura 8. Esquema del proceso de la generación de las LUTs

Para la generación de la LUT se ha tomado la decisión de crear una LUT por imagen, es decir, cada LUT empleará las variables atmosféricas, de aerosoles y geométricas específicas para un única imagen y en el momento de la toma de la imagen (Anexo 2). Las variables en la tabla serán valores constantes exceptuando la variable AOD cuyo valor está comprendido en el rango [0,010-0.400] con un paso de muestro de 10 valores, ajustándose a los valores típicos de la provincia de València (figura 9).

AOT	O3	H <sub>2</sub> O	G	ALPHA	SSA	GNDALT	SZA	VZA
0.010	0.32932	1.60242	0.644826	1.76271	0.91810	0.016	54.634	3.542
0.053								
0.097								
0.140								
0.183								
0.227								
0.270								
0.313								
0.357								
0.400								

Figura 9. Ejemplo de variables de entrada y valores para la fecha 15 de febrero de 2018.

En el paso 3 (configuración espectral), para la correcta creación de la LUT es también necesario configurar la sensibilidad espectral del sensor, es decir, seleccionar en que longitudes de onda se va a calcular las funciones de transferencia atmosférica. En nuestro caso se ha trabajado únicamente con las bandas del azul y del rojo. En el caso de la banda del azul el rango es [460nm-525nm] y la banda del rojo [650nm-680nm] y a una resolución de cálculo de 2,5nm. Con todos los parámetros introducidos correctamente generaremos dos LUT por imagen una para la banda del azul y otra para la banda del rojo.

Una vez introducidas todas las variables necesarias para la creación de las LUTs, se ejecutan todas las simulaciones del RTM. Cada RTM tiene diferentes métodos y diferentes variables de entrada, esto provoca que las LUTs generadas pueden ser no compatibles entre los diferentes modelos, para solucionar estos ALG, armoniza la variedad de salidas espectrales de los RTM en una estructura común y consistente de los datos LUT almacenados. Para ello, ALG utiliza las llamadas funciones de transferencia atmosférica, que se emplean típicamente en aplicaciones de teledetección. Estas funciones de transferencia atmosférica permiten separar los efectos de transferencia radiativa entre la superficie y la atmósfera, siendo especialmente útiles en la corrección atmosférica y en el modelado hacia adelante (paso nº1 – modo operativo).

Las LUTs generadas se presentan en formato .h5 que es un formato de organización para grandes cantidades de datos de forma jerárquica y que se encuentran de forma estructurada. Dentro de este archivo h5 se encuentran las variables correspondiente a las funciones de transferencia atmosférica dadas por 6SV, como muestra la ecuación (7):

$$L_{toa} = L_o + \frac{T_{gas} E_{tot} T_{tot} \rho}{\pi(1-S\rho)} \tag{7}$$

donde la radiancia TOA se puede calcular con las variables,  $L_0$ : radiación de la trayectoria atmosférica en  $[mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}]$ ,  $T_{gas}$ : transmitancia total de gas [adimensional],  $E_{tot}$ : irradiancia total en superficie debido a la dispersión en  $[mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}]$ ,  $T_{tot}$ : transmitancia ascendente total debido a la dispersión [adimensional] y  $S$ : albedo esférico [adimensional].

La LUT está organizada en varios campos (ejemplo imagen 15 febrero 2018 banda azul):

- IO: contiene una columna de identificadores propia de la LUT (26 filas).
- Wvl: contiene una columna que indica la a que longitud de onda se ha calculado cada fila (26 filas). Banda del azul 460-525nm. Rango de la banda azul es de 65nm, entre la resolución espectral del 6SV 2,5 nm son 26 filas.
- LUTheaders: indica el encabezado de las columnas del campo LUTData, en nuestro caso corresponde al valor de AOD, es decir, los 10 valores de AOD establecidos en los datos de entrada en ALG (figura 9). Una fila con 10 columnas (siempre será la misma para todas las LUTs).

0.01	0.053	0.097	0.14	0.183	0.227	0.27	0.313	0.357	0.4
------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------	-----

- Dynamic: contiene al nombre de las variables introducidas como datos de entrada que no son constantes, en nuestro caso AOD.
- Static: contiene al nombre de las variables constantes introducidas como dato de entrada para el cálculo de la LUT. [ALPHA,G ,SSA ,GNDALT ,H2O ,O3 ,SZA ,VZA]
- LUTdata: contine las variables de las funciones de transmisión atmosférica en una matriz donde el número de columnas corresponde al cálculo de las variables en los 10 valores de AOD propuestos. Y el número de filas corresponderá a las 5 variables ( $L_0$ ,  $T_{gas}$ ,  $E_{tot}$ ,  $T_{tot}$ , y  $S$ ) por el número de longitudes de onda (26), es decir, un total de 135 filas. A continuación, se calculará el promedio de cada una de las variables respecto a las 26 longitudes de onda para obtener una variable por banda.

Todo el proceso de lectura y tratamiento de las LUTs se ha realizado mediante un código en Python de elaboración propia Anexo 4a.

### 3.3.3 Cálculo del AOD

En la figura 10 se puede observar un esquema general del proceso llevado a cabo para la obtención de las imágenes de AOD a partir de las imágenes satelitales de Sentinel-2 y las LUTs obtenidas a partir de la aplicación del RTM 6SV. En los puntos anteriores ya se ha explicado la obtención de las imágenes de Sentinel-2 tanto nivel 1C y 2A, los metadatos de la imagen TOA y la obtención de la variables de transferencia radiativa en forma de LUTs.

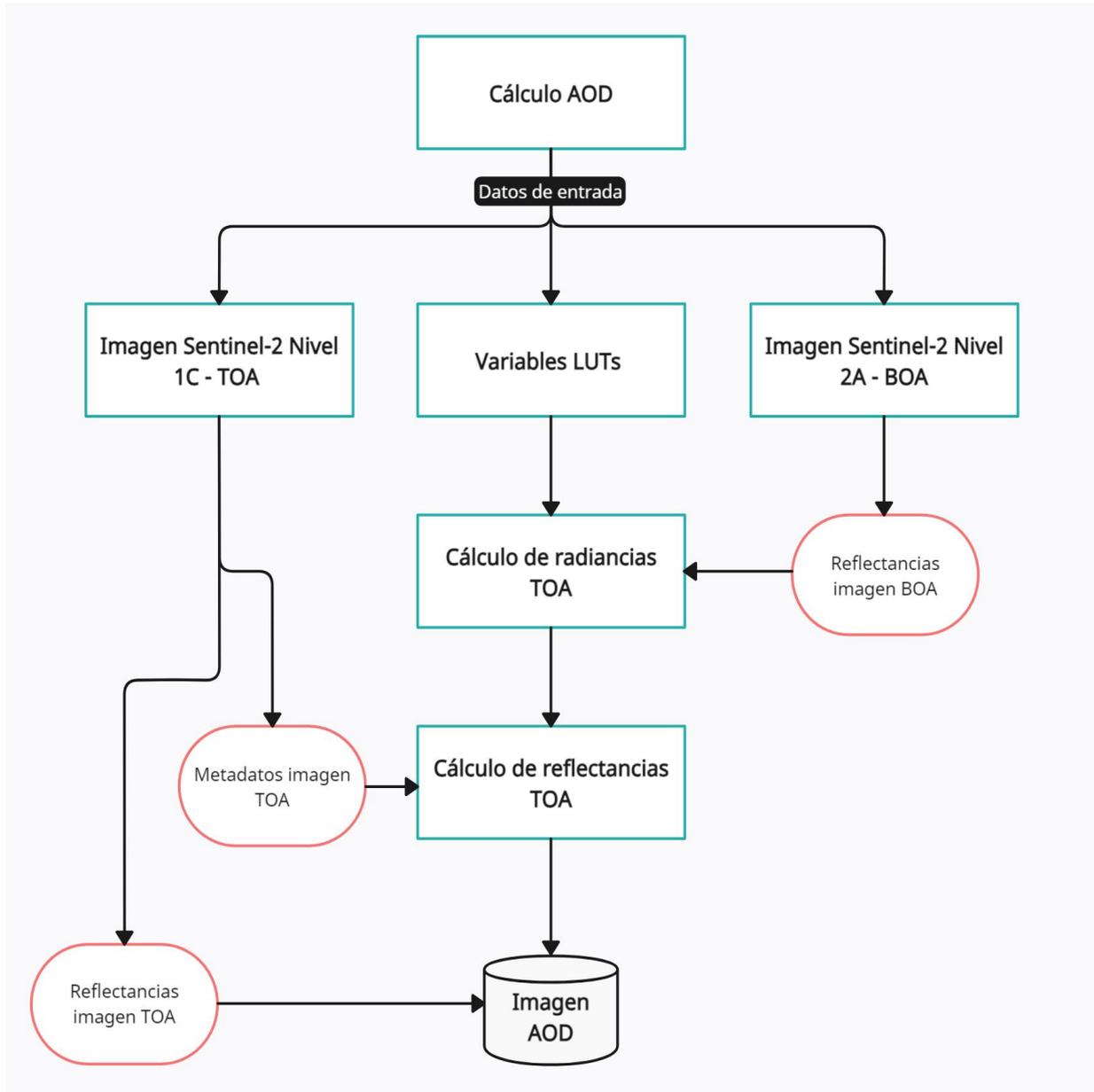


Figura 10. Esquema del proceso de cálculo de la imagen AOD

A continuación, se explica el proceso siguiente para obtener al imagen AOD final.

- Cálculo de la radiancia TOA: La ecuación 7 nos permite calcular la radiancia TOA, que no hay que confundir con la reflectancia TOA. La radiancia es la variable medida directamente por instrumentos satelitales y tiene unidades de watio. La reflectancia es la proporción de la radiación que incide en una superficie con respecto a la radiación reflejada por ella, y es adimensional. En la ecuación también nos indica todas las variables necesarias para el cálculo de la radiancia, entre ellas están las variables de transferencia radiativa descritas en las LUTs y la reflectancia superficial  $\rho$ . Para realizar esta operación se ha generado un código en Python para la lectura de las imágenes Sentinel-2 en formato raster (Anexo 4.b) y poder acceder a los valores de reflectancias en cada pixel, ya que, este proceso ha de realizarse pixel a pixel (figura 11).

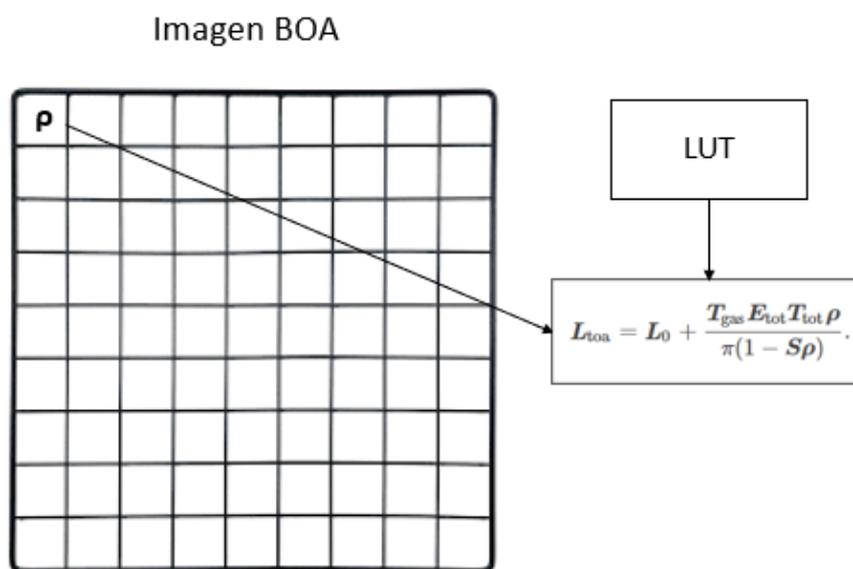


Figura 11. Esquema del cálculo pixel a pixel de la radiancia TOA

- Cálculo de la reflectancia TOA: para el cálculo de la reflectancia TOA es necesario calcular explícitamente la cantidad de radiación solar incidente en techo de la atmósfera y dividir la radiancia por este valor mientras se corrige la diferencia entre radiancia e irradiancia y el ángulo de la radiación solar entrante/incidente (8).

$$R_{toa} = \frac{\pi L_{toa} d^2}{E_{sun} \cos(\theta)} \quad (8)$$

donde,  $R_{toa}$  es la reflectancia TOA,  $L_{toa}$  es la radiancia TOA,  $d$  es la distancia sol-Tierra,  $E_{sun}$  es la irradiancia solar TOA para la banda específica del sensor y  $\theta$  es el ángulo cenital solar (SZA). Estas variables se encuentran en los metadatos obtenidos de la imagen Sentinel-2 TOA.

La transformación de radiación a reflectancia se eliminan los efectos coseno debidos a los diferentes ángulos cenitales solares debido a las diferencias de tiempo entre las distintas adquisiciones de las imágenes. También compensa los diferentes valores de la irradiancia solar que surgen de las diferencias en las bandas espectrales.

El paso final es la obtención del valor de AOD adecuado para cada uno de los píxeles de la imagen final. En la figura 12 se muestra el método empleado para la obtención del valor de AOD para cada uno de los píxeles. Recordando la estructura de la LUTs, sabemos que se había dejado la variable AOD como dinámica, es decir, cada reflectancia obtenida tiene 10 posibles valores, 1 para cada valor de AOD estimado. Por lo tanto, al terminar de realizar los cálculos hay que determinar que imagen TOA simulada se aproxima en mayor medida a la imagen TOA original. Esto nos indicaría que valor de AOD (cada imagen simulada emplea un AOD distinto para el cálculo de la reflectancia) es el que genera una imagen más próxima a la realidad (Anexo 4c).

A efectos prácticos este proceso es muy costoso computacionalmente, debido a que todos estos procesos se realizan pixel a pixel. Con más detalle el proceso llevado a cabo es el siguiente:

- 1) Carga de los datos de partida: lectura y almacenamiento imágenes Sentinel-2 TOA y BOA, metadatos de la imagen TOA, y las LUTs.
- 2) Cálculo del AOD: recorrido de las imágenes en formato matriz pixel a pixel. Situados en el primer pixel de la dos imagen simultáneamente, calculamos la radiancia (7) (incorporamos los datos de la LUT) y seguidamente la reflectancia (8) (incorporamos los metadatos de la imagen TOA). Se repite el proceso 10 veces con los 10 distintos valores de la LUTs y obtenemos para ese pixel 10 valores de reflectancia empleando diferentes valores de AOD. Se realiza un proceso de comparación de estas 10 reflectancias simuladas con la reflectancia original y la más próxima indica que valor de AOD es el empleado en ese píxel para la imagen AOD. Esta metodología queda representada en el anexo 4c.
- 3) Creación de la imagen AOD: El paso anterior se repite para la totalidad de la imagen y los valores de AOD escogidos se van almacenando en una matriz con un formato adecuado para la reconstrucción de una imagen ráster donde cada píxel corresponde a un valor de AOD. Este proceso. Esta metodología queda representada en el anexo 4d.

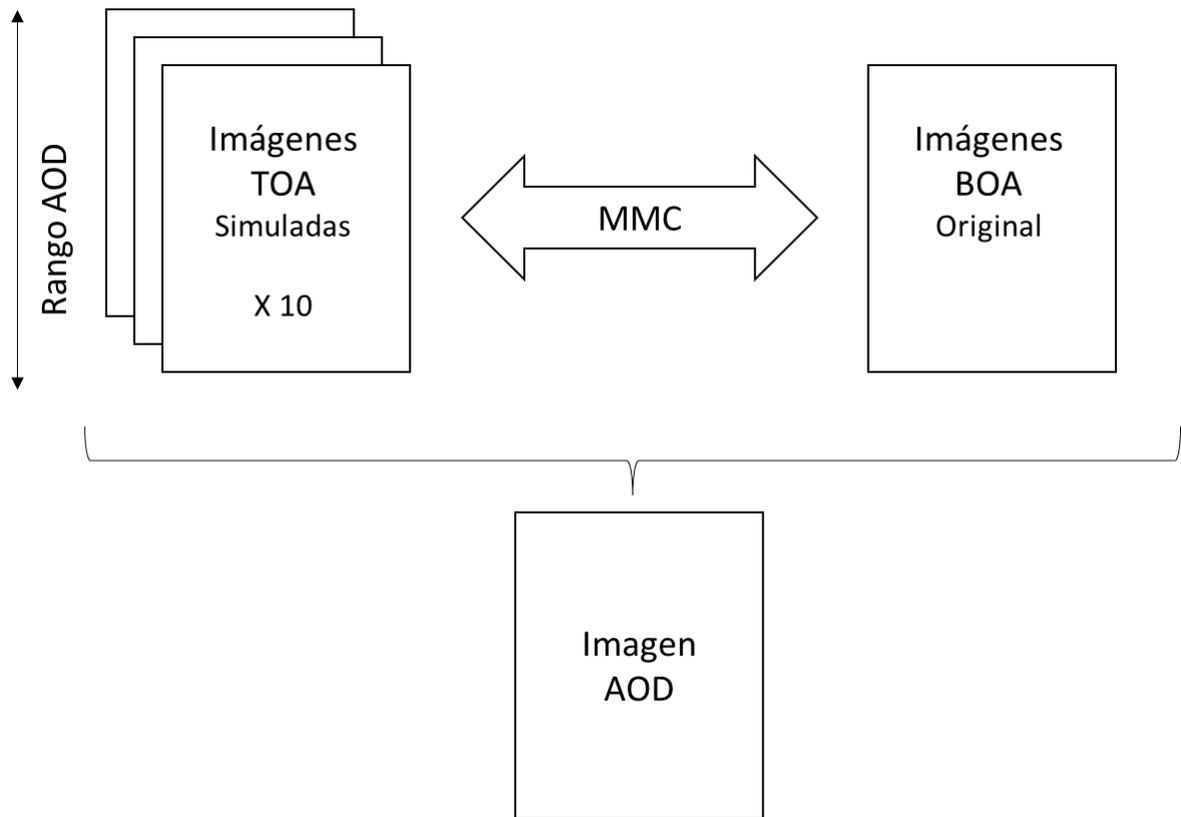


Figura 12. Esquema del cálculo de imagen AOD

#### 4. RESULTADOS

A lo largo de la memoria se han ido resolviendo los objetivos específicos establecidos al inicio de este trabajo que forman parte del proceso necesario para desarrollar una metodología para el cálculo de AOD sobre la ciudad de Valencia.

En primer lugar, se ha desarrollado un código en Google Earth Engine para la descarga automática imágenes Sentinel-2, tanto de nivel 1C como nivel 2A, y la selección de parámetros de filtrado (fecha, localización, % de cobertura nubosa). Después de la aplicación de los filtros correspondientes, se disponía de 52 imágenes de Sentinel-2.

En segundo lugar, se ha creado un archivo tanto de recuperada de la estación AERONET referente a los datos descriptores de la composición atmosférica (Concentración de ozono ( $O_3$ ), concentración de vapor de agua ( $H_2O$ ), albedo de dispersión simple (SSA), factor de asimetría Henyey-Greenstein (G) y coeficiente de Angstrom ( $\alpha$ )) para las fechas de las imágenes seleccionadas y se han descartado las imágenes de los días en los que AERONET no dispone de información (Anexo 2), terminando con un total de 31 imágenes.

En tercer lugar, se ha desarrollado un segundo código en Google Earth Engine para el enmascaramiento de nubes y sombras mediante la aplicación del algoritmo S2Cloudless, en el cual se ha ajustado los parámetros para obtener imágenes con un porcentaje mínimo de nubes y sombras. En este apartado se tomó la decisión de ajustar una máscara agresiva y asumir una pérdida de información, se consideró más relevante tener la seguridad de no calcular sobre píxeles contaminados de nubes o sombras (Anexo 3).

Finalmente, el desarrollo de la metodología que permite el cálculo de AOD a partir de, todos los datos conseguidos a lo largo del proyecto y mediante la aplicación de los conceptos explicados en la memoria. Esta metodología la constituyen dos grandes bloques; la creación de LUTs utilizando el modelo de transferencia radiativa 6SV, donde a partir de los datos de las imágenes 1C y los datos de AERONET para cada uno de los días seleccionados, se obtienen LUTs las variables necesarias para el cálculo del AOD; el desarrollo de un código en Python donde se incorporan los datos de las imágenes (metadatos y reflectancias) y los datos incluidos en las LUTs.

Para la comprobación del funcionamiento de la metodología desarrollada, se aplicó sobre una imagen en una fecha aleatoria (incluida en el conjunto de las 31 imágenes tratadas en este proyecto) y se realizó un recorte sobre la ciudad de Valencia (zona de estudio)(Figura13).

En la figura 13, se puede observar la distribución y los valores de AOD calculados sobre la ciudad de Valencia. Los valores que presenta esta imagen oscilan entre los 0.01 y 0.2, estos valores se encuentran dentro del rango de los valores típicos globales y anuales de AOD [0.01 – 0.5] según Colarco et al. (2014). En esta solución en concreto podemos observar una posible correlación entre los valores elevados y la localización de avenidas principales y por tanto posible acumulación tráfico. Aunque es una opción que esta suposición pueda ser errónea y esta relación se deba a una influencia de las reflectancias superficiales de la imagen en el cálculo del AOD.

## Mapa de AOD obtenido a partir de imágenes de Senteinel-2 mediante metodología propia.

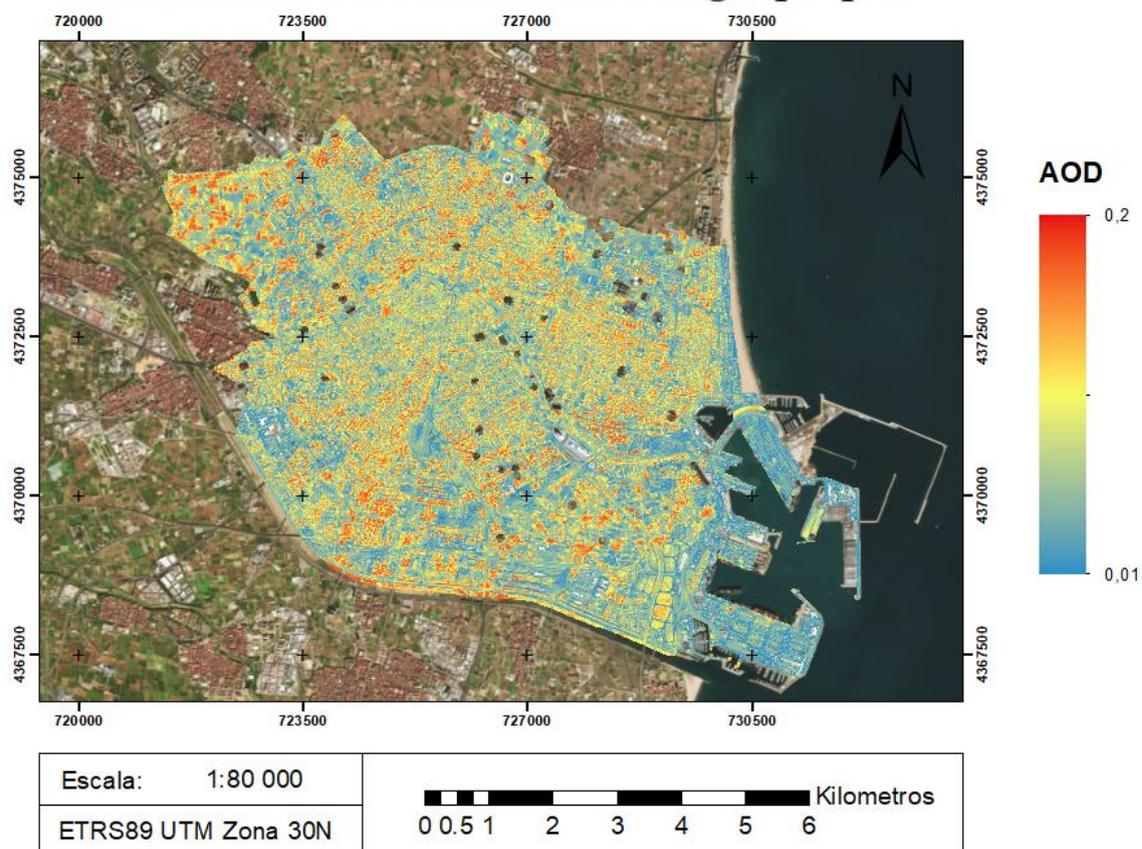


Figura 13. Imagen AOD obtenida sobre la ciudad de Valencia, a partir de la metodología descrita en el trabajo

## 5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta ha demostrado ser efectiva para el cálculo del AOD a partir de imágenes de Sentinel-2, abordando la complejidad de la estimación de aerosoles en áreas urbanas.

El uso de Google Earth Engine (GEE) para el procesamiento de imágenes satelitales de Sentinel-2 demostró ser altamente beneficioso en términos de rendimiento y optimización de recursos y tiempo. Se procesaron imágenes desde enero de 2018 hasta diciembre de 2021, aprovechando las posibilidades de la plataforma en diversos aspectos: selección de metadatos, aplicación de máscaras de nubes y sombras.

Las LUTs generadas con el modelo 6SV son un paso fundamental en el objetivo de la obtención de AOD y a su vez es uno de los más complejos ya que necesita de amplios conocimientos teóricos del funcionamiento de los modelos y funciones de transferencia radiativa. El flujo de trabajo que ofrece el software ALG para la generación de LUTs sencillo y rápido una vez comprendidos todas sus funcionalidades, pero al ser un proceso manual, el procesado de grandes cantidades de datos puede ser tedioso.

El desarrollo del código de cálculo de AOD en Python resultó ser imprescindible a la hora de tratar con datos en formatos distintos: imágenes ráster (.tiff), tablas de metadatos satelitales (.csv) y LUTs (.h5). Aun en diferentes formatos la información en su estado base son números, y Python, con su infinidad de librerías, permite las transformación de todos estos datos en matrices o listas de números y poder realizar cualquier tipo de operación con ellas.

En cuanto a los resultados obtenidos se puede concluir que mediante esta metodología propuesta es posible obtener valores de AOD a partir de imágenes satelitales de alta resolución. A partir de estos resultado el próximo paso sería la realización de un análisis comparativo de las imágenes AOD con datos reales sobre la ciudad de Valencia con el propósito de verificar que los valores de AOD estimados no se han visto afectado por los valores de reflectancia superficiales. Por ejemplo, a raíz de esta preocupación se ha redactado un artículo que realiza un estudio comparativo de los diferentes algoritmos de obtención de AOD (Porres et al., 2024) donde se hace un inciso en el cálculo preciso de las reflectividad superficial de la imágenes satelitales.

Asegurarse de una correcta estimación del AOD es de gran importancia para mejorar la gestión ambiental y la investigación sobre la influencia de los aerosoles en la atmósfera y puede ser una alternativa eficiente para el monitoreo de la calidad del aire y el apoyo en la toma de decisiones para la gestión de la contaminación atmosférica y su impacto en la salud pública.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

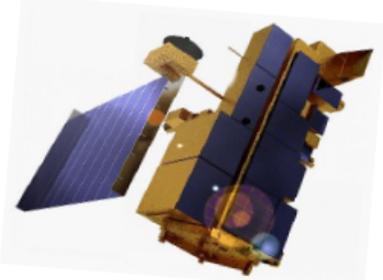
- Colarco, P. R., Kahn, R. A., Remer, L. A., & Levy, R. C. (2014). Impact of satellite viewing-swath width on global and regional aerosol optical thickness statistics and trends. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7), 2313–2335. <https://doi.org/10.5194/amt-7-2313-2014>
- European Environmental Agency (2021). Air quality in Europe – 2021 Report. Report N° 15/2021.
- Heney, L. C., & Greenstein, J. L. (1941). Diffuse radiation in the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 93, 70. <https://doi.org/10.1086/144246>
- Hsu, N. C., Jeong, M., Bettenhausen, C., Sayer, A. M., Hansell, R., Seftor, C. S., Huang, J., & Tsay, S. (2013). Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(16), 9296–9315. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50712>
- Jackson, J. M., Liu, H., Laszlo, I., Kondragunta, S., Remer, L. A., Huang, J., & Huang, H. (2013). Suomi-NPP VIIRS aerosol algorithms and data products. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(22). <https://doi.org/10.1002/2013jd020449>
- Jeong, M., Li, Z., Chu, D. A., & Tsay, S. (2005). Quality and compatibility analyses of global aerosol products derived from the advanced very high resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110(D10). <https://doi.org/10.1029/2004jd004648>
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., Remer, L. A., Vermote, E. F., Chu, A., & Holben, B. N. (1997). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(D14), 17051–17067. <https://doi.org/10.1029/96jd03988>
- Kikuchi, M., Murakami, H., Suzuki, K., Nagao, T. M., & Higurashi, A. (2018). Improved hourly estimates of aerosol optical thickness using spatiotemporal variability derived from Himawari-8 geostationary satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6), 3442–3455. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2800060>
- Lelieveld, Klingmüller, Pozzer, Pöschl, Fnais, Daiber y Münzel (2019) Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal*, Volume 40, Issue 20, 21 May 2019, Pages 1590–1596, <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>
- Levy, R. C., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remer, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F., & Hsu, N. C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and

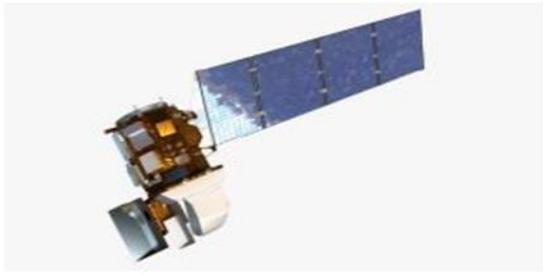
- ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11), 2989–3034. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>
- Liu C, Chen R, Sera F, et al. (2019) Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *N Engl J Med* 2019; 381:705-15. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>
- Lorenzo-Saez, E., Oliver-Villanueva, J.V., Lemus-Zúñiga, L.G., Coll-Aliaga, E., Perpiñá Castillo, C., and Lavallo, C. (2021). An assessment of air quality surveillance network through passive pollution measurement with mobile sensors. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe435>
- Marujo, R. F. B., Fronza, J. G., Soares, A. R., Queiroz, G. R., & Ferreira, K. R. (2021). EVALUATING THE IMPACT OF LASRC AND SEN2COR ATMOSPHERIC CORRECTION ALGORITHMS ON LANDSAT-8/OLI AND SENTINEL-2/MSI DATA OVER AERONET STATIONS IN BRAZILIAN TERRITORY. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-3–2021, 271–277. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-v-3-2021-271-2021>
- Porres MJ, Lorenzo-Sáez E, Solá J, Coll E. (2024). Comparative Study of Algorithms for Obtaining AOD Using High Spatial Resolution Satellite Imagery. *Environmental Sciences Proceedings*. 2023; 28(1):25. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023028025>
- Remer, L. A., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., Li, R., Ichoku, C., Levy, R. C., Kleidman, R. G., Eck, T. F., Vermote, E., & Holben, B. N. (2005). The MODIS Aerosol Algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4), 947–973. <https://doi.org/10.1175/jas3385.1>
- Shiraiwa, M., Ueda, K., Pozzer, A., Lammel, G., Kampf, C. J., Fushimi, A., Enami, S., Arangio, A. M., Fröhlich-Nowoisky, J., Fujitani, Y., Furuyama, A., Lakey, P. S. J., Lelieveld, J., Lucas, K., Morino, Y., Pöschl, U., Takahama, S., Takami, A., Tong, H., Sato, K. (2017). Aerosol Health Effects from Molecular to Global Scales. *Environmental Science & Technology*, 51(23), 13545–13567. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04417>
- Sun, L., Wei, J., Bilal, M., Tian, X., Jia, C., Guo, Y., & Mi, X. (2015). Aerosol Optical Depth Retrieval over Bright Areas Using Landsat 8 OLI Images. *Remote Sensing*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.3390/rs8010023>
- Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J., Herman, M., & Morcette, J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 35(3), 675-686. <https://doi.org/10.1109/36.581987>

Wang, Y., Yuan, Q., Li, T., Tan, S., & Zhang, L. (2021). Full-coverage spatiotemporal mapping of ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> over China from Sentinel-5P and assimilated datasets: Considering the precursors and chemical compositions. *The Science of the Total Environment*, 793, 148535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148535>

## 7. ANEXOS

### 7.1 Anexo 1: Fichas de misiones Satelitales

<b>MODIS</b>		
<b>Descripción</b>		
<p>El sensor MODIS está operativo en los satélites Terra y Aqua, lanzados por la NASA, y proporciona imágenes de la totalidad de la Tierra cada uno o dos días. Está conformado de 36 bandas espectrales a una resolución de 250 metros (bandas 1-2), 500 metros (bandas 3-7) y 1000 metros (8-36).</p>		
<b>Producto</b>		
<p>Los productos MODIS son procesados usando "MODIS Adaptive Processing System" (MODAPS):</p> <p><b>Formato:</b> HDF - EOS</p> <p><b>Resolución:</b> 250 m / 500 m / 1000 m</p> <p><b>Proyección:</b> Sinusoidal / LAEA / Geográfica</p> <p><b>Dátum:</b> World Geodesic System (WGS) 84</p> <p><b>Acceso imágenes:</b> Libre</p>		
<b>Ventajas y desventajas</b>		
<p>Una de las principales ventajas de las imágenes multi espectrales MODIS es su alta resolución temporal, además, a parte del catálogo de imágenes también dispone de multitud de productos derivados, por ejemplo, índices de vegetación EVI y NDVI cada 16 días desde febrero del año 2000. La principal desventaja es su baja resolución espacial de 250-1000 metros.</p>		
		
<p><b>Fecha de Lanzamiento:</b> 1999 (Terra) - 2002 (Aqua)</p> <p><b>Sensor/es:</b> MODIS</p> <p><b>Altitud:</b> 705 km</p> <p><b>Orbita:</b> polar, heliosincrónica, circular</p> <p><b>Revolución:</b> 99 minutos - 14,5 orbitas/día</p> <p><b>Tiempo de revisita:</b> 1 a 2 días</p> <p><b>Resolución Radiométrica:</b> 12-bit</p> <p><b>Resolución espectral:</b> 36 Bandas</p>		
<b>MODIS - Bandas Espectrales</b>		
Bordes - Terreno	250 m	Bandas 1-2
Propiedades - Terreno	500 m	Banda 3-7
Biogeoquímica - Oceano	1000 m	Banda 8-16
Vapor de agua	1000 m	Banda 17-19
Temperatura - Terreno	1000 m	Banda 20-23
Temperatura - Atmósfera	1000 m	Banda 24-25
Cirrus	1000 m	Banda 26-28
Propiedades - Nubes	1000 m	Banda 29
Ozono	1000 m	Banda30
Temperatura - Terreno	1000 m	Banda 31-32
Altitud - Nubes	1000 m	Banda 33-36

<b>Landsat 8</b>																																					
<b>Descripción</b>																																					
<p>El satélite Landsat 8 está conformado por dos sensores, Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), ambos sensores proporcionan una cobertura global a una resolución de 30 metros (bandas VIS, NIR y SWIR), 100 metros (Térmicas) y 15 metros la imagen pancromática en un total de 11 bandas espectrales. Desarrollado por la NASA y el USGS.</p>																																					
<b>Producto</b>	<p><b>Fecha de Lanzamiento:</b> 11 de Febrero de 2013</p> <p><b>Sensor/es:</b> OLI, TIRS</p> <p><b>Altitud:</b> 705 km</p> <p><b>Orbita:</b> polar, heliosincrónica</p> <p><b>Revolución:</b> 99 minutos - 14,5 orbitas/día</p> <p><b>Tiempo de revisita:</b> 16 días</p> <p><b>Resolución radiométrica:</b> 12-bit</p> <p><b>Resolución espectral:</b> 11 Bandas</p>																																				
<p>Los productos Landast son procesados usando "Landsat Produt Generation System (LPGS)":</p> <p><b>Formato:</b> GeoTiff</p> <p><b>Metodo de remuestreo:</b> Convolución Cúbica</p> <p><b>Resolución:</b> 30 m / 60 m / 100 m</p> <p><b>Proyección:</b> Universal Transversa de Mercator</p> <p><b>Dátum:</b> World Geodesic System (WGS) 84</p> <p><b>Acceso imágenes:</b> Libre</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3"><b>Landsat-8 (OLI / TIRS) - Bandas Espectrales</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 m Aerosol</td> <td>0,435 - 0,451</td> <td>Banda 1</td> </tr> <tr> <td>30 m Azul</td> <td>0,452-0,512</td> <td>Banda 2</td> </tr> <tr> <td>30 m Verde</td> <td>0,533 - 0,590</td> <td>Banda 3</td> </tr> <tr> <td>30 m Rojo</td> <td>0,636 - 0,673</td> <td>Banda 4</td> </tr> <tr> <td>30 m NIR</td> <td>0,851 - 0,879</td> <td>Banda 5</td> </tr> <tr> <td>30 m SWIR-1</td> <td>1,566 - 1,651</td> <td>Banda 6</td> </tr> <tr> <td>30 m SWIR-2</td> <td>2,107 - 2,294</td> <td>Banda 7</td> </tr> <tr> <td>15 m Pan</td> <td>0,503 - 0,676</td> <td>Banda 8</td> </tr> <tr> <td>30 m Cirrus</td> <td>1,363 - 1,384</td> <td>Banda 9</td> </tr> <tr> <td>100 m TIR-1</td> <td>10,60 - 11,19</td> <td>Banda 10</td> </tr> <tr> <td>100 m TIR-2</td> <td>11,50 - 12,51</td> <td>Banda 11</td> </tr> </tbody> </table>	<b>Landsat-8 (OLI / TIRS) - Bandas Espectrales</b>			30 m Aerosol	0,435 - 0,451	Banda 1	30 m Azul	0,452-0,512	Banda 2	30 m Verde	0,533 - 0,590	Banda 3	30 m Rojo	0,636 - 0,673	Banda 4	30 m NIR	0,851 - 0,879	Banda 5	30 m SWIR-1	1,566 - 1,651	Banda 6	30 m SWIR-2	2,107 - 2,294	Banda 7	15 m Pan	0,503 - 0,676	Banda 8	30 m Cirrus	1,363 - 1,384	Banda 9	100 m TIR-1	10,60 - 11,19	Banda 10	100 m TIR-2	11,50 - 12,51	Banda 11
<b>Landsat-8 (OLI / TIRS) - Bandas Espectrales</b>																																					
30 m Aerosol	0,435 - 0,451	Banda 1																																			
30 m Azul	0,452-0,512	Banda 2																																			
30 m Verde	0,533 - 0,590	Banda 3																																			
30 m Rojo	0,636 - 0,673	Banda 4																																			
30 m NIR	0,851 - 0,879	Banda 5																																			
30 m SWIR-1	1,566 - 1,651	Banda 6																																			
30 m SWIR-2	2,107 - 2,294	Banda 7																																			
15 m Pan	0,503 - 0,676	Banda 8																																			
30 m Cirrus	1,363 - 1,384	Banda 9																																			
100 m TIR-1	10,60 - 11,19	Banda 10																																			
100 m TIR-2	11,50 - 12,51	Banda 11																																			
<b>Ventajas y desventajas</b>																																					
<p>Landsat 8 es un satélite MSR de libre acceso que mejora la resolución de MODIS a cambio de una peor resolución temporal, pero sin alcanzar a los sensores comerciales como SPOT, QuickView, RapidEye, etc. Además la influencia de factores meteorológicos puede afectar a la disponibilidad de imágenes, a diferencia de los sistemas LiDAR y RADAR.</p>																																					

<b>Landsat 9</b>																																		
<b>Descripción</b>																																		
<p>El satélite Landsat 9 está conformado por dos sensores, Operational Land Imager 2 (OLI-2) y el Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2), ambos sensores proporcionan una cobertura global a una resolución de 30 metros (bandas VIS, NIR y SWIR), 100 metros (Térmicas) y 15 metros la imagen pancromática en un total de 11 bandas espectrales.</p>																																		
<b>Producto</b>	<p><b>Fecha de Lanzamiento:</b> Septiembre de 2021</p> <p><b>Sensor/es:</b> OLI-2, TIRS-2</p> <p><b>Altitud:</b> 705 km</p> <p><b>Orbita:</b> polar, heliosincrónica</p> <p><b>Revolución:</b> 99 minutos - 14,5 orbitas/día</p> <p><b>Tiempo de revisita:</b> 16 días</p> <p><b>Resolución Radiométrica:</b> 14-bit</p> <p><b>Resolución espectral:</b> 11 Bandas</p>																																	
<p>Los productos Landast son procesados usando "Landsat Produt Generation System (LPGS)":</p> <p><b>Formato:</b> GeoTiff</p> <p><b>Metodo de remuestreo:</b> Convolución Cúbica</p> <p><b>Resolución:</b> 30 m / 60 m / 100 m</p> <p><b>Proyección:</b> Universal Transversa de Mercator</p> <p><b>Dátum:</b> World Geodesic System (WGS) 84</p> <p><b>Acceso imágenes:</b> Libre</p>	<p><b>Landsat-9 (OLI-2 / TIES-2) - Bandas Espectrales</b></p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>30 m Aerosol</td> <td>0,435 - 0,451</td> <td>Banda 1</td> </tr> <tr> <td>30 m Azul</td> <td>0,452-0,512</td> <td>Banda 2</td> </tr> <tr> <td>30 m Verde</td> <td>0,533 - 0,590</td> <td>Banda 3</td> </tr> <tr> <td>30 m Rojo</td> <td>0,636 - 0,673</td> <td>Banda 4</td> </tr> <tr> <td>30 m NIR</td> <td>0,851 - 0,879</td> <td>Banda 5</td> </tr> <tr> <td>30 m SWIR-1</td> <td>1,566 - 1,651</td> <td>Banda 6</td> </tr> <tr> <td>30 m SWIR-2</td> <td>2,107 - 2,294</td> <td>Banda 7</td> </tr> <tr> <td>15 m Pan</td> <td>0,503 - 0,676</td> <td>Banda 8</td> </tr> <tr> <td>30 m Cirrus</td> <td>1,363 - 1,384</td> <td>Banda 9</td> </tr> <tr> <td>100 m TIR-1</td> <td>10,60 - 11,19</td> <td>Banda 10</td> </tr> <tr> <td>100 m TIR-2</td> <td>11,50 - 12,51</td> <td>Banda 11</td> </tr> </tbody> </table>	30 m Aerosol	0,435 - 0,451	Banda 1	30 m Azul	0,452-0,512	Banda 2	30 m Verde	0,533 - 0,590	Banda 3	30 m Rojo	0,636 - 0,673	Banda 4	30 m NIR	0,851 - 0,879	Banda 5	30 m SWIR-1	1,566 - 1,651	Banda 6	30 m SWIR-2	2,107 - 2,294	Banda 7	15 m Pan	0,503 - 0,676	Banda 8	30 m Cirrus	1,363 - 1,384	Banda 9	100 m TIR-1	10,60 - 11,19	Banda 10	100 m TIR-2	11,50 - 12,51	Banda 11
30 m Aerosol	0,435 - 0,451	Banda 1																																
30 m Azul	0,452-0,512	Banda 2																																
30 m Verde	0,533 - 0,590	Banda 3																																
30 m Rojo	0,636 - 0,673	Banda 4																																
30 m NIR	0,851 - 0,879	Banda 5																																
30 m SWIR-1	1,566 - 1,651	Banda 6																																
30 m SWIR-2	2,107 - 2,294	Banda 7																																
15 m Pan	0,503 - 0,676	Banda 8																																
30 m Cirrus	1,363 - 1,384	Banda 9																																
100 m TIR-1	10,60 - 11,19	Banda 10																																
100 m TIR-2	11,50 - 12,51	Banda 11																																
<b>Ventajas y desventajas</b>																																		
<p>Landsat 9 fue diseñado para que los productos generados por ambos Landsat 8 y 9 fueran indistinguibles, con la única diferencia de una mejora en la resolución radiométrica. Con una resolución temporal de 16 días y un desfase de 8 días frente a Landsat 8, permite un catálogo de productos Landsat cada 8 días. Aunque la fiabilidad de los productos de Landsat 9 no será validad hasta principios de 2023</p>																																		

<b>Sentinel-2</b>																																								
<b>Descripción</b>																																								
<p>La misión Sentinel-2 de Copernicus esta compuesta por una pareja de satélites (S2A y S2B) desfasados 180º permitiendo de esta forma un tiempo de revisita de 5 días, cuenta con un instrumento óptico que captura 13 bandas, 4 de ellas a 10m, 6 a 20 metros y 3 a 60 m de resolución. Está desarrollado por la ESA dentro del programa copernicus.</p>																																								
<b>Producto</b>	<p><b>Fecha de Lanzamiento:</b> S2A (2015) - S2B (2017)</p> <p><b>Sensor/es:</b> MSI</p> <p><b>Altitud:</b> 786 km</p> <p><b>Orbita:</b> polar, heliosincrónica, circular</p> <p><b>Tiempo de revisita:</b> 5 días</p> <p><b>Resolución Radiométrica:</b> 12-bit</p> <p><b>Resolución espectral:</b> 13 Bandas</p>																																							
<p>Toda información captada por el instrumento MSI es procesada por el "Payload Data Ground Segment" (PDGS):</p> <p><b>Formato:</b> SAFE</p> <p><b>Resolución:</b> 10 m / 20 m / 60 m</p> <p><b>Proyección:</b> Universal Transversa de Mercator</p> <p><b>Dátum:</b> World Geodesic System (WGS) 84</p> <p><b>Acceso imágenes:</b> Libre</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3"><b>Sentinel-2 - Bandas Espectrales</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60 m Aerosol</td> <td>0,430 - 0,450</td> <td>Banda 1</td> </tr> <tr> <td>10 m Azul</td> <td>0,450 - 0,520</td> <td>Banda 2</td> </tr> <tr> <td>10 m Verde</td> <td>0,540 - 0,570</td> <td>Banda 3</td> </tr> <tr> <td>10 m Rojo</td> <td>0,650 - 0,680</td> <td>Banda 4</td> </tr> <tr> <td>20 m Borde Rojo 1</td> <td>0,690 - 0,710</td> <td>Banda 5</td> </tr> <tr> <td>20 m Borde Rojo 2</td> <td>0,730 - 0,740</td> <td>Banda 6</td> </tr> <tr> <td>20 m Borde Rojo 3</td> <td>0,770 - 0,790</td> <td>Banda 7</td> </tr> <tr> <td>10 m NIR 1</td> <td>0,780 - 0,900</td> <td>Banda 8</td> </tr> <tr> <td>20 m NIR 2</td> <td>0,850 - 0,870</td> <td>Banda 8a</td> </tr> <tr> <td>60 m Vapor de agua</td> <td>0,930 - 0,950</td> <td>Banda 9</td> </tr> <tr> <td>60 m Cirrus</td> <td>1,360 - 1,390</td> <td>Banda 10</td> </tr> <tr> <td>20 m SWIR</td> <td>1,560 - 1,650</td> <td>Banda 11</td> </tr> </tbody> </table>	<b>Sentinel-2 - Bandas Espectrales</b>			60 m Aerosol	0,430 - 0,450	Banda 1	10 m Azul	0,450 - 0,520	Banda 2	10 m Verde	0,540 - 0,570	Banda 3	10 m Rojo	0,650 - 0,680	Banda 4	20 m Borde Rojo 1	0,690 - 0,710	Banda 5	20 m Borde Rojo 2	0,730 - 0,740	Banda 6	20 m Borde Rojo 3	0,770 - 0,790	Banda 7	10 m NIR 1	0,780 - 0,900	Banda 8	20 m NIR 2	0,850 - 0,870	Banda 8a	60 m Vapor de agua	0,930 - 0,950	Banda 9	60 m Cirrus	1,360 - 1,390	Banda 10	20 m SWIR	1,560 - 1,650	Banda 11
<b>Sentinel-2 - Bandas Espectrales</b>																																								
60 m Aerosol	0,430 - 0,450	Banda 1																																						
10 m Azul	0,450 - 0,520	Banda 2																																						
10 m Verde	0,540 - 0,570	Banda 3																																						
10 m Rojo	0,650 - 0,680	Banda 4																																						
20 m Borde Rojo 1	0,690 - 0,710	Banda 5																																						
20 m Borde Rojo 2	0,730 - 0,740	Banda 6																																						
20 m Borde Rojo 3	0,770 - 0,790	Banda 7																																						
10 m NIR 1	0,780 - 0,900	Banda 8																																						
20 m NIR 2	0,850 - 0,870	Banda 8a																																						
60 m Vapor de agua	0,930 - 0,950	Banda 9																																						
60 m Cirrus	1,360 - 1,390	Banda 10																																						
20 m SWIR	1,560 - 1,650	Banda 11																																						
<b>Ventajas y desventajas</b>																																								
<p>La principal ventaja de las imágenes Sentinel-2 es la mejora en resolución espacial a 10m frente a los 30 metros de las imágenes Landsat y su revisita de 5 días. Las desventajas del Snetinel-2 son las limitaciones atmosféricas, comunes a cualquier instrumento óptico, que impiden la captura de imágenes en la superficie de la Tierra.</p>																																								

## 7.2 Anexo 2: Imágenes Sentinel-2 y sus parámetros atmosféricos (AERONET)

Fecha	Bands	O3 concentration	H <sub>2</sub> O concentration	Aerosol optical thickness	H-G asymmetry factor	Exponente de Angstrom	Singel Scattering Albedo	Ground Altitude	Solar zenith angle	Visual zenith angle
15/02/2018	B2	0.32932	1.60242	0.01 - 0.4	0.644826	1.76271	0.91810	0.016	54.634	3.542
	B4				0.619671		0.89120			3.756
20/02/2018	B2	0.33114	1.59722	0.01 - 0.4	0.670622	1.18873	0.97025	0.016	52.922	3.556
	B4				0.653075		0.92520			3.756
01/05/2018	B2			0.01 - 0.6				0.016	27.134	3.567
	B4									3.765
11/05/2018	B2			0.01 - 0.7				0.016	24.542	3.562
	B4									3.761
21/05/2018	B2	0.35046	1.94826	0.01 - 0.4	0.681827	1.66230	0.98685	0.016	22.547	3.547
	B4				0.623886		0.98245			3.766
26/05/2018	B2			0.01 - 0.4				0.016	21.801	3.481
	B4									3.679
31/05/2018	B2	0.34332	2.10376	0.01 - 0.4	0.689848	1.72037	0.95162	0.016	21.203	3.533
	B4				0.658202		0.93961			3.732
04/08/2018	B2			0.01 - 0.4				0.016	26.314	3.510
	B4									3.708
09/08/2018	B2			0.01 - 0.4				0.016	27.456	3.577
	B4									3.774
14/08/2018	B2	0.30872	2.78899	0.01 - 0.4	0.692543	1.52370	0.98600	0.016	28.701	3.507
	B4				0.660243		0.98230			3.706
19/08/2018	B2	0.30737	2.34247	0.01 - 0.4	0.678640	1.87912	0.95658	0.016	30.012	3.567
	B4				0.629187		0.94076			3.754
24/08/2018	B2	0.30598	2.94027	0.01 - 0.4	0.688569	1.72276	0.97876	0.016	31.423	3.476
	B4				0.628840		0.97278			3.674
29/08/2018	B2			0.01 - 0.4				0.016	32.886	3.609
	B4									3.805
07/11/2018	B2	0.28672	2.09257	0.01 - 0.4	0.684602	1.44824	0.98423	0.016	56.478	3.540
	B4				0.653445		0.97310			3.739
27/11/2018	B2	0.29057	0.97263	0.01 - 0.4	0.726545	1.40812	0.85283	0.016	61.393	3.495
	B4				0.684713		0.81430			3.703
05/02/2019	B2			0.01 - 0.4				0.016	57.796	3.530
	B4									3.731
20/02/2019	B2	0.33114	1.16473	0.01 - 0.4	0.703464	1.37365	0.97255	0.016	53.004	3.559
	B4				0.659022		0.95600			3.755
25/02/2019	B2	0.33295	0.70684	0.01 - 0.4	0.659035	1.59967	0.93840	0.016	51.221	3.528
	B4				0.618384		0.93295			3.729
06/05/2019	B2			0.01 - 0.4				0.016	25.830	3.542
	B4									3.734
11/05/2019	B2	0.35562	2.28552	0.01 - 0.4	0.678830	1.25946	0.96909	0.016	24.589	3.586
	B4				0.662314		0.96545			3.790
26/05/2019	B2	0.34689	1.74333	0.01 - 0.4	0.681096	1.88694	0.96264	0.016	21.822	3.505
	B4				0.627426		0.95096			3.723
31/05/2019	B2	0.34332	1.74254	0.01 - 0.4	0.665118	1.61621	0.90608	0.016	21.215	3.568
	B4				0.653366		0.92164			3.764
04/08/2019	B2			0.01 - 0.4				0.016	26.248	3.559
	B4									3.759
09/08/2019	B2			0.01 - 0.4				0.016	27.387	3.571
	B4									3.767
14/08/2019	B2	0.30872	2.82769	0.01 - 0.4	0.703607	1.36891	0.95777	0.016	28.624	3.559
	B4				0.700393		0.96327			3.754
19/08/2019	B2			0.01 - 0.4				0.016	29.934	3.582
	B4									3.781
24/08/2019	B2	0.30598	2.25415	0.01 - 0.4	0.683698	1.68143	0.95297	0.016	31.335	3.559
	B4				0.659727		0.93278			3.754
12/11/2019	B2	0.28655	1.06645	0.01 - 0.4	0.708168	1.19761	0.94797	0.016	57.815	3.561
	B4				0.685795		0.93397			3.760
10/02/2020	B2	0.32617	1.72734	0.01 - 0.4	0.689374	2.09641	0.97045	0.016	56.391	3.451
	B4				0.649093		0.96485			3.663
15/02/2020	B2	0.32931	1.22249	0.01 - 0.4	0.693346	1.86624	0.99240	0.016	54.792	3.480
	B4				0.646606		0.99030			3.674
20/02/2020	B2	0.33107	1.00084	0.01 - 0.4	0.684807	1.87862	0.96385	0.016	53.096	3.464
	B4				0.627578		0.95465			3.666
25/02/2020	B2			0.01 - 0.4				0.016	51.309	3.510
	B4									3.706
05/05/2020	B2			0.01 - 0.4				0.016	25.905	3.520
	B4									3.716
10/05/2020	B2			0.01 - 0.4				0.016	24.651	3.590
	B4									3.792
20/05/2020	B2			0.01 - 0.4				0.016	22.623	3.591
	B4									3.789
30/05/2020	B2	0.34404	2.18572	0.01 - 0.4	0.678627	1.83793	0.96163	0.016	21.245	3.595
	B4				0.652227		0.94956			3.792
09/06/2020	B2	0.33691	1.95102	0.01 - 0.4	0.676548	1.98917	0.97738	0.016	20.530	3.586
	B4				0.634568		0.96912			3.791
13/08/2020	B2	0.30893	2.39571	0.01 - 0.4	0.683849	1.32021	0.93339	0.016	28.561	3.509
	B4				0.660098		0.94515			3.720
18/08/2020	B2			0.01 - 0.4				0.016	29.869	3.562
	B4									3.761
23/08/2020	B2	0.30626	3.70015	0.01 - 0.4	0.707196	1.46094	0.99020	0.016	31.266	3.544
	B4				0.677135		0.98920			3.740
28/08/2020	B2	0.30487	3.16432	0.01 - 0.4	0.683349	1.22164	0.98950	0.016	32.731	3.557
	B4				0.653512		0.99020			3.757
01/11/2020	B2			0.01 - 0.4				0.016	54.817	3.567
	B4									3.798
11/11/2020	B2	0.28658	1.62481	0.01 - 0.4	0.676172	1.55135	0.93647	0.016	57.751	3.557
	B4				0.643803		0.91753			3.742
21/11/2020	B2	0.28859	1.06306	0.01 - 0.4	0.715268	0.54124	0.87753	0.016	60.247	3.550
	B4				0.733520		0.88003			3.738
19/02/2021	B2	0.33077	1.17393	0.01 - 0.4	0.749119	0.77051	0.93956	0.016	53.177	3.546
	B4				0.727743		0.97058			3.742
20/05/2021	B2	0.35118	2.27988	0.01 - 0.4	0.717310	0.93090	0.87540	0.016	22.674	3.572
	B4				0.718704		0.87350			3.768
13/08/2021	B2	0.30893	2.62776	0.01 - 0.4	0.746959	0.48422	0.89955	0.016	28.502	3.539
	B4				0.723730		0.95435			3.731
28/08/2021	B2			0.01 - 0.4				0.016	32.667	3.527
	B4									3.732
16/11/2021	B2	0.28694	1.37736	0.01 - 0.4	0.664645	1.05739	0.73367	0.016	59.002	3.570
	B4				0.647851		0.61474			3.765
26/11/2021	B2			0.01 - 0.4				0.016	61.249	3.545
	B4									3.737

### 7.3 Anexo 2: Código GEE – Enmascaramiento S2Cloudless

```
// Zona de estudio, fechas, huella, porcentaje de nubes

var CLOUD_FILTER = 30;           //Procentaje Máximo permitido de cobertura nubosa de la colección de imágenes
var CLD_PRB_THRESH = 60;        //Probabilidad de nubes (%); valores mayores a indicado se consideran nubes
var NIR_DRK_THRESH = 0.15;     //Reflectancia del infrarrojo cercano;
var CLD_PRJ_DIST = 2;          //Distancia máxima (Km) a la que buscar las sombras de nubes
var BUFFER = 50;               //Distancia (m) de los bordes de indentificación de nubes
var ali_id = '30SXH'
var val_id = '30SXJ'
var cas_id = '30TYK'

// Acceso a las imágenes aplicando lo criterios de filtrado adecuados:

function get_s2_sr_cld_col(aoi, start_date, end_date, id){
  // Importación y filtrado de la imagen S2
  var sr_col = s2_2AHarmonized.filterDate(start_date,end_date)
  .filterBounds(aoi)
  .filterMetadata('MGRS_TILE','equals',id)
  .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',CLOUD_FILTER));

  // Importación y filtrado de s2cloudless
  var cp_col = s2Clouds.filterDate(start_date,end_date)
  .filterBounds(aoi);

  // Unión de la colección filtrada de s2cloudless y la colección de reflectancia
  return ee.ImageCollection(ee.Join.saveFirst('s2cloudless').apply({
    'primary': sr_col,
    'secondary': cp_col,
    'condition': ee.Filter.equals({
      'leftField': 'system:index',
      'rightField': 'system:index'
    })
  }));
}

// Función: Creación de la capa de nubes
function add_cloud_bands(img){
  // Get s2cloudless image, subset the probability band.
  var cld_prb = ee.Image(img.get('s2cloudless')).select('probability')
  // Condition s2cloudless by the probability threshold value.
  var is_cloud = cld_prb.gt(CLD_PRB_THRESH).rename('clouds')
  // Add the cloud probability layer and cloud mask as image bands.
  return img.addBands(ee.Image([cld_prb, is_cloud]))
}

// Función: Creación de la capa de sombras
function add_shadow_bands(img){
  // Identify water pixels from the SCL band.
  var not_water = img.select('SCL').neq(6)
  // var not_water = img.normalizedDifference(['B3', 'B8']).lt(0.2)
  // Identify dark NIR pixels that are not water (potential cloud shadow pixels).
  var SR_BAND_SCALE = 1e4
  var dark_pixels = img.select('B8').lt(NIR_DRK_THRESH*SR_BAND_SCALE).multiply(not_water).rename('dark_pixels')
  // Determine the direction to project cloud shadow from clouds (assumes UTM projection).
  var shadow_azimuth = ee.Number(90).subtract(ee.Number(img.get('MEAN_SOLAR_AZIMUTH_ANGLE')));
  // Project shadows from clouds for the distance specified by the CLD_PRJ_DIST input.
  var cld_proj = (img.select('clouds').directionalDistanceTransform(shadow_azimuth, CLD_PRJ_DIST*10)
  .reproject({'crs': img.select(0).projection(), 'scale': 100})
  .select('distance')
  .mask()
  .rename('cloud_transform'))
  // Identify the intersection of dark pixels with cloud shadow projection.
  var shadows = cld_proj.multiply(dark_pixels).rename('shadows')
  // Add dark pixels, cloud projection, and identified shadows as image bands.
  return img.addBands(ee.Image([dark_pixels, cld_proj, shadows]))
}
```

```

// Función: Unión de las capas de nubes y sombras
function add_cld_shdw_mask(img){
  // Add cloud component bands.
  var img_cloud = add_cloud_bands(img)
  // Add cloud shadow component bands.
  var img_cloud_shadow = add_shadow_bands(img_cloud)

  // Combine cloud and shadow mask, set cloud and shadow as value 1, else 0.
  var is_cld_shdw = img_cloud_shadow.select('clouds').add(img_cloud_shadow.select('shadows')).gt(0)

  // Remove small cloud-shadow patches and dilate remaining pixels by BUFFER input.
  // 20 m scale is for speed, and assumes clouds don't require 10 m precision.
  var is_cld_shdw2 = (is_cld_shdw.focal_min(2).focal_max(BUFFER*2/20)
    .reproject({'crs': img.select([0]).projection(), 'scale': 20})
    .rename('cloudmask'))

  // Add the final cloud-shadow mask to the image.
  return img_cloud_shadow.addBands(is_cld_shdw2)
}

// Función: Aplicación de la máscara en las imágenes de la colección
function apply_cld_shdw_mask(img) {
  // # Subset the cloudmask band and invert it so clouds/shadow are 0, else 1.
  var not_cld_shdw = img.select('cloudmask').not()

  // # Subset reflectance bands and update their masks, return the result.
  return img.select('B.*').updateMask(not_cld_shdw)
}

```

## 7.4 Anexo 4a: Código Python – Función lectura y tratamiento de las LUTs

```
def reader_Lut(lut_path):  
    ## Lectura y promediado de las variables de las LUTs  
  
    ## Lectura del fichero .h5 (LUT)  
    f = h5py.File(lut_path, 'r')  
    keys = list(f.keys())  
  
    ## Organización de los grupos del fichero .h5  
    IO          = pd.DataFrame(np.array(f[keys[0]]).T)  
    LUTdata     = pd.DataFrame(np.array(f[keys[1]]).T)  
    LUTheaders  = pd.DataFrame(np.array(f[keys[2]]).T)  
    dynamic     = pd.DataFrame(np.array(f[keys[3]]).T)  
    static      = pd.DataFrame(np.array(f[keys[4]]).T)  
    wvl         = pd.DataFrame(np.array(f[keys[5]]).T)  
  
    ## Adquisición de las variables atmosféricas contenidas en el grupo LUTdata  
    L0  = LUTdata[:wvl.size]  
    Tgas = LUTdata[wvl.size:2*wvl.size]  
    Etot = LUTdata[2*wvl.size:3*wvl.size]  
    Ttot = LUTdata[3*wvl.size:4*wvl.size]  
    S    = LUTdata[4*wvl.size:]  
  
    ## Convolución de las variables en el rango de longitud de onda de la banda espectral  
    L0_mean = L0.mean(axis=0)  
    Tgas_mean = Tgas.mean(axis=0)  
    Etot_mean = Etot.mean(axis=0)  
    Ttot_mean = Ttot.mean(axis=0)  
    S_mean = S.mean(axis=0)
```

## 7.5 Anexo 4b: Código Python – Lectura de imágenes Sentinel-2

```
def reader(img_path):  
    ## Lectura de imágenes sentinel 2  
  
    with rs.open(img_path) as src:  
        band2 = src.read(2)  
        band4 = src.read(4)  
        profile = src.profile  
        profile.update(  
            dtype=rs.float64,  
            count=1)  
  
    return band2,band4,src.crs,src.transform,profile
```

## 7.6 Anexo 4c: Código Python – Cálculo del AOD

```

def aot_image(mask, S2A, S2A_avg, S1C, L0, Tg, Et, Tt, S, RCC, MSZA, SI) :
    ## Creación de la imagen AOT

    # Inicialización de variables
    aot_r = [0.010,0.064,0.119,0.173,0.2228,0.282,0.337,0.391,0.446,0.500]
    aux = []
    aot_n = []
    aot_f = []

    S2A_avg = S2A*mask
    c = 0
    tl_start = process_time()
    ## Lectura pixel a pixel de las imágenes 2A y 1C
    for rowa,rowb,rowc in zip(S2A,S2A_avg,S1C) :

        c+=1
        if c % 100 == 0:
            tl_stop = process_time()
            print("Line "+str(c)+" : Elapsed time during the whole program in seconds:",tl_stop-tl_start)
            tl_start = process_time()
        for p1,p2,p3 in zip(rowa,rowb,rowc) :

            if np.isnan(p3) or p2 == 0: ## El valor 0 en la imagen corresponde a valor Nulo(NoData - Mask)

                ## Conversión del valor Nulo 0 a 99
                aot_n.append(99)

            else:

                ##6SV
                ## Cálculo de la radiancia TOA simulada para los 10 niveles de AOT
                RTOA_0010 = L0[0] + (1/math.pi)*(Tg[0]*Et[0]*Tt[0]*(p1/10000))/(1-S[0]*(p2/10000))
                RTOA_0064 = L0[1] + (1/math.pi)*(Tg[1]*Et[1]*Tt[1]*(p1/10000))/(1-S[1]*(p2/10000))
                RTOA_0119 = L0[2] + (1/math.pi)*(Tg[2]*Et[2]*Tt[2]*(p1/10000))/(1-S[2]*(p2/10000))
                RTOA_0173 = L0[3] + (1/math.pi)*(Tg[3]*Et[3]*Tt[3]*(p1/10000))/(1-S[3]*(p2/10000))
                RTOA_0228 = L0[4] + (1/math.pi)*(Tg[4]*Et[4]*Tt[4]*(p1/10000))/(1-S[4]*(p2/10000))
                RTOA_0282 = L0[5] + (1/math.pi)*(Tg[5]*Et[5]*Tt[5]*(p1/10000))/(1-S[5]*(p2/10000))
                RTOA_0337 = L0[6] + (1/math.pi)*(Tg[6]*Et[6]*Tt[6]*(p1/10000))/(1-S[6]*(p2/10000))
                RTOA_0391 = L0[7] + (1/math.pi)*(Tg[7]*Et[7]*Tt[7]*(p1/10000))/(1-S[7]*(p2/10000))
                RTOA_0446 = L0[8] + (1/math.pi)*(Tg[8]*Et[8]*Tt[8]*(p1/10000))/(1-S[8]*(p2/10000))
                RTOA_0500 = L0[9] + (1/math.pi)*(Tg[9]*Et[9]*Tt[9]*(p1/10000))/(1-S[9]*(p2/10000))

                ## Cálculo de la reflectancia TOA simulada para los 10 niveles de AOT
                LTOA_0010 = ((RTOA_0010 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0064 = ((RTOA_0064 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0119 = ((RTOA_0119 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0173 = ((RTOA_0173 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0228 = ((RTOA_0228 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0282 = ((RTOA_0282 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0337 = ((RTOA_0337 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0391 = ((RTOA_0391 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0446 = ((RTOA_0446 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))
                LTOA_0500 = ((RTOA_0500 * math.pi * (1/RCC)) / (math.cos(math.radians(MSZA)) * SI))

                aux.append([LTOA_0010,LTOA_0064,LTOA_0119,LTOA_0173,LTOA_0228,LTOA_0282,
                            LTOA_0337,LTOA_0391,LTOA_0446,LTOA_0500])

                ## Interpolación del valor de AOT según el valor TOA original

                f = interpolate.interpld(aux[0],aot_r)
                try:

                    aot_n.append(float(f(p3/10000)))
                    aux = []

                except:

                    aot_n.append(99)
                    aux = []

            aot_f.append(aot_n) ## Fila de valores AOT calculados
            aot_n = []

    aot_arr = np.array(aot_f) ## Conversión a tipo array

    return(aot_arr)

```

## 7.7 Anexo 4d: Código Python – Creación de la imagen ráster de AOD

```
def create_aot(name, img, aot, crs, transform):
    ## Creación y guardado de la imagen AOT final

    with rs.open(
        'C:/ALG/LUTs_folder/final/'+name+'.tiff', ## Ruta
        'w', ## Modo: "w" escritura
        driver='GTiff', ## Formato de la imagen
        height=img.shape[0], ## Altura de la imagen (Misma que la imagen de inicio)
        width=img.shape[1], ## Anchura (Misma que la imagen de inicio)
        count=1, ## Número de bandas
        dtype='float64', ## Tipo de dato (numérico 64 bytes)
        crs=crs, ## Sistema de referencia
        transform=transform ## Transformación (Afin)
    ) as dst:
        dst.nodata = 99 ## Establecer NoData
        dst.write(aot.astype(np.float64), 1) ## Escritura de los datos (imagen AOT)

def create_aot_stack(name, meta, aot):
    ## Creación y guardado de la imagen AOT final

    with rs.open(
        'C:/ALG/LUTs_folder/final/'+name+'.tiff', ## Ruta
        'w', ## Modo: "w" escritura
        **meta ## Metadatos de la imagen de salida
    ) as dst:
        for id, layer in enumerate(aot, start=1):
            dst.write_band(id, layer) ## Escritura de los datos (imagen AOT)
```

## 7.8 Anexo 5: Código Python – Programa principal que ejecuta todas las funciones para la creación de la imagen AOD

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import rasterio as rs
import numpy as np
import sys
import os

from time import process_time
from datetime import datetime
from pandas import *

from t22_fun_final import *

print(datetime.today().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
print()

## Inicialización de variables de ruta
## Caraga de datos (Imágenes Sentinel 2 Nivel 1C y 2A,
## y tablas LUT correspondientes a la banda 2 y 4)

## Listado de imágenes 2A
dirc = r'D:\AIDIMME\airLUISA\2A'
img_list_2A = []
for e in os.listdir(dirc):
    f = os.path.join(dirc, e)
    if os.path.isfile(f):
        ## print(f)
        img_list_2A.append(f)

## Listado de imágenes 1C
dirc = r'D:\AIDIMME\airLUISA\1C'
img_list_1C = []
for e in os.listdir(dirc):
    f = os.path.join(dirc, e)
    if os.path.isfile(f):
        ## print(f)
        img_list_1C.append(f)

## Listado de Look-up Tables
dirc = r'C:\ALG\LUTs_folder\LUT_B2'
lut_path_B2 = []
for e in os.listdir(dirc):
    f = os.path.join(dirc, e)
    if os.path.isfile(f):
        ## print(f)
        lut_path_B2.append(f)

dirc = r'C:\ALG\LUTs_folder\LUT_B4'
lut_path_B4 = []
for e in os.listdir(dirc):
    f = os.path.join(dirc, e)
    if os.path.isfile(f):
        ## print(f)
        lut_path_B4.append(f)

lut_path_B2 = lut_path_B2[::2]
lut_path_B4 = lut_path_B4[::2]
```

```

## Metadata de las imágenes
metadata = read_csv("metadatosS2_1C.csv")

name = metadata['FECHA'].tolist()
print(name)
print()
MSZA = metadata['MEAN_SOLAR_ZENITH_ANGLE'].tolist()
RCC = metadata['REFLECTANCE_CONVERSION_CORRECTION'].tolist()
SI_B2 = metadata['SOLAR_IRRADIANCE_B2'].tolist()
SI_B4 = metadata['SOLAR_IRRADIANCE_B4'].tolist()

print(datetime.today().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
print()

for i, img_list_2A in enumerate(img_list_2A):

    t1_start = process_time()

    ####Lectura de imágenes raster
    ## Lectura de la imagen 1C
    b2_1C,b4_1C,crs_1C,transform_1C,profile = reader(img_list_1C[i])

    ## Lectura imágenes 2A
    b2_2A,b4_2A,crs_2A,transform_2A,profile = reader(img_list_2A)

    ## Lectura máscaras
    mask = readMask(img_list_mask[i])
    mask = 1 - mask

    t1_stop = process_time()
    print("READ: Elapsed time during the whole program in seconds:",t1_stop-t1_start)

    #### Cálculo de LTOA Simulada en banda B2
    ## Cálculo del valor aot interpolado para cada pixel de la imagen
    t1_start = process_time()
    LOB2_mean,TgasB2_mean,EtotB2_mean,TtotB2_mean,SB2_mean = reader_Lut(lut_path_B2[i])
    print(LOB2_mean)
    aot_B2 = aot_image(mask,b2_2A,b2_2A_avg,b2_1C,LOB2_mean,TgasB2_mean,EtotB2_mean
        ,TtotB2_mean,SB2_mean,RCC[i],MSZA[i],SI_B2[i])
    t1_stop = process_time()
    print("AOT B2: Elapsed time during the whole program in seconds:",t1_stop-t1_start)

    ## Creación de la imagen raster de aot B2
    t1_start = process_time()
    create_aot(name[i]+"_B2",b2_2A,aot_B2,crs_2A,transform_2A)
    t1_stop = process_time()
    print("TIFF: Elapsed time during the whole program in seconds:",t1_stop-t1_start)
    print("TIFF: Se ha creado la imagen: ")
    print(name[i]+"_B2_.tiff")

    #### Cálculo de LTOA Simulada en banda B4
    ## Cálculo del valor aot interpolado para cada pixel de la imagen
    t1_start = process_time()
    LOB4_mean,TgasB4_mean,EtotB4_mean,TtotB4_mean,SB4_mean = reader_Lut(lut_path_B4[i])
    aotB4 = aot_image(mask,b4_2A,b4_2A_avg,b4_1C,LOB4_mean,TgasB4_mean,EtotB4_mean,
        TtotB4_mean,SB4_mean,RCC[i],MSZA[i],SI_B4[i])
    t1_stop = process_time()
    print("AOT B4: Elapsed time during the whole program in seconds:",t1_stop-t1_start)

    ## Creación de la imagen raster de aot B4
    t1_start = process_time()
    create_aot(name[i]+"_B4",b2_2A,aotB4,crs_2A,transform_2A)
    t1_stop = process_time()
    print("TIFF: Elapsed time during the whole program in seconds:",t1_stop-t1_start)
    print("TIFF: Se ha creado la imagen: ")
    print(name[i]+"_B4.tiff")

```