



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**Análisis de Fourier aplicado a los datos de aerosol atmosféricos
del satélite MODIS en la cuenca Mediterránea**

Autor: Jaime Sánchez Escudero

Tutor/es: Abel Calle, David Mateos

El apoyo incondicional de mis amigos más cercanos y familiares ha sido clave para llegar hasta aquí, ya que ellos saben que no ha sido nada fácil este camino.

Sin embargo, alguien a quien debo destacar por encima de todos, es mi padre, por su infinita paciencia conmigo, por confiar siempre en mi trabajo incluso cuando las cosas no salían bien y por transmitirme y demostrarme que las cosas, con esfuerzo y constancia, llegan.

También quiero mencionar a mis tutores David y Abel por su ayuda y contribución a este trabajo y, como no, por su paciencia durante el desarrollo del mismo.

Por ello, GRACIAS a todos.

Índice

Resumen	7
Abstract	8
1. Introducción	9
1.1. Análisis de Armónicos: Transformada de Fourier	13
1.2. Objetivos	14
2. Instrumentación y tratamiento de los datos	15
2.1. Datos satelitales	17
2.2. Datos terrestres	20
3. Resultados	23
3.1. Correlación de datos Tierra - MODIS (2010-2020)	23
3.2. Correlación de armónicos AERONET - MODIS	27
3.3. Separación por tipo de aerosol. Desfases.	31
3.3.1. Desértico	31
3.3.2. Quema de Biomasa	32
3.3.3. Mezcla	33
3.3.4. Desfases entre tipos de aerosol	34
4. Conclusiones	37
Bibliografía	39

Índice de figuras

1.1.	Energía solar extraterrestre y energía a nivel de suelo. Se aprecian las diferentes longitudes de onda en las que es mínima la radiación incidente debido a la interacción de ésta con los aerosoles atmosféricos. Extraída de [1].	10
1.2.	Separación por tipos de aerosol atmosférico según su procedencia	11
1.3.	Representación del paso del dominio temporal (TD, <i>time domain</i>) al dominio de frecuencias (FD, <i>frequency domain</i>)	13
2.1.	Localización de los distintos fotómetros CIMEL pertenecientes a la red AERONET (extraída de la web AERONET.	16
2.2.	Esquema de componentes de CIMEL adaptado de [2] a la izquierda. Esquema de sensores a bordo de Terra, entre ellos MODIS, extraído de [3] a la derecha.	16
2.3.	Localización de las 5 estaciones utilizadas.	17
2.4.	Visualización gráfica de los valores del AOD para una longitud de onda de 440nm de las 5 diferentes estaciones junto con la representación de los datos promediados de las diferentes estaciones a 550nm	21
3.1.	Correlación de datos del AOD a 550nm de MODIS frente a AERONET para los diferentes rangos MODIS. La línea discontinua negra representa un índice de correlación lineal igual a la unidad.	25
3.2.	Climatología del AOD 550nm elaborado a partir de datos de la red AERONET junto con la media mensual de sus principales armónicos.	28
3.3.	Ampliación para el año 2016 de los armónicos agrupados tanto de MODIS como de AERONET.	29
3.4.	a) Ocurrencias y armónicos agrupados de tipo desértico entre los años 2010 y 2020. b) Ampliación del año 2013 de los armónicos agrupados.	32
3.5.	a) Ocurrencias y armónicos agrupados de tipo incendios entre los años 2010 y 2020. b) Ampliación del año 2019 de los armónicos agrupados.	33
3.6.	a) Ocurrencias y armónicos agrupados de tipo mezcla entre los años 2010 y 2020. b) Ampliación del año 2016 de los armónicos agrupados.	33
3.7.	Armónicos principales de los 3 tipos de aerosol destacados para el período comprendido entre los años 2010 y 2020.	34
3.8.	Ampliación de la figura 3.7 de los años 2018 y 2019 de los grupos de armónicos para los tres tipos de aerosol destacados.	35

Resumen

En este trabajo se busca ver los principales armónicos de ciertos conjuntos de datos relativos al espesor óptico de aerosoles en la zona mediterránea entre los años 2000-2010 y 2020 provenientes tanto de medidas satelitales (MODIS) como de fotómetros terrestres situados en estaciones atmosféricas y compararlos entre sí. Además, se correlacionan estos datos y se ve como varían los mismos datos sacados de las diferentes fuentes.

También se estudian las ocurrencias de ciertos grupos de aerosoles medidos desde tierra con el fin de compararlos con la climatología de la zona.

Esto se llevará a cabo principalmente aplicando la Transformada de Fourier y manejando los datos con el entorno de programación R.

Palabras clave:

Armónico, MODIS, Correlación, Aerosol, Climatología, Transformada de Fourier.

Abstract

This project aims to search the major harmonics from certain data sets relative to aerosol optical depth in mediterranean area extracted from both satellite and land photometers located in atmospherical stations and to contrast them. In addition, previous data will be correlated to see the differences between them extracted from various sources. Occurrences of diverse aerosol groups extracted from land photometers will be studied as well in order to compare them with the corresponding area climatology map. All this before will be done applying the Fast Fourier Transform and handling the previous data with R programming language.

Key words:

Harmonic, MODIS, Data correlation, Aerosol, Climatology, Fourier Transform.

1

Introducción

Los aerosoles son partículas de carácter sólido o líquido que se encuentran en suspensión en un medio gaseoso, en este caso en la atmósfera. Éstos, se pueden dividir según su origen o procedencia en naturales, como el polvo desértico, los incendios naturales, el polen, la sal marina, etc. y de carácter antropogénico, procedentes de combustiones industriales, chimeneas, etc. [4], todos ellos con tamaños que pueden variar desde unos pocos nanómetros hasta varias micras.

Éstos aerosoles, en función de su tamaño y de la altura que alcancen, pueden ser transportados grandes distancias desde su lugar de origen gracias al movimiento en la atmósfera de las masas de aire y pasar prolongados períodos de tiempo suspendidos hasta su deposición.

El estudio de estos aerosoles atmosféricos es fundamental por su relación y reacción con la radiación solar que incide en la atmósfera, que puede ser absorbida o reflejada por estas partículas en suspensión (ver Figura 1.1), derivando en alteraciones climáticas con consecuencias directas en el medio ambiente y en la calidad del aire.

Cuando la radiación que incide en la atmósfera es reflejada o directamente absorbida por estas partículas, la potencia incidente sobre el suelo terrestre por unidad de superficie o irradiancia disminuye, produciéndose un enfriamiento del mismo y una alteración negativa en la velocidad de los vientos, derivando en un debilitamiento de la capacidad natural de dispersión de la contaminación y los gases de efecto invernadero (GEI), además de una debilitación en el ciclo del agua debido a la relación que existe entre la evaporación del agua y la temperatura superficial.

También modifican indirectamente las propiedades nubosas haciendo que la cantidad de precipitaciones se vea alterada negativamente, frenando la dispersión de los GEI y el consecuente aumento de la evaporación del agua y la temperatura. [5]

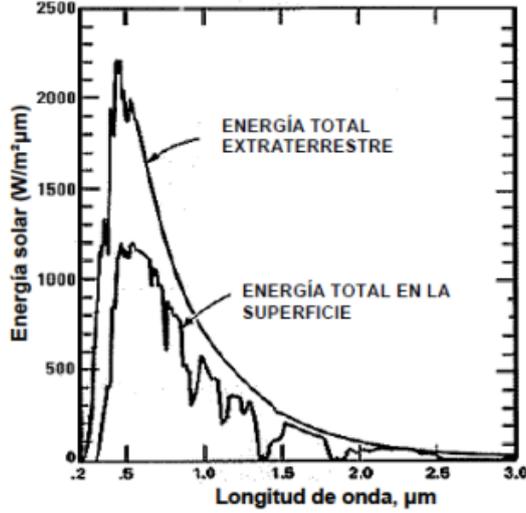


Figura 1.1: Energía solar extraterrestre y energía a nivel de suelo. Se aprecian las diferentes longitudes de onda en las que es mínima la radiación incidente debido a la interacción de ésta con los aerosoles atmosféricos. Extraída de [1].

A través de mediciones de la radiación solar en distintas longitudes de onda es posible medir la reflexión y dispersión de la misma por la superficie terrestre y la atmósfera, proporcionando dos magnitudes indispensables para el estudio de los aerosoles atmosféricos, como son el espesor óptico de aerosoles (AOD, *aerosol optical depth*) y el exponente de Angström (AE, *Angström exponent*).

El cálculo del AOD es posible mediante la ley de *Beer-Bouguer-Lambert* [2], descrita en la ecuación 1.1, donde R es la distancia entre la Tierra y el Sol en unidades astronómicas (UA), m la masa óptica [6], τ es el Espesor Óptico Total (TOD, *Total Optical Depth*), V_0 la irradiancia extraterrestre y V la irradiancia medida por el fotómetro en cuestión, todo para una longitud de onda λ concreta.

$$V(\lambda) = \frac{V_0(\lambda) \cdot e^{\tau(\lambda) \cdot m}}{R^2} \quad (1.1)$$

El TOD es posible separarlo en sus distintas componentes como se ve en 1.2:

$$\tau(\lambda) = \tau_\alpha(\lambda) + \tau_R(\lambda) + \tau_A(\lambda) \quad (1.2)$$

donde τ_α es la contribución de los aerosoles atmosféricos al TOD, τ_R la contribución de los gases a través del scattering de Rayleigh y τ_A la absorción de la radiación por los mismos.

Teniendo en cuenta que cada componente tendrá una masa óptica diferente, despejando la contribución de los aerosoles atmosféricos y realizando un ajuste de mínimos cuadrados [2], es posible obtener el AOD gracias a la ley de Angström:

$$\tau_\alpha(\lambda) = \beta \cdot \lambda^\alpha \quad (1.3)$$

donde λ es la longitud de onda empleada, $\tau_\alpha(\lambda)$ es el valor del AOD a la longitud de onda establecida, β hace referencia al parámetro de turbiedad de Angström y α es el Exponente de Angström (AE), que da cuenta de la variación espectral del AOD con valores comprendidos entre 0 y 4 [4]. Los valores bajos del AE se deben a un tamaño de partículas más grandes ($\alpha \sim 0$ se corresponde con grandes partículas de polvo), mientras que los más elevados son referidas a partículas pequeñas o moléculas ($\alpha \sim 2$ representa partículas de humo) [7].

El Exponente de Angström, al igual que la turbiedad en la columna atmosférica, es posible obtenerlo conocido el AOD a dos o más longitudes de onda distintas.

Con los valores del AOD 550nm y del AE es posible separar los datos en los diferentes tipos de aerosol considerados dentro del modelo OPAC (*Optical Properties of Aerosols and Clouds*), ya que cada tipo de aerosol presenta unos valores típicos de sus propiedades físicas y radiativas.

De los 10 tipos de aerosol que considera este modelo (continental limpio, continental promedio, continental contaminado, urbano, desértico, marítimo limpio, marítimo contaminado, marítimo tropical, ártico y antártico), se hará aquí una agrupación en 5 tipos principales: Continental, Marino, Desértico, Combustión de Biomasa y Mezcla.

La Tabla 1.1 y el diagrama de dispersión mostrado en la Figura 1.2 exponen los valores típicos del AOD a 550nm y del AE de éstos 5 tipos.

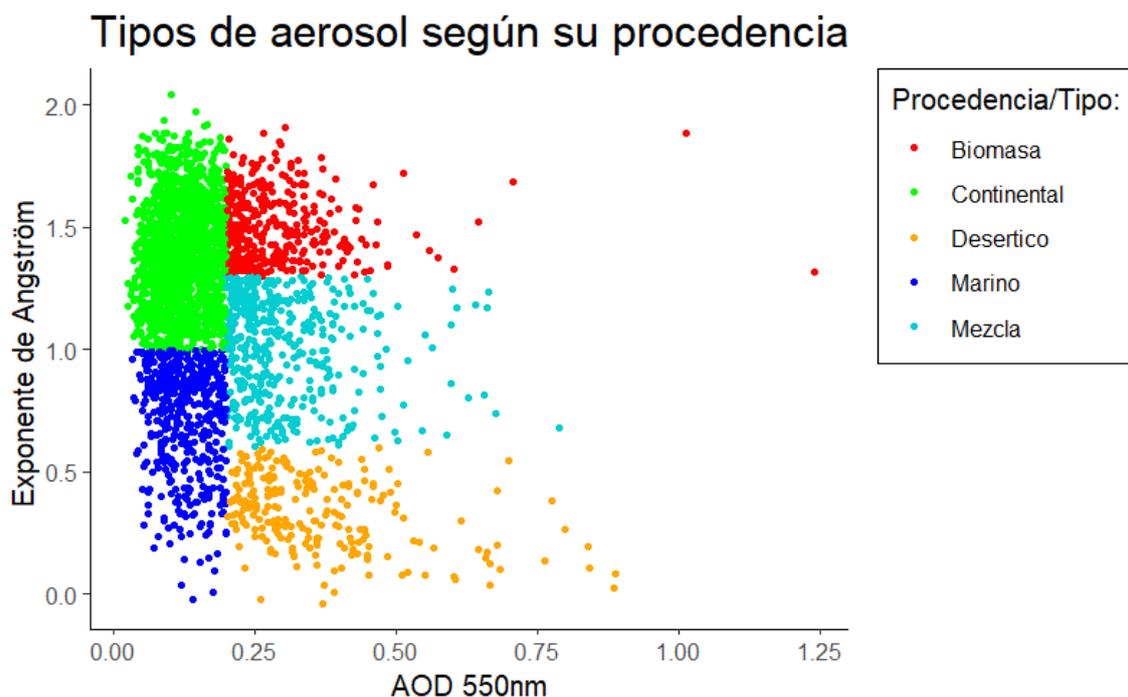


Figura 1.2: Separación por tipos de aerosol atmosférico según su procedencia

AOD 550nm	AE	Tipo
> 0.2	< 0.6	Desértico
> 0.2	> 1.3	Combustión de biomasa
> 0.2	0.6 - 1.3	Mezcla
< 0.2	< 1	Marino
< 0.2	> 1	Continental

Tabla 1.1: Separación por tipos según el valor del AOD y del AE.

Estos tipos hacen referencia a la procedencia u origen de los aerosoles, mostrando cada tipo unas propiedades particulares que pueden ser distinguidas:

- **Aerosol desértico**

El polvo desértico está compuesto por una numerosa cantidad de minerales diferentes y de gran tamaño (AE bajo), dando lugar a una amplia variación de sus propiedades y abarcando así un amplio rango para los valores del AOD.

- **Aerosol generado por combustión de biomasa**

Combustiones de este tipo van a dar lugar a partículas finas (AE alto) y a valores altos del AOD (alta turbiedad). No obstante, sus características principales dependerán, entre otras, del combustible utilizado.

- **Aerosol marino**

Éste tipo tendrá variaciones en sus valores tanto del AE como del AOD, ya que no todos los océanos y mares tiene la misma influencia terrestre. Por ejemplo, en el Océano Atlántico existe una mayor turbiedad debido a la presencia de aerosol desértico, combustiones, tráfico marítimo, etc.

Además, éste aerosol es uno de los más influyentes en el clima, ya que la cobertura oceánica terrestre es de unas dos terceras partes.

- **Aerosol continental**

Aquí existirán muchas variaciones dentro de los valores del AOD. Por una parte, el aerosol rural de fondo, compuesto principalmente por polvo y partículas minerales, presenta valores del AOD bajos y altos valores del AE. Por otra, la influencia en las zonas continentales por partículas procedentes de incendios forestales, polución debida a la industria, suele ser marcada, por lo que éste tipo también puede tener asociadas grandes cargas de aerosol.

- **Aerosol mezcla**

Éste presenta valores del AE intermedios entre el aerosol desértico y el aerosol por combustión de biomasa (es decir, partículas finas y gruesas presentes simultáneamente en la atmósfera) pero con cargas altas de aerosol (alto valor del AOD).

1.1. Análisis de Armónicos: Transformada de Fourier

Aplicar la Transformada de Fourier consiste en pasar del dominio temporal al dominio de frecuencias (ver figura 1.3), por lo que para un conjunto de datos que a priori pueda carecer de un patrón definido será posible descomponerlo en una serie de armónicos con importancias variables, permitiendo estudiar ciertos comportamientos periódicos que puedan permanecer ocultos en la serie de datos original.

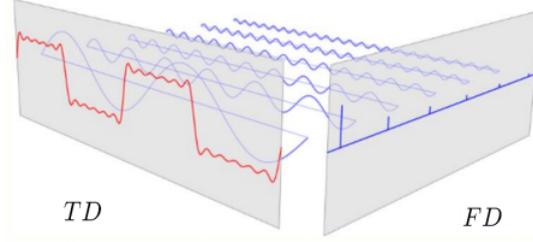


Figura 1.3: Representación del paso del dominio temporal (TD, *time domain*) al dominio de frecuencias (FD, *frequency domain*)

Supóngase A como variable discreta con un número N de valores equiespaciados en el tiempo. Así, A puede escribirse como:

$$A(k) = \sum_{n=0}^{N-1} F_A(n) \cdot e^{-\frac{i \cdot 2\pi nk}{N}} \quad (1.4)$$

Donde k es en este caso el contador diario establecido, i la unidad imaginaria ($i^2 = -1$) y $F_A(n)$ es la transformada de Fourier de frecuencia n , con N posibles frecuencias que se corresponden con los armónicos posibles en los que se va a separar la serie. Así, $F_A(n)$ es un número complejo cuya la parte real representa la amplitud de onda del coseno y la parte imaginaria la sinusoidal.

$$F_A(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - \frac{i}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (1.5)$$

que creará una representación en el dominio espectral de las series temporales.

Para hacer una selección correcta de qué armónicos tienen más relevancia, se recurre a la energía espectral de cada frecuencia, definida como:

$$E_A(n) = 2|F_A(n)|^2 = 2(|F_{real}(n)|^2 + |F_{imagin}(n)|^2) \quad (1.6)$$

donde F_{real} y F_{imagin} son las partes real e imaginaria de cada armónico en la ecuación $F_A(n)$. [8]

1.2. Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar a través de este trabajo son:

- Validar los datos obtenidos a través de MODIS con los datos obtenidos desde fotómetros terrestres para los años comprendidos entre los años 2010 y 2020 para ver las posibles discrepancias y sus similitudes. Ésto se llevará a cabo utilizando una correlación de datos entre ambos conjuntos de valores.
- Se hará una correlación de armónicos extraídos de los datos terrestres y diferentes rangos de distancia de los datos satelitales con el fin de estudiar y explicar los desfases entre las periodicidades de ambas gráficas.
- Estudiar las periodicidades de los diferentes tipos de aerosol extraídos a partir de los datos terrestres y ver los posibles desfases entre ellos

2

Instrumentación y tratamiento de los datos

Debido a la importancia que estas partículas tienen en la estabilidad climática, es necesario hacer un seguimiento de los aerosoles presentes en la atmósfera y de sus implicaciones, así como entender su comportamiento y las consecuencias derivadas de ello.

Estas medidas sobre las propiedades de los aerosoles pueden ser obtenidas vía satelital. No obstante, debido a la reflectividad en las áreas tales como nubes, superficie terrestre, etc., se pueden dar errores considerables en ellas por lo que hoy en día la técnica más precisa a la hora de realizar estas medidas es utilizar fotómetros terrestres. Así, se establecieron numerosas de estas estaciones formando una de las redes de medida de aerosoles más importante actualmente, AERONET (*Aerosol Robotic Network*, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>). AERONET es una federación de redes establecidas por la NASA (<https://www.nasa.gov>) y PHOTONS (<https://www-loa.univ-lille1.fr/photons>) que ha proporcionado durante más de 25 años datos continuos y de dominio publico sobre diversas propiedades de los aerosoles atmosféricos en una red que se extiende globalmente (ver Figura2.1), y nace con el fin de validar los datos satelitales sobre los aerosoles, además de estudiar y entender las principales propiedades de ellos en la atmósfera y el impacto que tienen en la radiación y el clima. [9]



Figura 2.1: Localización de los distintos fotómetros CIMEL pertenecientes a la red AERONET (extraída de la web AERONET).

El fotómetro CIMEL CE318 (ver figura 2.2), desarrollado para la NASA en 1992 por la empresa francesa *Cimel Electronique* (<https://www.cimel.fr>), será el instrumento principal de la red. Se trata de un espectroradiómetro de campo automático y portátil capaz de medir la intensidad solar directa (irradiancia solar) y la radiancia del cielo a través de dos detectores de silicio (sensores) en distintas longitudes de onda, es decir, través de varios canales espectrales. Esto sirve para obtener ciertas propiedades de los aerosoles presentes como el AOD, distintos parámetros radiativos y microfísicos, etc [10].

Por otro lado, MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), es un instrumento puesto en órbita alrededor de la tierra por la NASA en los satélites Terra y Aqua con la misión de medir concentraciones de aerosoles, temperaturas en superficie, cartografías, incendios, concentraciones de hielo y nieve, etc. MODIS analiza toda la superficie terrestre aproximadamente cada dos días captando datos en diferentes bandas espectrales de distintas longitudes de onda de las franjas visible e infrarrojo. [11]

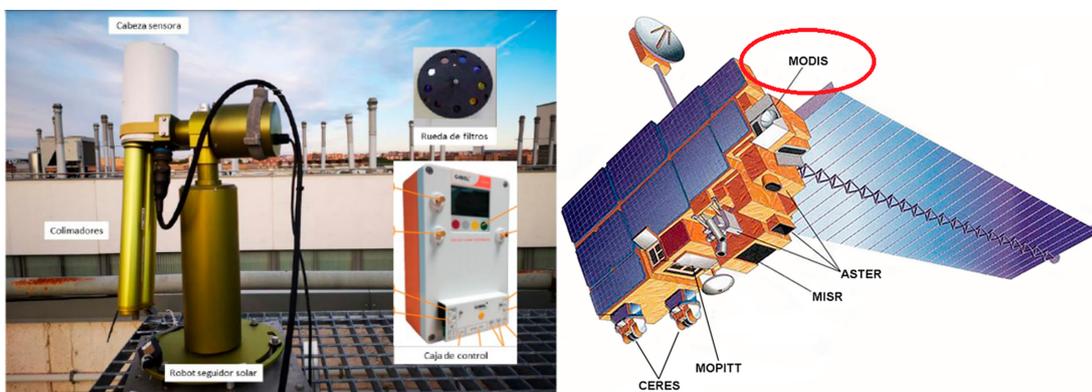


Figura 2.2: Esquema de componentes de CIMEL adaptado de [2] a la izquierda. Esquema de sensores a bordo de Terra, entre ellos MODIS, extraído de [3] a la derecha.

A partir de datos medidos tanto por CIMEL como por MODIS se hará un estudio sobre cómo es el comportamiento de éstos aerosoles en la cuenca mediterránea, más concretamente la isla de Chipre y parte de la costa turca.

Así, las estaciones de medida terrestres involucradas en este trabajo son: Agia Marina, CUT-TEPAK, IMS-METU-ERDEMLI, Nicosia y Pafos, pertenecientes a la red AERONET y situadas todas ellas sobre la isla de chipre a excepción de IMS que se encuentra en la costa turca (ver figura 2.3).

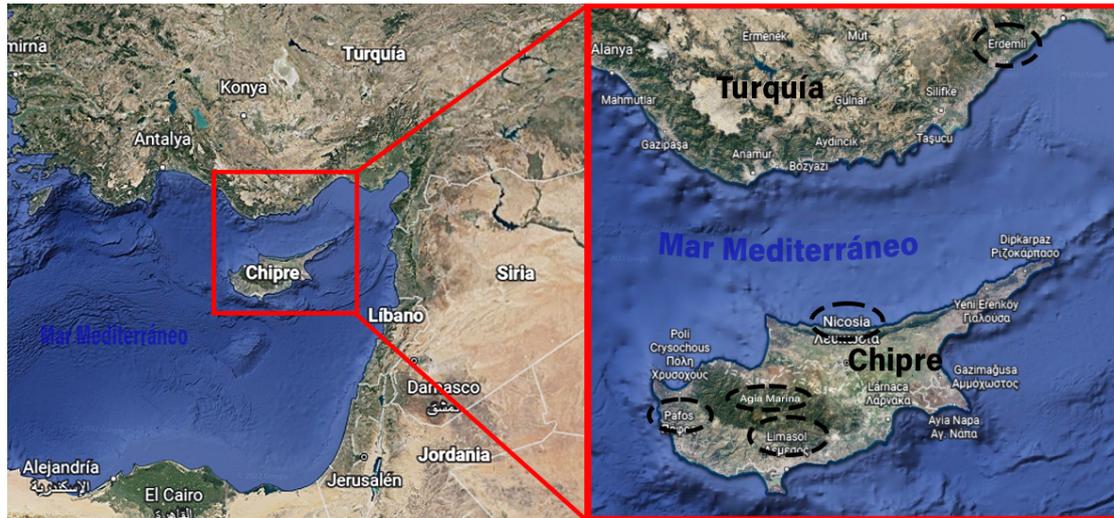


Figura 2.3: Localización de las 5 estaciones utilizadas.

La elección de estas 5 estaciones reside en diversos aspectos. La primera y fundamental es una campaña realizada sobre la ciudad chipriota Pafos en abril de 2017 por el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa, <http://goa.uva.es>) junto a otros grupos de investigación germanos en un proyecto financiado por la Unión Europea; Además, estas cinco estaciones abarcan un área bastante completa acorde a la zona que se pretende estudiar y proporcionan conjuntos de datos con suficiente continuidad temporal de cara a su análisis.

2.1. Datos satelitales

Los datos satelitales serán obtenidos a partir de medidas realizadas por el satélite TERRA (ver figura 2.2). Éste, con más de 20 años recolectando datos, es una herramienta fundamental a la hora de entender el comportamiento del clima terrestre y su cambio, representando el impacto de la actividad humana y los desastres naturales sobre los ecosistemas, como se verá en este trabajo.

Para el estudio que se llevará a cabo, vamos a necesitar los datos de Terra desde enero del año 2000 hasta diciembre del año 2020, ambos incluidos. La descarga de estos datos se realizará a través de una página web derivada de la NASA llamada "LAADS DAAC". LAADS DAAC (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System y Distributed Active Archive Center) es una de las doce DAACs dentro del sistema de la NASA de observación terrestre y su recopilación de datos e información (EOSDIS, por sus siglas en inglés) dentro del proyecto ESDIS (Earth Science Data and Information System, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Se muestra a continuación un proceso detallado de la obtención de estos datos para el más interesado:

En la página principal de este sitio web (que se accede a través del enlace anterior), se debe ir al apartado "Find data", donde se abrirá un menú con diferentes apartados: Products, Time, Location, Files y Review & Order, donde será necesario ir en orden por cada uno de ellos hasta llegar a obtener los datos deseados.

Primeramente, en el apartado "Products", se debe seleccionar el satélite MODIS: Terra, con el tipo de datos "MOD04.L2". Hecho esto, pasamos al apartado "Time", donde se escogerán las fechas para las cuales se quieren los datos, además de seleccionar si queremos datos diarios únicamente o diarios y nocturnos (las fechas serán, como se mencionó antes, desde enero del año 2000 hasta diciembre de 2020, con cobertura de los datos diarios únicamente). No obstante, deberemos seleccionar las fechas por tandas de años para que la página permita la descarga de los datos (serán archivos con alrededor de 150gb de tamaño). Continuando con el apartado "Location", fijaremos un rango en el mapa que contenga las localizaciones de interés a estudiar, siendo en este caso concreto la zona mediterránea que envuelve a Chipre.

Por último, los apartados 4 y 5 hacen referencia a la revisión de los datos para después ser pedidos (ya que no es de descarga inmediata).

Estos datos, una vez obtenido el enlace de descarga (que suele tardar algún día en procesarse), es necesario ejecutarlo en la consola del ordenador, con la dirección de la carpeta en la que se desean descargar los archivos. Para la descarga de estos datos se ha utilizado la aplicación Wget, de código abierto y que permite hacer descargas más eficientes con distintos protocolos como HTTPS, FTP y HTTP (Wget deberá estar en todas las carpetas donde se vayan a almacenar los archivos para su posible descarga).

Los archivos que se han descargado por el procedimiento anterior, serán archivos en formato HDF (Hierarchical Data Format). Este formato, usado dentro del ámbito científico, es adoptado como sistema de almacenamiento de datos con una estructura jerarquizada y que incluye metadatos de diferentes variables, por lo que permite obtener información de los datos de un archivo sin necesidad de recurrir a fuentes externas, relacionar los datos entre ellos, etc. [12]. Para poder trabajar con este formato de archivo y su posterior conversión a un formato estándar más manejable por programas convencionales como puede ser Microsoft Excel, por ejemplo, es necesario procesarlos correctamente. Ésto será posible

gracias a unos códigos desarrollados en el entorno MatLab proporcionados por el GOA-UVa, los cuales, leyendo todos los datos de los archivos descargados y filtrando los datos con una desviación de cercanía de 3° de longitud y 3° de latitud desde un punto definido (en este caso la estación en Limasol, Chipre) tendrán por salida un archivo de texto (.txt) con los datos ordenados por fecha y tipo dentro del rango de distancia seleccionado. A esto se le sumará también una conversión manual desde el archivo .txt a formato .xlsx (hoja de cálculo de Microsoft Excel).

Destacar que, a pesar de haber dividido los datos de esos 20 años por grupos de un año y establecer un rango de distancias relativamente comedido, tendremos muchos datos por día y muchos tipos de datos (día y hora a la que fué tomada la medida por MODIS, datos de coordenadas, valores para diferentes exponentes de Angström y tamaños de aerosol, etc.), traduciéndose en tiempos de procesamiento muy elevados (varias horas) hasta la obtención del archivo filtrado.

Deberá generarse posteriormente una serie de un dato diario, que se conseguirá usando un código desarrollado, de nuevo, en MatLab y se encargará de promediar los múltiples valores diarios del AOD a una longitud de onda de 550nm dentro de unos determinados rangos de kilómetros (50, 100, 250 y 500 kilómetros) tomando como punto central la estación terrestre situada en Limasol.

Esta elección en rangos de kilómetros se realiza debido a que MODIS no trabaja con coordenadas sino con píxeles. Es decir, una imagen tomada por MODIS será una sucesión de filas compuestas de pequeños cuadrados de área variable llamados píxeles, los cuales en función de su tamaño representan cada uno desde 250 metros hasta alrededor de 1 kilómetro [13] (equivalente a una cámara fotográfica digital con diferentes resoluciones), conteniendo cada pixel información sobre el área abarcada por éste.

Los datos obtenidos de MODIS, a pesar de haber promediado diariamente y ordenado cronológicamente los datos, muestran variaciones incluso para días consecutivos, por lo que a priori parece complicado sacar conclusiones. Para ello, se aplicará la transformada de Fourier a los datos, que separará en armónicos las series de datos, dejando ver posibles comportamientos periódicos.

Hacer esto va a proporcionar información sobre dos cosas fundamentales, como son el comportamiento en el tiempo de datos con grandes fluctuaciones diarias y también nos dará los armónicos con mayor importancia dentro de la serie de datos para ver sus periodicidades, permitiendo estudiarlas por separado. [8]. Ésto se hará de igual forma para los datos terrestres, tanto para los valores del AOD como para las ocurrencias de cada tipo.

2.2. Datos terrestres

La extracción de los datos terrestres provenientes de las diferentes estaciones tendrá lugar usando dos programas: Aeronet Download Tool, con el que descargaremos los datos de las diferentes estaciones de AERONET para los rangos de tiempo deseados y 'Rstudio', donde se realizará la más notable labor de organización y tratamiento de datos.

Aeronet Download Tool (ADT) es una aplicación que me fué proporcionada por el GOA-UVA y a través de la cual es posible descargar los conjuntos de datos provenientes de las diferentes estaciones, así como establecer el rango de tiempo para los cuales se quieren valores (en este caso desde 2010 hasta 2020), un formato determinado (promedios diarios) y el tipo de dato en el que se esta interesado (en este caso serán datos AOD20, de nivel 2.0 que garantizan una alta calidad de los datos). También se usará conjuntamente el programa RStudio (<https://www.rstudio.com>), entorno de programación en lenguaje R donde se hará la parte de organización y tratamiento de datos (éstos procesos de manejo de los datos se explica mas detalladamente en la memoria de prácticas anexa [14], donde se exponen mejor los pasos y los programas utilizados).

A partir de las diferentes estaciones utilizadas y con scripts desarrollados usando el lenguaje de programación R, se crea una base con los datos de estas estaciones de donde después podremos extraer la información necesaria.

Para procesar los datos procedentes de las diferentes estaciones, se desarrolló un script en RStudio [14], que utiliza de forma fundamental la Ley de Angstrom para calcular el valor del AOD a longitud de onda 550nm (que será el relevante dentro de este trabajo) a partir de uno a 440nm.

Mencionar que los valores del AOD a 440nm serán promediados para todas las estaciones en conjunto (se obtiene un valor único a partir de las 5) antes de aplicarles la Ley de Angström.

Particularizando la ecuación 1.3 para los valores del AOD a 440nm y 550nm, se obtienen:

$$\tau_{440nm} = \beta \lambda_{440nm}^{-\alpha} \quad \tau_{550nm} = \beta \lambda_{550nm}^{-\alpha} \quad (2.1)$$

en las cuales el exponente α es el mismo para ambas expresiones y los valores de λ son también conocidos, ya que para el AOD 550nm es 0,55 y para el AOD 440nm es 0,44 (λ hace referencia a la longitud de onda medida en micras, de ahí el número decimal).

Sabiendo esto, es posible dividir ambas ecuaciones y despejar así τ_{550nm} (regla de tres convencional), que es el valor deseado:

$$\tau_{550nm} = \tau_{440nm} \left(\frac{0,55}{0,44} \right)^{-\alpha} \quad (2.2)$$

obteniéndose así los valores del AOD a 550nm para cada estación, que se utilizarán en la correlación con los obtenidos a partir de MODIS.

Al final del código usado se crea un archivo .xlsx donde se plasmarán estos valores, además de otros como son el Exponente de Armstrong promedio para cada día y el valor medio del AOD a 440nm.

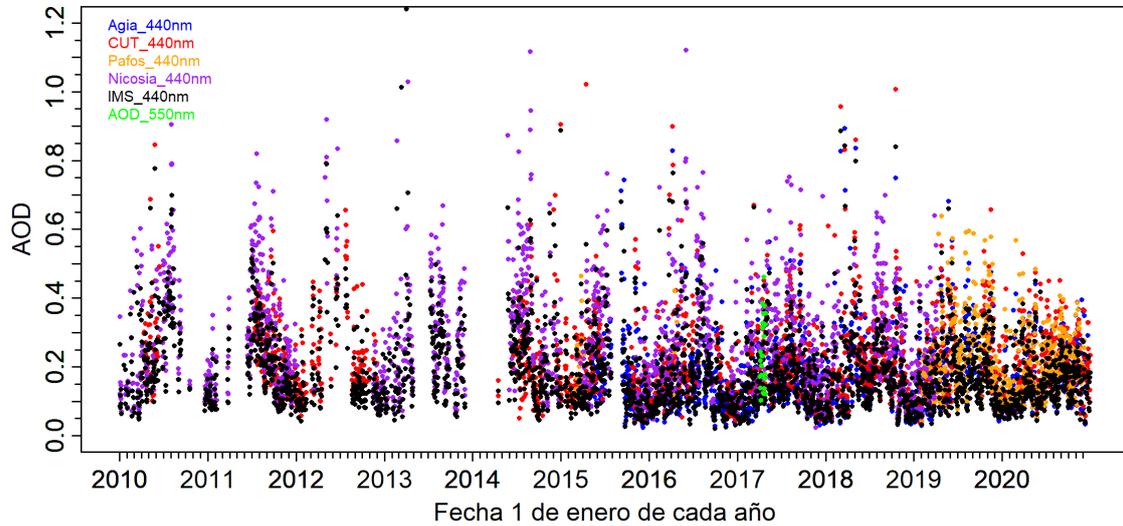


Figura 2.4: Visualización gráfica de los valores del AOD para una longitud de onda de 440nm de las 5 diferentes estaciones junto con la representación de los datos promediados de las diferentes estaciones a 550nm

Estos pasos previos tendrán como objetivo poder aplicar la Transformada de Fourier a los conjuntos de datos de AERONET y MODIS.

En el caso de los valores terrestres va a ser de dos formas diferentes, ya que por una parte se aplicará Fourier a los valores del AOD con longitud de onda 550nm (de cara a estudiar su correlación de los armónicos y los datos del AOD a 550nm obtenidos por MODIS) y por otra a las ocurrencias de los distintos tipos para estudiar ciertas periodicidades y/o estacionalidades en ciertos fenómenos como pueden ser incendios o corrientes de aire provenientes de zonas desérticas.

Cabe mencionar además que los datos terrestres, a diferencia de los satelitales, están comprendidos solamente entre 2010 y 2020, lo que tendrá su apartado dentro de las conclusiones al compararlo con los datos satelitales.

Creada la base de datos con los valores de las dos fuentes correctamente organizados, va a ser posible pasar a la parte principal de este trabajo: aplicarles la Transformada de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), necesaria para extraer información sobre el comportamiento periódico de los aerosoles y su consecuente relación con el clima. Se usará para ello un programa desarrollado en el entorno MatLab y que hace precisamente esos cálculos anteriores, proporcionado también por el GOA-UVa.

Este script tendrá por entrada dos archivos .xlsx, uno que conteniendo la serie de datos

para cada conjunto de años completos (dependiendo de si son los datos terrestres o satelitales, los rangos de años varían, se verá más adelante) y otro donde se especifican ciertos parámetros, como el número de armónicos a mostrar ordenados por energía y si se quieren agrupar o no ciertos armónicos (que será relevante a la hora de estudiar las periodicidades y estacionalidades de ciertos fenómenos).

Ejecutado el código, el programa saca un archivo .txt (archivo de texto) con los armónicos ordenados de mayor a menor energía espectral y los valores de la Transformada de Fourier inversa, necesarios para la graficación de los principales armónicos. También, se ha mencionado la necesidad de que la serie sea sin saltos, es decir, que haya valores para todos los días, por lo que el programa hará para los datos que falten una interpolación, completando así los días que carezcan de valores.

3

Resultados

3.1. Correlación de datos Tierra - MODIS (2010-2020)

En esta sección se va a hacer una medida de la tendencia de la evolución de los datos de AERONET y los datos de MODIS, además de ver el índice de correlación entre ambas series de datos.

Una correlación es un tipo de asociación entre dos variables numéricas que evalúa la tendencia (creciente o decreciente) entre los distintos datos. Cuando se dice que dos variables están asociadas significa que a partir de los datos de una podemos obtener información sobre la evolución de los datos de la otra.

Para los datos de AERONET y MODIS la correlación no debería ser en principio evidente pese a medir la misma magnitud, ya que la forma de obtención de los datos en ambos instrumentos es esencialmente distinta.

Por un lado, CIMEL mide la radiación que le llega de forma directa, mientras que MODIS la mide por reflexión en las superficies, por lo que sin una corrección atmosférica adecuada cualquier elemento atmosférico o terrestre capaz de reflejar la luz solar incidente podría derivar en perturbaciones en su medida.

Será posible solamente asociar los valores para los días en los que éstos existan simultáneamente en ambos conjuntos de datos, por lo que los resultados obtenidos serán relativos al período temporal comprendido desde el año 2010 hasta 2020.

Hacer coincidentes las fechas para los datos de ambas fuentes y eliminar los días donde no exista un valor para cada una, se hace de forma simple en un programa como Microsoft Excel con el siguiente condicional:

`SI.ERROR(BUSCARV(J2;A$2:G$4019;6;FALSO);)`

La función SI.ERROR implica dos argumentos, el primero es el valor o expresión que va a evaluar, que en este caso es la función BUSCARV, y el segundo argumento es el valor que regresará en caso de que el primer argumento devuelva un error.

Así, BUSCARV comprobará que en el *data frame* establecido estén todas las filas completas, en cuyo caso escribirá el valor de la fecha, dato terrestre y dato MODIS en las casillas

que hayamos escogido; de lo contrario, el condicional no hará nada.

Obtener el índice de correlación (r) se consigue a través de la siguiente ecuación:

$$r(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

implementada dentro de Microsoft Excel y donde \bar{x} e \bar{y} son los valores promedios de cada variable.

Este coeficiente varía entre los valores 1 (donde los datos de ambas variables evolucionan en el mismo sentido) y -1 (evolución simétrica). Cuando los valores de esta correlación son menores o mayores de -0.6 y +0.6 respectivamente, entonces se puede hablar de existencia de correlación lineal (mejor cuanto más se acerque a +1 ó -1). Si por el contrario este valor es 0 o cercano a él, entonces la correlación no es concluyente o no existe ésta entre las variables presentadas.

Correlación datos AERONET - MODIS	
Rango MODIS	Valor del Coeficiente (r)
50km	0.70387
100km	0.7084
250km	0.73211
500k	0.70017

Tabla 3.1: Distintos índices de correlación para los datos CIMEL y MODIS en función del área abarcada por éste último

La Tabla 3.1, muestra los diferentes valores del coeficiente en cada caso. Independientemente del rango de kilómetros, los valores expuestos muestran una buena correlación y da cuenta de que realmente ambas fuentes aportan datos fiables en las mediciones de aerosoles atmosféricos.

Si bien no es una correlación perfecta, si que se alcanza el objetivo de apreciar una proporcionalidad entre los distintos conjuntos de datos.

La correlación de los datos procedentes de ambos instrumentos también es posible mostrarla gráficamente representando los valores de los diferentes rangos para MODIS frente a los datos de AERONET, como se muestra en la Figura 3.1. En ella se muestran 4 gráficos de dispersión o *scatterplot*, uno para cada rango MODIS, que exponen en un código de colores la densidad de puntos en cada zona del gráfico.

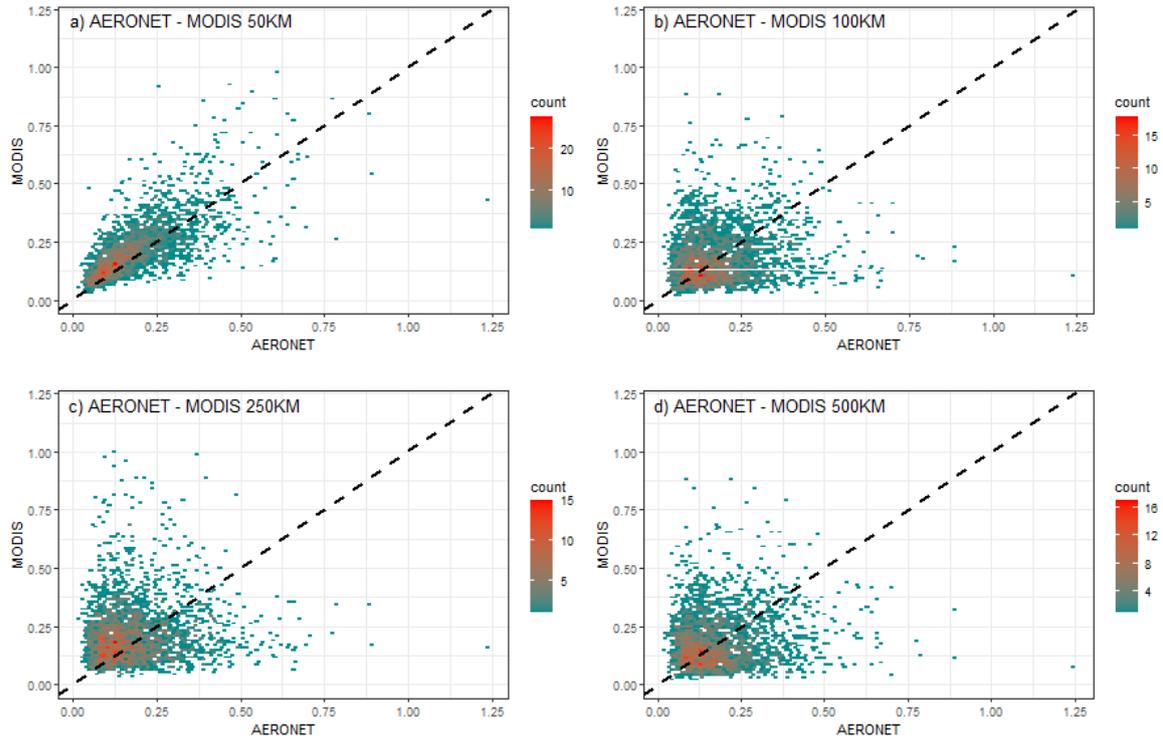


Figura 3.1: Correlación de datos del AOD a 550nm de MODIS frente a AERONET para los diferentes rangos MODIS. La línea discontinua negra representa un índice de correlación lineal igual a la unidad.

Un caso ideal sería que los puntos se concentraran lo más cercano posible a la línea discontinua negra (marcando ésta una correlación perfecta de índice $+1$) y con ello que las zonas rojas abundan en esa zona.

En el caso real presentado, a medida que ascendemos en los valores del AOD se produce una notable dispersión de los puntos respecto a la línea discontinua, pero el área roja sobre $r=1$ y con ello una mayor acumulación de puntos muy próximos a esa zona muestran, de forma general, una buena correlación de ambos conjuntos de datos (coincidiendo con lo mostrado en la Tabla 3.1).

Así, las diferencias entre los distintos índices obtenidos es mínima y la única conclusión firme es hablar de una buena correlación entre los datos MODIS y AERONET, lo cual es importante de cara a la validación de los datos satelitales y su utilización como fuente fiable de estudio de los aerosoles atmosféricos.

No obstante, la leve mejor correlación presente para el rango MODIS de 250km respecto al resto puede explicarse de la siguiente forma; y es que al agrupar las estaciones terrestres, aparte de incluir el área abarcada por CUT-Tepak, Agia Marina, Pafos y Nicosia que es principalmente la isla de Chipre en su totalidad, también estamos añadiendo la estación atmosférica situada en Erdemli (sur de Turquía).

Los datos del AOD a 550nm de éstas 5 estaciones han sido inicialmente promediados y tomados como un dato único, por lo que estamos suavizando así fenómenos que pueden

ser puntuales tanto de Chipre como de la costa turca.

Si analizamos las distancias¹ aproximadas de las distintas estaciones situadas en Chipre con la ubicada en la ciudad de Erdemli:

Pafos (situada en la costa oeste de Chipre) se encuentra a 265km de Erdemli; Limasol (costa sur) se encuentra de Erdemli a 250km; Nicosia (centro-norte) a 180km; Agia Marina (centro de Chipre) a 206km.

Ésto deja ver que en promedio la extensión abarcada por las 5 estaciones está más próxima a los 250km que al resto de rangos, por lo que cobra sentido que la mejor correlación aparezca para el radio MODIS de 250km.

Ésta diferencia no se aprecia igual en la Figura 3.1, donde podría parecer a priori que la mejor correlación de los datos se da para el rango MODIS de 50km, por estar en éste caso más próximos los puntos a la línea de pendiente unidad.

¹Distancias medidas usando *Google Earth*, <https://www.google.com/intl/es/earth/>

3.2. Correlación de armónicos AERONET - MODIS

La aplicación de la transformada de Fourier mostrará periodicidades presentes en los distintos conjuntos de datos. El estudio de los armónicos será de todo el rango de tiempos completo, es decir, desde el año 2000 hasta el año 2020 para MODIS y desde el año 2010 a 2020 para los datos de AERONET.

Es necesario obtener los armónicos con una mayor energía espectral para cada conjunto de datos y así poder seleccionar después los más interesantes o relevantes de cara a su estudio para los distintos rangos de MODIS con AERONET, pudiendo observar y extraer así información acerca de los posibles desfases que existan en sus valores, las diferencias y/o similitudes entre sus curvas y picos, etc.

Esto tiene importancia, al igual que en el caso de la correlación de los datos, de cara a validar los datos de los diferentes instrumentos y además ver las tendencias de ambos conjuntos de armónicos.

Destacar además que cuantos más datos haya de cualquiera de los dos instrumentos y en un mayor período de tiempo, más estable va a ser su periodicidad y van a mostrarse de forma mucho más clara y real posibles variaciones temporales.

El código mencionado en la Sección 2.2 obtiene los armónicos más importantes (aquellos con mayor energía espectral) tanto de MODIS como de AERONET, aunque la selección de aquellos que representen realmente el comportamiento de los aerosoles atmosféricos debe hacerse teniendo en cuenta la climatología del AOD a 550nm.

Así, se ha elaborado la Tabla 3.2, que contiene éstos principales armónicos.

		ARMÓNICOS PRINCIPALES								
		Armónico (n)	Energía	Período (días)	Armónico (n)	Energía	Período (días)	Armónico (n)	Energía	Período (días)
AERONET	(2010-2020)	n = 11	18553	365	n = 33	815	121	n = 44	987	91
MODIS	50km	n = 21	40067	365	n = 63	1289	121	n = 84	2585	91
	100km	n = 21	36616	365	n = 63	2078	121	n = 84	1971	91
	250km	n = 21	42647	365	n = 63	1745	121	n = 84	2189	91
	500km	n = 21	39706	365	n = 63	1255	121	n = 84	1670	91

Tabla 3.2: Elección de armónicos MODIS y AERONET para su caracterización.

Al estar esta climatología extraída de los datos de AERONET, primeramente deben caracterizarse los armónicos terrestres escogidos con ella, validando así dichos armónicos y una vez comprobado que el grupo de armónicos terrestres representa realmente el comportamiento general de su conjunto de datos, podremos compararlos con los armónicos escogidos para MODIS y ser así también validada esa elección.

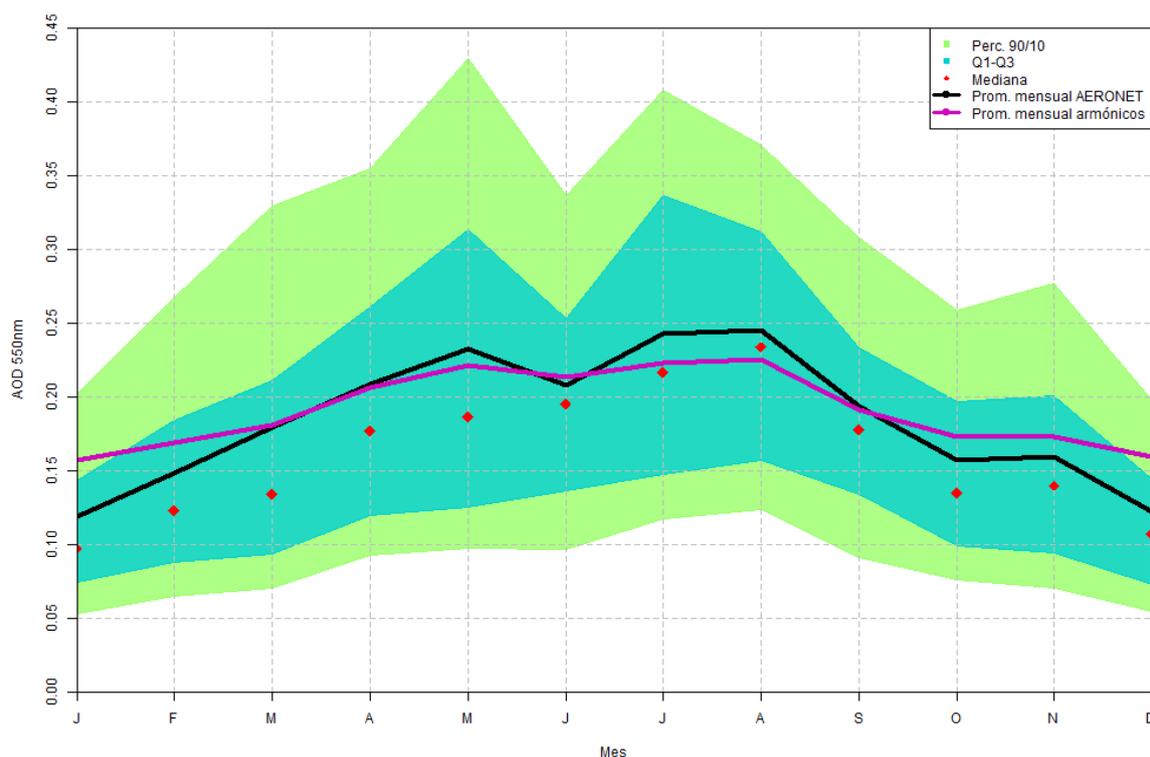


Figura 3.2: Climatología del AOD 550nm elaborado a partir de datos de la red AERONET junto con la media mensual de sus principales armónicos.

La climatología del AOD a 550nm de la zona de estudio en la Figura 3.2 muestra el comportamiento promedio del AOD a lo largo de un año.

Para que sea posible utilizar los armónicos principales obtenidos anteriormente deben coincidir, de forma general, con los valores medios del AOD a 550nm y sus tendencias.

Éstas medias mensuales tanto de los datos de AERONET completos como de sus armónicos principales representados en la Figura 3.2 en negro y rosa, respectivamente, muestran exactamente estas tendencias, dónde los máximos que se dan en los meses de mayo, julio/agosto y noviembre y los mínimos de junio y octubre, además de los meses de crecimiento y decrecimiento coinciden, por lo que el grupo de armónicos principales sí muestra el comportamiento real del AOD y será por ello posible usarlos en representación de los datos terrestres.

Una vez caracterizado el AOD en tierra, será posible hacer lo mismo con los datos proporcionados por MODIS. Para ello se deben representar sus principales armónicos y estudiar las diferencias de valores y desfases, así como las similitudes que verificarían la correlación entre ambos conjuntos de datos.

Los datos satelitales, a diferencia de los terrestres, tendrán ciertas variaciones en función del rango que abarque MODIS en cada caso, por lo que es de esperar que también haya ciertas variaciones en las representaciones gráficas de los armónicos principales, incluso siendo éstos los mismos en los distintos áreas.

Mencionar también la sobreestimación que hace MODIS de los datos del AOD respecto de CIMEL (GAP existente entre la curva roja y el resto), que se verá reflejado en la Figura 3.3 pero que no tendrá implicación en las tendencias de ambas curvas.

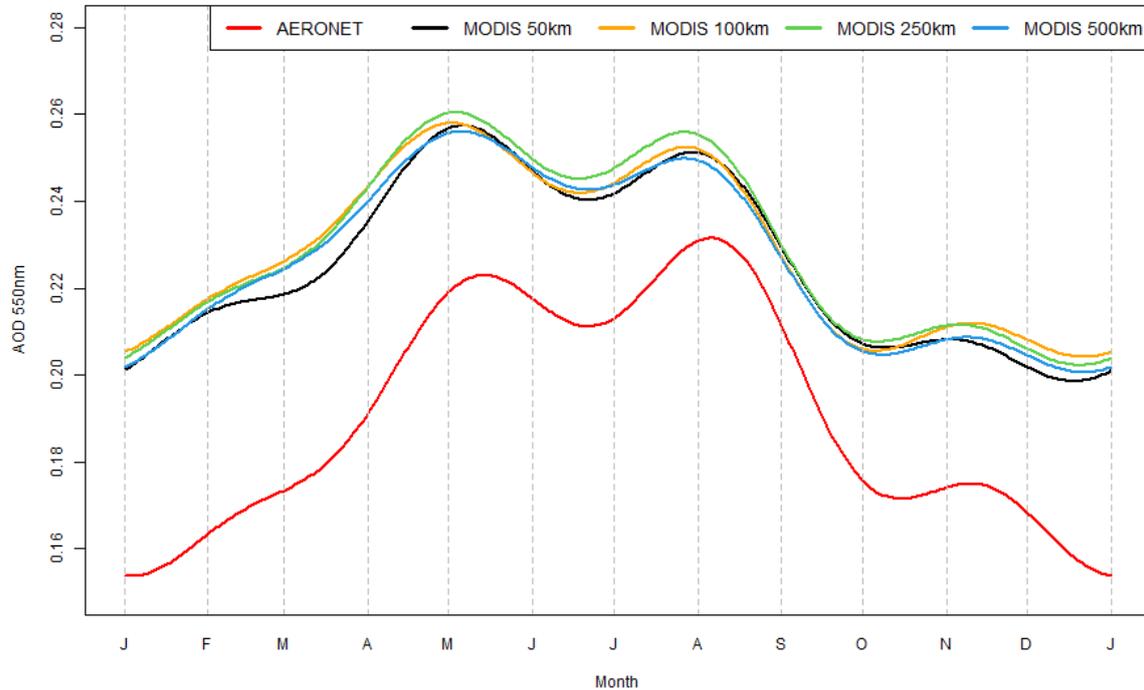


Figura 3.3: Ampliación para el año 2016 de los armónicos agrupados tanto de MODIS como de AERONET.

La curva roja en la Figura 3.3 muestra el grupo de armónicos terrestres a partir del cual caracterizaremos los satelitales, los cuales se muestran en diferentes colores en función del rango que representen.

Entre los diferentes rangos MODIS no hay diferencias muy destacables, siendo la única visible la disminución del crecimiento del AOD en el mes de marzo para 50km que, sin ser relevante en la caracterización, podría representar algún fenómeno periódico más localizado sobre chipre.

En cuanto a la caracterización de los armónicos MODIS, todas las curvas siguen el mismo patrón en las variaciones, es decir, la variación de las curvas satelitales respecto a la curva terrestre es pareja en todos los períodos del año patrón.

Respecto a los valores máximos que tienen lugar en los meses de mayo y agosto, MODIS presenta su máximo absoluto en el mes de mayo mientras que para AERONET éste tiene lugar en agosto. No obstante, al presentarse armónicos y no los valores reales captados por cada uno de los instrumentos, sólo es correcto hablar de la evolución de ambas curvas y como varían una en función de la otra, por lo que lo importante es dónde se sitúan los máximos y los mínimos, así como los períodos de crecimiento a lo largo del tiempo.

Atendiéndose entonces a ese criterio, las 5 curvas expuestas en la Figura 3.3 presentan la misma evolución temporal, es decir, varían de la misma forma a lo largo del tiempo, por lo que es posible así dar validez a los armónicos de MODIS a partir de los terrestres.

3.3. Separación por tipo de aerosol. Desfases.

A partir de los datos terrestres del AOD, es posible obtener la ocurrencia de cada tipo de aerosol descritos en el Capítulo 1. Es decir, en vez de centrarse en su valor diario se pasó a estudiar si había presencia de ese tipo de aerosol o no cada día (que tendrá relevancia a la hora de ver las periodicidades de posibles fenómenos estacionales).

Los tipos de aerosol más relevantes para este trabajo y de los que se estudiarán por tanto las ocurrencias serán el desértico, combustión de biomasa y mezcla.

Para obtener dichas ocurrencias se hizo la conversión del valor del dato a si existe o no tal valor de forma simple con Microsoft Excel haciendo uso de un condicional "Si", devolviendo un 1 si el valor del AOD de ese tipo es mayor que cero (es decir, si existe valor para ese día y tipo) o 0 si no existe tal valor.

Además, con la ocurrencia de cada tipo según la procedencia del aerosol se calcularán, al igual que en la correlación de armónicos AERONET-MODIS, los armónicos con mayor energía espectral (usando MatLab), agrupándose de forma que la información a extraer de ellos sea lo más adecuada posible de cara a la comparación de los distintos tipos entre sí y ver la época en la que se dan ciertos fenómenos atmosféricos asociados con cada uno de los tipos de aerosol más importantes.

A pesar de que la ocurrencia no muestra un valor del AOD concreto, éste no es relevante, ya que si hay dato para un día concreto, sea su valor mayor o menor, ya es un indicador de que se está dando presencia de ese tipo de aerosol.

Se estudiará la ocurrencia de cada tipo y su periodicidad por separado para después hacer un estudio conjunto y ver las épocas en las que cada tipo tiene su máxima presencia en comparación con los demás.

3.3.1. Desértico

La isla de Chipre, situada en el mediterráneo oriental y rodeada por Egipto al sur (a 415km de distancia de la ciudad de Nicosia, capital de Chipre) y por Siria al este (130km de la misma), es una región con una fuerte influencia desértica. Además, su localización geográfica le otorgan a esta isla un clima mediterráneo muy parecido al presente en la península ibérica.

Los veranos son secos y calurosos, con temperaturas medias por encima de los 25°C (siendo ésta la isla más cálida del Mediterráneo) que se extienden desde el mes de mayo hasta mediados de septiembre. Además, durante esta época, Chipre se encuentra bajo la influencia de zonas de baja presión atmosféricas que se extienden desde la gran depresión continental, situada en Asia occidental. Ésto resulta en veranos con cielos generalmente despejados y frecuentes episodios de calima (polvo desértico en suspensión) provenientes principalmente de los desiertos Árabe y del Sahara.

Éstos fenómenos pueden verse representados en la figura 3.4, donde los máximos se sitúan entre mayo (época en la que empezarían las altas temperaturas veraniegas en Chipre) y el mes de Octubre.

Además, las estaciones que transicionan el verano con el invierno (y viceversa) en Chipre son breves, extendiéndose la época invernal entre noviembre y marzo y comenzando el verano por mayo, lo que concuerda con una prematura aparición de las bajas presiones antes mencionadas en la zona y el consecuente transporte de polvo desértico vía aérea.

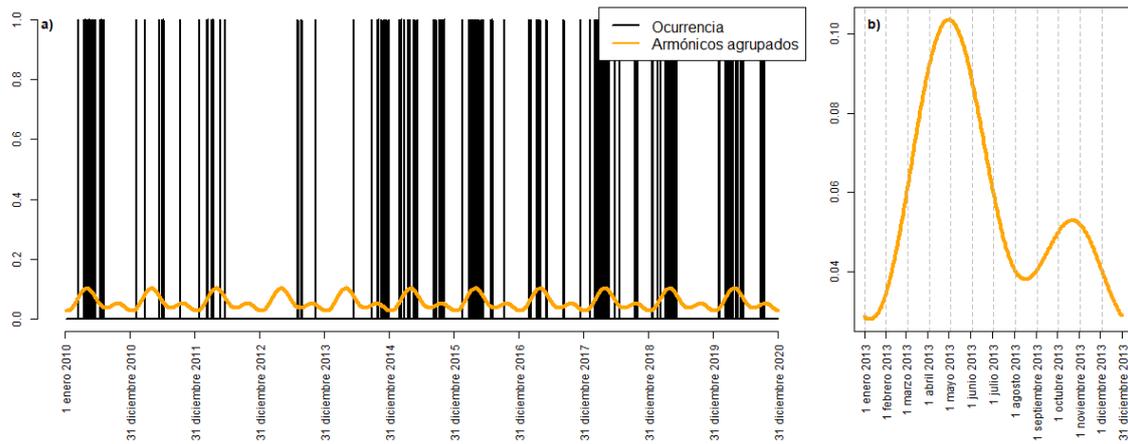


Figura 3.4: a) Ocurrencias y armónicos agrupados de tipo desértico entre los años 2010 y 2020. b) Ampliación del año 2013 de los armónicos agrupados.

En dicha figura se han representado los armónicos con mayor energía espectral y de los que es posible sacar más información en este caso, como son los de período anual ($n=11$), cuatrimestral ($n=33$) y trimestral ($n=44$).

3.3.2. Quema de Biomasa

Chipre tiene una quinta parte cubierta por frondosos bosques, que sumado a las altas temperaturas veraniegas y a las frecuentes sequías durante los meses que dura esta estación propicia la aparición de incendios forestales en la isla. Además, es también influenciada por aerosoles procedentes de la quema de biomasa en suelo turco durante ésta misma época. Todo ello se refleja bien en 3.5, donde el espacio entre los máximos en la gráfica se corresponde con los meses veraniegos en el país. Además, el pico de mayor concentración para los aerosoles carbonáceos se encuentra centrado en agosto y se extiende entre julio y septiembre, meses de más calor en el hemisferio norte.

Los armónicos más importantes en este caso tienen también períodos anual, cuatrimestral y trimestral ($n=11$, $n=33$ y $n=44$, respectivamente).

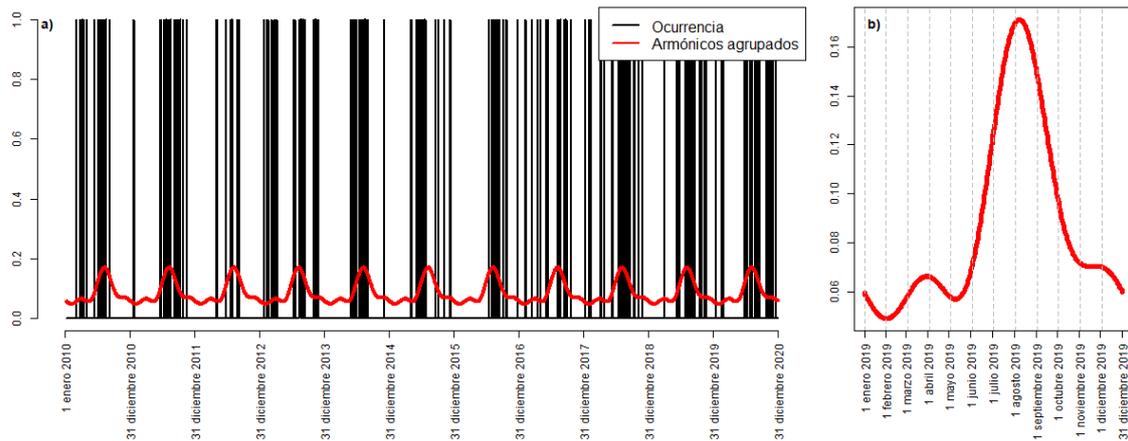


Figura 3.5: a) Ocurrencias y armónicos agrupados de tipo incendios entre los años 2010 y 2020. b) Ampliación del año 2019 de los armónicos agrupados.

La influencia de los incendios que puedan producirse de forma anual durante el verano en las zonas circundantes también tendrá cierta influencia en la presencia de este tipo de aerosol. Además, al estudiar la periodicidad y no fenómenos puntuales, se pueden estar despreciando influencias de incendios masivos que hayan tenido lugar en zonas más lejanas de los continentes Europeo, Asiático o Africano y cuyos gases producidos en la combustión hayan sido transportados por corrientes de aire hasta la isla de Chipre.

3.3.3. Mezcla

Los armónicos con mayor energía espectral y representados en la Figura 3.6 fueron los de período anual ($n=11$), cuatrimestral ($n=33$) y trimestral ($n=44$). Además, y al igual que para las ocurrencias de los distintos tipos, se puede ver la dificultad que supondría extraer comportamientos periódicos sin la ayuda de una descomposición espectral en armónicos de los datos originales.

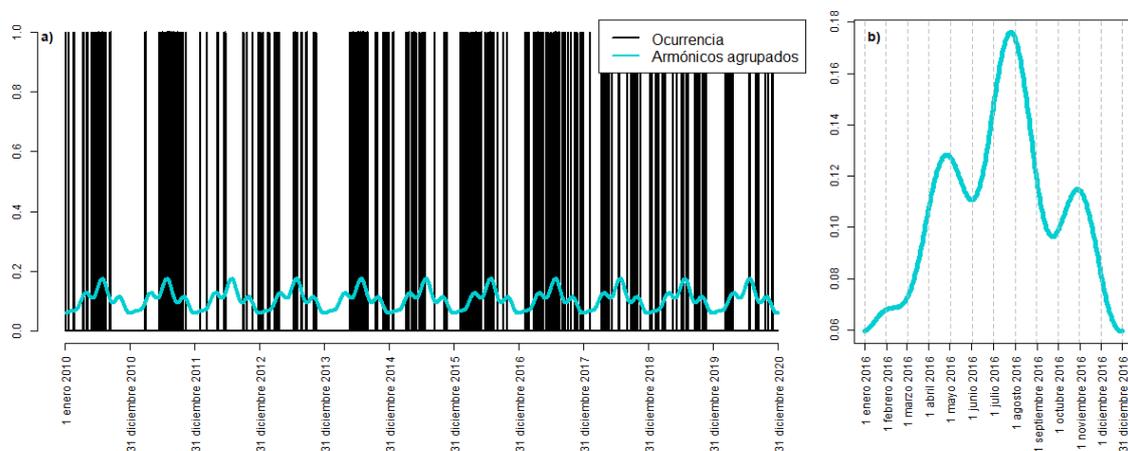


Figura 3.6: a) Ocurrencias y armónicos agrupados de tipo mezcla entre los años 2010 y 2020. b) Ampliación del año 2016 de los armónicos agrupados.

Este tipo de aerosol abarca parte de los diferentes tipos restantes, entre ellos desértico y de incendios.

Esto se puede ver comparando la figura 3.6 con las figuras correspondientes para el tipo desértico (3.4) e incendios (3.5), ya que como se verá y explicará más en detalle en la sección de los desfases entre los diferentes tipos (3.3.4), tiene los máximos coincidentes de buena manera con los dos tipos mencionados.

3.3.4. Desfases entre tipos de aerosol

Los fenómenos atmosféricos asociados a los diferentes tipos de aerosol no se dan, en general, de forma simultánea, sino que cada uno de ellos tiene unas épocas más frecuentes a lo largo del año.

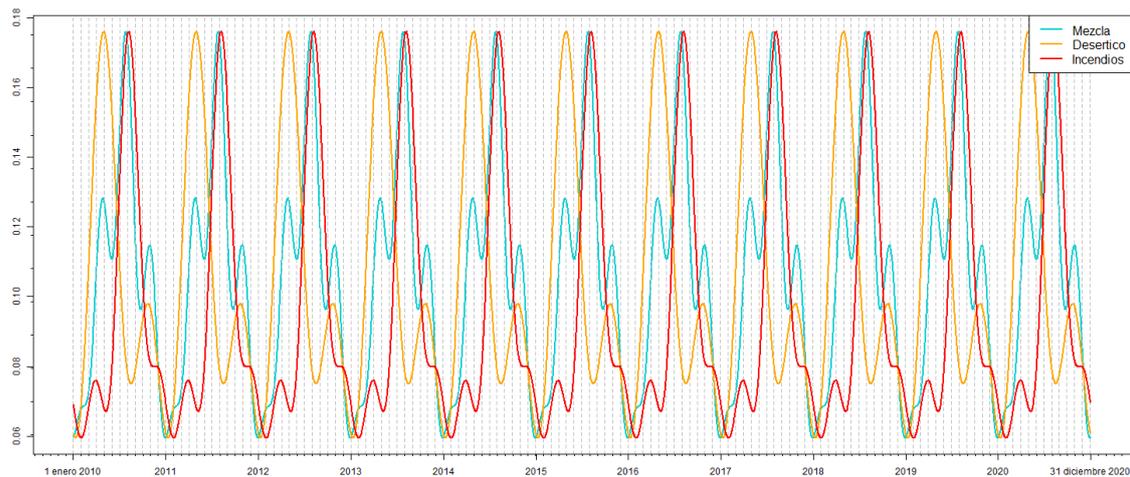


Figura 3.7: Armónicos principales de los 3 tipos de aerosol destacados para el período comprendido entre los años 2010 y 2020.

En el período de los 10 años estudiados, como se ve en la Figura 3.7, las tendencias de todos los tipos se mantienen, es decir, a lo largo de este rango de años no hay variaciones significativas dentro de cada tipo. Además, entre los distintos tipos no hay una variación apreciable en los desfases de los máximos con el tiempo, por lo que de cara a estudiar mejor lo que ocurre con ellos, conviene hacer una ampliación de algún año escogido de forma arbitraria, en este ejemplo 2018 y 2019.

Viendo la ampliación anual en la Figura 3.8, y distinguiendo los tres tipos representados en diferentes colores, podemos comparar las fases de los fenómenos.

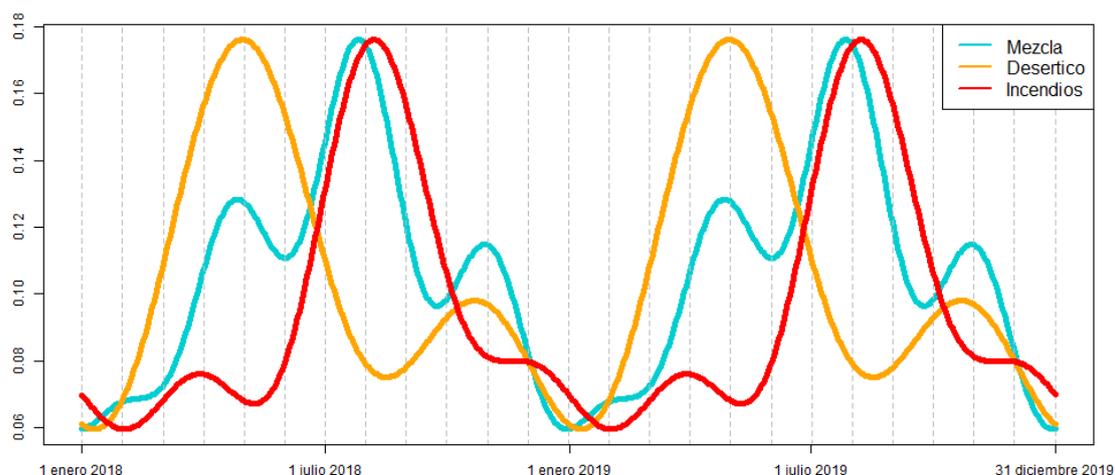


Figura 3.8: Ampliación de la figura 3.7 de los años 2018 y 2019 de los grupos de armónicos para los tres tipos de aerosol destacados.

Comentando primeramente el tipo mezcla, vemos tres máximos a lo largo del año, centrados cada uno a finales de abril, finales de julio (éste es el más pronunciado de los tres) y finales del mes de octubre.

El tipo desértico tiene sus dos máximos entre abril y mayo y mediados de octubre, siendo el primero de ellos el más marcado de los dos.

Por último, la línea que representa los incendios también tiene dos picos, uno poco relevante a finales de marzo y otro pronunciado a principios del mes de agosto.

Tanto para incendios como para polvo desértico, los picos van a coincidir con los del tipo mezcla, lo que cuadra por su propia condición de mezcla, ya que este tipo incluye parte de los restantes en sí mismo. Por ello, los desfases que existen entre el tipo mezcla y los tipos incendios y desértico van a ser prácticamente despreciables.

En los apartados anteriores se han comentado las épocas en las que se dan los fenómenos asociados a cada tipo, pero éstos no ocurren a la vez. La época principal de incendios en la zona estudiada se encuentra entre los máximos de mayor presencia de polvo desértico en el aire. La ocurrencia de tipo desértico abarca toda la época veraniega sobre Chipre, mientras que la época principal de incendios, aparte de tener un breve período de ocurrencia de este tipo entre marzo y abril, se encuentra principalmente en agosto. Esto significa que los desfases entre las máximas ocurrencias de estos tipos es de alrededor de 3 meses (tanto si retrocedemos en fechas como si avanzamos).

Como es de esperar por lo antes mencionado, el tipo mezcla también cumple con los desfases mencionados para los tipos incendios y desértico.

La Figura 3.2 muestra de forma gráfica la climatología del área abarcada por las estaciones terrestres para los valores del AOD 550nm en el rango de años que se extiende desde 2010 y 2020. En él hay información acerca de los valores que toma ese AOD a lo largo de

los meses durante un año (como no hay variaciones significativas en el comportamiento de este aerosol a lo largo de períodos tan cortos de años, entonces podemos promediar los valores de todos los años y sacar, como en este caso, un año 'ejemplo' que abarca la información general del comportamiento para este tamaño de partícula), las variaciones máximas del valor del AOD en cada mes, los cuartiles Q1 y Q3 (el primer cuartil muestra la mediana de la primera mitad de los valores y el tercero la mediana de la segunda mitad de los valores mensuales), la mediana (que se correspondería con el segundo cuartil y representa el valor de la variable en la posición central del conjunto de datos) y la media de los valores mensuales.

Por una parte, en la Figura 3.8, donde se representaron los grupos de armónicos para los diferentes tipos, se observan dos picos principales que destacan respecto al resto, uno alrededor de mayo protagonizado por el polvo desértico y otro sobre el mes de agosto donde se superponen los tipos mezcla e incendios.

Por otra, viendo la Figura 3.2 y más concretamente la media, se observan unos valores del AOD para los meses de mayo, julio y agosto que exceden los 0,2.

En la separación de tipos expuesta en la Tabla 1.1 hemos establecido que los valores del AOD que excedan los 0,2, independientemente del valor del Exponente de Angstrom, entran dentro de los 3 tipos principales.

Así, los valores en la gráfica de climatología que exceden los 0,2 coinciden temporalmente con los máximos en la representación de los grupos de armónicos, es decir, se dan en los meses veraniegos sobre Chipre, más concretamente en los antes mencionados mayo, julio y agosto, lo que significa que durante esta época del año predominarán estos tres tipos de aerosoles frente al resto.

4

Conclusiones

Con la ayuda de varios software como son R y MatLab, ha sido posible estudiar los comportamientos de ciertos grupos de datos con el objetivo de estudiar posibles periodicidades para rangos de tiempo de entre 20 y 10 años aplicando para ello Transformadas de Fourier. También, se ha realizado una correlación de los datos de ambos instrumentos con el finde de ver cuánto pueden diferir sus medidas, ya que la forma en que se obtienen estos datos es distinta en cada caso.

En este proceso de obtención de armónicos se ha llevado a cabo para diferentes tipos de datos: valores del AOD a 550nm provenientes tanto de MODIS como de AERONET y ocurrencias de diferentes tipos medidos desde tierra.

Se han seleccionado los armónicos más representativos y con mayor peso de la descomposición espectral para 550nm con el fin de enfrentar armónicos satelitales y terrestres, concluyendo que no existen diferencias significativas entre ambos.

Para la correlación de los datos, se ven índices que varían levemente para cada rango de kilómetros pero manteniéndose unas coincidencias muy buenas teniendo en cuenta la diferente naturaleza de los datos MODIS y terrestres, por lo que se puede hablar de buena correlación entre ambos conjuntos de datos.

Concluyendo con los resultados obtenidos a partir de las ocurrencias tras ver sus periodicidades, se observa una concordancia con el mapa de climatología de la zona en términos de los fenómenos atmosféricos que tienen lugar, ya que durante los meses de más calor es donde se dan los fenómenos de incendios y polvo desértico. También, se han visto los desfases que existen entre los tres tipos a lo largo de un año.

Todos estos análisis anteriores podrían aplicarse de forma similar para diferentes áreas terrestres y más extensas además de ver también posibles fenómenos atmosféricos y su relación con el clima en esas zonas. Además, las periodicidades encontradas para los distintos tipos pueden ser estudiadas con mayor profundidad con el fin de conocer sus distintas procedencias, fenómenos de transporte de estos aerosoles por la atmósfera, etc.

Bibliografía

- [1] Herrero Anta, Sara: *Caracterización de las propiedades ópticas y microfísicas de tres tipos de aerosoles atmosféricos durante tres eventos de alta turbiedad en Castilla y León*. Universidad de Valladolid. Facultad de ciencias.
- [2] González Catón, Ramiro: *Desarrollo de nuevos métodos de procesado de datos de redes fotométricas para el análisis de propiedades del aerosol atmosférico*. Universidad de Valladolid. Facultad de ciencias, 2021.
- [3] NASA: *TERRA*. <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/missions/earth/Terra.html>.
- [4] Toledano, Carlos: *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación 'El Arenosillo' de la red AERONET*. Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid, 2005.
- [5] *La contribución de los aerosoles al cambio climático*, Conciencia Eco. <https://www.concienciaeco.com/2015/02/23/la-contribucion-de-los-aerosoles-al-cambio-climatico/>.
- [6] Regional y Mesoscale Meteorology Branch: *La masa óptica*. <https://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2710/s2710009.htm>.
- [7] Dubovik, O., B.N. Holben T. Lapyonok A. Sinyuk M.I. Mishchenko P. Yang y I. Slutsker: *Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids*, volumen 59. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2002.
- [8] Calle, A, P Salvador y F González-Alonso: *Study of the impact of wildfire emissions, through MOPITT total CO column, at different spatial scales*, volumen 34. Taylor & Francis, 2013.
- [9] Lyamani, H., Valenzuela A. Perez Ramirez D. Toledano C. Granados Muñoz M. J. Olmo F. J. y L. Alados-Arboledas: *Aerosol properties over the western Mediterranean basin: temporal and spatial variability*, volumen 15. Atmos. Chem. Phys., 2015.
- [10] Grupo de Investigación en Radiación Solar Universidad de Valencia: *Medida de la columna de aerosoles y su distribución vertical*. <https://www.uv.es/oferta-cientifico-tecnologica/es/recursos/recursos-1286225407575/OCTRecurs.html?id=1286230513566>.

- [11] GODDARD SPACE FLIGHT CENTER: *Aqua, project science*. https://web.archive.org/web/20090912191715/http://aqua.nasa.gov/about/instrument_modis.php#.
- [12] Palomo, M., Ormeño S. Rincón J.A.: *El formato HDF: Un modelo de datos para el almacenamiento y gestión de información espacial de carácter ambiental*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [13] NASA: *MODIS Data Product Non-Technical Description - MOD 35*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/nontech/MOD35.php>.
- [14] Sánchez Escudero, Jaime: *Memoria de prácticas*. La memoria de prácticas se adjunta en la carpeta anexa a este trabajo., 2021.