



---

**Universidad de Valladolid**

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**OBSERVACIÓN DEL AEROSOL ÁRTICO MEDIANTE  
DISTINTAS TÉCNICAS DE MEDIDA**

Autora: Miriam Bastante Chichón

Tutores:

David Mateos Villán

Daniel González Fernández

2021-2022

# Índice general

|   |    |
|---|----|
| <b>Abstract</b> .....   | 1  |
| <b>Resumen</b> .....  | 1  |
| <b>Abreviaturas</b> .....                                     | 2  |
| <b>1. Introducción</b> .....                                  | 3  |
| 1.1. Aerosoles atmosféricos .....                             | 3  |
| 1.2. Técnicas de medición de aerosoles .....                  | 6  |
| 1.3. Propiedades de los aerosoles .....                       | 7  |
| 1.4. Objetivos.....   | 9  |
| <b>2. Instrumentación y metodología</b> .....                 | 10 |
| 2.1. Características de las estaciones.....                   | 10 |
| 2.2. Instrumentación utilizada .....                          | 11 |
| 2.2.1. CIMEL-381.....   | 11 |
| 2.2.2. SP1A .....   | 12 |
| 2.2.3. PFR.....   | 13 |
| <b>3. Resultados</b> .....                                    | 14 |
| 3.1. Comparación de los conjuntos de datos de Ny-Ålesund..... | 14 |
| 3.2. Comparación en distintas localizaciones .....            | 25 |
| 3.3. Tendencias.....  | 31 |
| <b>4. Conclusiones</b> .....                                  | 39 |
| <b>Bibliografía</b> .....                                     | 41 |
| <b>Índice de figuras</b> .....                                | 44 |
| <b>Índice de tablas</b> .....                                 | 46 |
| <b>Anexo I</b> .....  | 48 |

## Abstract

The main goal of this study is to analyse the differences between the measurements using different collocated photometers (CIMEL, PFR y SP1A) in Ny-Ålesund base. In addition, the differences between two CIMEL photometers situated at two nearby locations, Ny-Ålesund and Hornsund, are determined.

A comparison between different estimations of the Aerosol Optical Depth (AOD) and the Ångström Exponent (AE) are shown in this study. Both have been taken from the european project Rehearsol's data base in Ny-Ålesund and Hornsund.

The CIMEL from Ny-Ålesund has been used as a reference photometer. In 2017-2018 PFR measured an overestimation in AOD over the reference, meanwhile an underestimation was observed by SP1A. But three instruments present an uncertainty inside the AOD limits established by the World Meteorology Organization. The AE was overestimated in both PFR and SP1A instead.

In addition, it has been verified that the exact same air masses were not measured in Ny-Ålesund and Hornsund due to the comparison between the different CIMELs. In the study period, 2017-2020, AOD values are higher in Hornsund while AE values are lower.

The trends observed both annual and monthly from 2002 to 2020 are statistically negligible. Even though a slight decrease in AOD is shown in most of the analysed instruments and wavelengths.

**Key words:** AOD, AE, Svalbard, photometer, CIMEL, PFR, SP1A.

## Resumen

El principal objetivo de este TFG es determinar las diferencias entre diferentes fotómetros (CIMEL, PFR y SP1A) situados en un mismo lugar, Ny-Ålesund. También, se determinan las diferencias entre dos fotómetros, CIMEL, situados en dos localizaciones cercanas, Ny-Ålesund y Hornsund.

Se presentan en este trabajo comparaciones entre las diferentes estimaciones del espesor óptico del aerosol (AOD) y del exponente de Ångström (AE) tomadas de la base de datos del proyecto europeo Rehearsol en Ny-Ålesund y Hornsund.

Se ha tomado como fotómetro de referencia el CIMEL situado en Ny-Ålesund. En el periodo de 2017 al 2018, se observa una sobreestimación del AOD del PFR y una subestimación del AOD del SP1A respecto al de referencia. En cambio, en el caso del AE se obtienen valores en ambos fotómetros, PFR y SP1A, superiores a los del CIMEL.

Las comparaciones entre el CIMEL situado en Ny-Ålesund y el situado en Hornsund determinan que, en el periodo de estudio (2017-2020), los valores de AOD son mayores en Hornsund mientras que los valores de AE son menores. Lo que indica que no se miden en ambas localizaciones las mismas masas de aire.

Las tendencias observadas tanto anuales como mensuales desde el 2002 al 2020, no son estadísticamente significativas. Aunque, se aprecia una ligera disminución de los valores del AOD en la mayor parte de los instrumentos y longitudes de onda analizados.

Se puede concluir que existe una buena concordancia entre los datos obtenidos en los diferentes fotómetros analizados.

**Palabras clave:** AOD, AE, Svalbard, fotómetro, CIMEL, PFR, SP1A.

## Abreviaturas

AE: Ångström Exponent

AERONET: AErosol RObotic NETwork

AOD: Aerosol Optical Depth

AWIPEV: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, AWI; and Polar Institute Paul Emile Victor, IPEV

LIDAR: Light Detection and Ranging

MAE: Mean Absolute Error

MAPE: Mean Absolute Percentage Error

MBE: Mean Bias Error

NASA: National Aeronautics and Space Administration

PFR: Precision Filter Radiometer

RADAR: Radio Detection and Ranging

RMSE: Root Mean Squared Error

RRMSE: Relative Root Mean Square Error

TFPW: Trend Free Pre-Whitening

WMO: World Meteorological Organization

## 1. Introducción

### 1.1. Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles se definen como un conjunto de partículas sólidas o líquidas en suspensión en un medio gaseoso (Baron y Willeke, 1993). Como los aerosoles son el producto de procesos físicos y químicos su composición y características son variables.

Los aerosoles se estudian desde diferentes puntos de vista abarcando campos diversos como contaminación atmosférica, procesos de combustión, clima, salud humana, ecosistemas... Un área de estudio de los aerosoles atmosféricos es el radiative forcing, que analiza el impacto climático de los aerosoles de forma directa e indirecta (ver Figura 1). Los efectos directos se deben a la interacción directa con la radiación solar y terrestre por absorción y scattering de la radiación incidente. Si el aerosol es muy absorbente se produce un efecto de calentamiento de la Tierra por absorción, mientras que si es poco absorbente se produce el efecto contrario de enfriamiento por dispersión de la radiación solar incidente. Los efectos indirectos se deben a la capacidad de los aerosoles para modificar las propiedades de formación de las nubes al igual que sus características radiativas, siendo capaces de modular el albedo y la cobertura de las nubes (González, 2021).

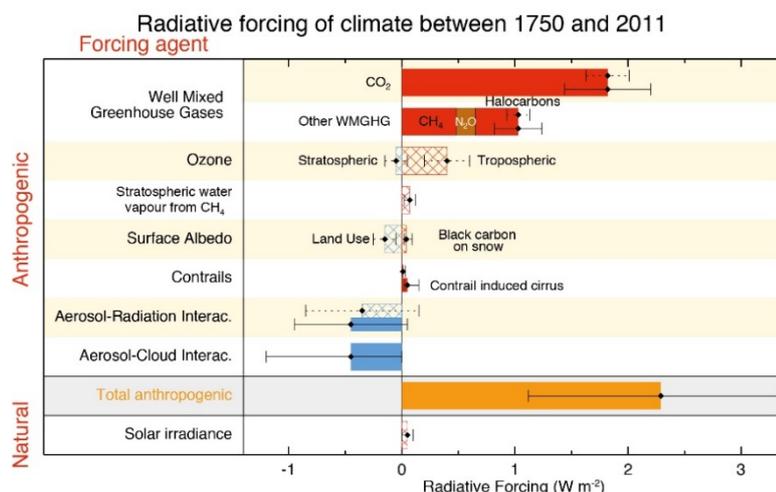


Figura 1. Forzamiento radiativo del clima terrestre entre 1750 y 2011, fuente de la imagen IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013].

Por su origen, se clasifican en antropogénicos y naturales. Las fuentes antropogénicas derivan de la actividad humana como humo de chimeneas, tubos de escape, minería abierta, explosiones...

Se incluye el smog producido por reacciones fotoquímicas, por lo que se observa un impacto a escala mundial de la actividad humana en los ciclos de azufre y nitrógeno. Los aerosoles naturales se componen principalmente de sal marina, polvo mineral, cenizas volcánicas, incendios...

Otra clasificación es por el diámetro aerodinámico, el cual es una combinación de los procesos de formación y del tamaño de las partículas. Como las partículas no son esféricas ni de igual

densidad, para su comparación y clasificación se define el diámetro aerodinámico equivalente como el diámetro de una partícula esférica de densidad  $1 \text{ g/cm}^3$  con los mismos efectos gravitatorios y velocidad en la atmósfera que la partícula de estudio (Baron y Willeke, 1993).

Se pueden distinguir distintos modos de distribuciones de tamaño (ver Figura 2), el modo de nucleación ( $<0,02 \text{ }\mu\text{m}$ ), el modo Aitken ( $0,02\text{-}0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ), el modo de acumulación ( $0,1\text{-}1 \text{ }\mu\text{m}$ ) y el modo grueso ( $>1 \text{ }\mu\text{m}$ ).

El modo de nucleación o partículas ultrafinas: partículas provenientes de la condensación de vapores, y su formación depende de las condiciones de temperatura, presión, humedad relativa y concentración de vapor. El mayor número de partículas se encuentra entre 5 y 15 nm. Los gases precursores son el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y el  $\text{NH}_3$ . La vida media de estas partículas en la atmósfera es de horas, ya que se coagulan rápidamente o aumentan su tamaño por condensación (Kulmala et al., 2001).

El modo Aitken está formada por partículas de origen primario, natural o antropogénico, o de origen secundario, debido a la moda de nucleación. Estas partículas permanecen en la atmósfera un tiempo superior a las partículas anteriores (Marino, 2011).

El modo de acumulación se origina principalmente por el crecimiento de las partículas de moda Aitken por medio de reacciones en fase líquida en las gotas de agua de las nubes. Su vida media en la atmósfera es grande. Estas partículas tienen efectos ópticos dominantes por lo que afectan a la visibilidad (Marino, 2011).

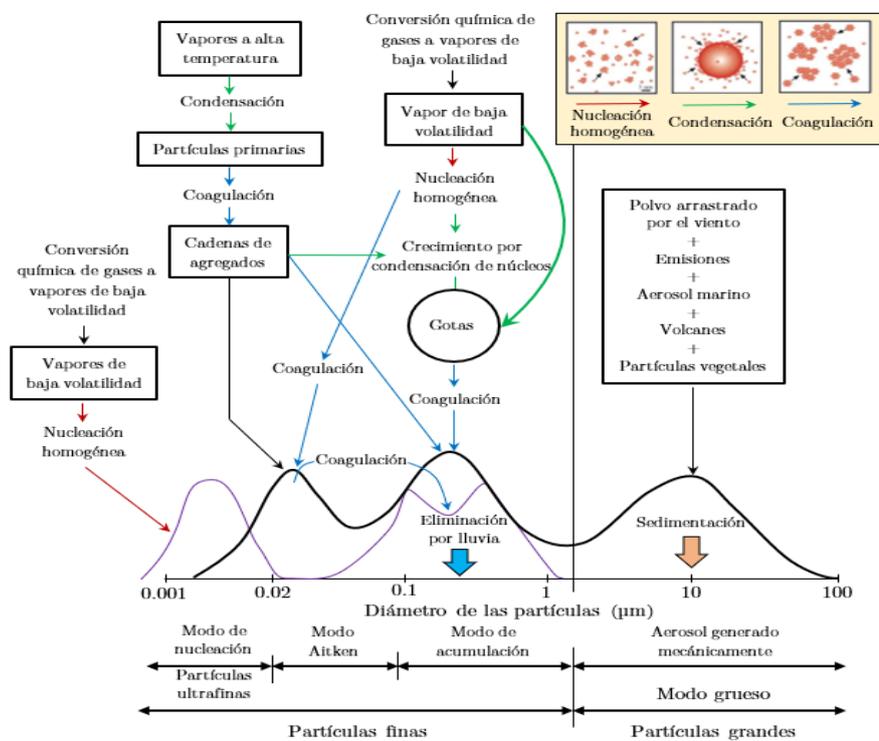


Figura 2 Distribución esquemática del tamaño de los aerosoles, mostrando cuatro modos y los mecanismos de formación y eliminación en la atmósfera. Las partículas del modo de acumulación pueden mostrar un carácter bimodal representado por la línea morada. Adaptación de Pieter (2017).

El modo grueso se forma principalmente por procesos mecánicos como la erosión de la superficie terrestre o por la explosión de burbujas en las superficies de mares y océanos. El crecimiento

de las partículas de diámetro  $<1 \mu\text{m}$  no puede generar partículas de diámetro  $>1 \mu\text{m}$ . Por ese motivo, las partículas  $<1 \mu\text{m}$  son denominadas partículas finas, mientras que las de diámetro  $>1 \mu\text{m}$  son gruesas (Fernández, 2011; Marino, 2011).

Generalmente en la distribución de tamaños se observan dos formas de campana definidas claramente, una asociada con las partículas finas y otra con las partículas de modo grueso. Esta separación es importante ya que las partículas pertenecientes a los diferentes modos tienen orígenes y transformaciones diferentes. Igualmente, la forma de eliminación difiere dependiendo del modo al que pertenezcan, mientras que las partículas finas se depositan en el suelo por acción de la lluvia, las partículas gruesas se eliminan al caer al suelo por acción de la gravedad o del viento.

Si los aerosoles alcanzan altas capas de la atmósfera como la troposfera o la estratosfera, pueden ser transportados muy lejos de sus fuentes de emisión (Toledano, 2005). Especialmente en el caso del humo de los grandes incendios forestales, los aerosoles de erupciones volcánicas y el polvo mineral de los desiertos. Los aerosoles de tamaños mayores permanecen menos tiempo en suspensión debido a la acción de la gravedad. Por el contrario, los aerosoles más finos permanecen suspendidos en la atmósfera por más tiempo, incluso pueden permanecer años. El aerosol atmosférico en suspensión será transportado por la masa de aire que lo contiene en la misma dirección y sentido.

Finalmente se pueden clasificar los aerosoles dependiendo su origen y propiedades en cuatro tipos bien diferenciados: marítimo, desértico, ártico y continental.

El **aerosol marítimo** es uno de los más importantes a nivel climatológico. Está compuesto por sustancias solubles en agua (99,96%) y partículas salinas (0,04%). Este tipo de aerosol, por lo general, está compuesto por partículas gruesas generadas a partir de procesos mecánicos (Vergaz, 2001). En los estudios climáticos se diferencian tres tipos de aerosol marítimo: limpio, mineral y polucionado, dependiendo de donde se formen y las partículas que lo componen (D'Almeida et al., 1991).

El **aerosol desértico** es uno de los más abundantes en la atmósfera, desempeñando un papel importante en el clima ya que es un generador de turbiedad. Este tipo de aerosoles presentan una gran variabilidad en sus propiedades, desde ópticas a microfísicas. Existen numerosas fuentes de emisión de polvo mineral, destacando las regiones áridas o semiáridas de Oriente Medio, Asia y África. Este tipo de aerosol afecta de forma importante al balance radiativo de la Tierra por su poder de absorción y dispersión de la luz solar. En el aerosol desértico predominan las partículas gruesas e irregulares generadas por procesos mecánicos (Velasco, 2020; Vergaz, 2001).

El **aerosol ártico** proviene fundamentalmente del norte de Europa y Asia, y de los océanos circundantes. Está compuesto principalmente de partículas marinas y minerales. La atmósfera en estas regiones presenta poca carga de aerosoles. El aerosol ártico se debe a la localización del frente polar, que varía de invierno a verano. En invierno, el frente polar se sitúa en latitudes bajas, pudiendo llegar los aerosoles antropogénicos europeos hasta las regiones árticas. En verano, el frente polar se encuentra en latitudes altas, evitando el intercambio de aire con latitudes menores (Vergaz, 2001; Velasco, 2020).

El **aerosol continental** recoge varios tipos de aerosol con diferentes características, entre los que se diferencian el rural, el forestal y el urbano. El aerosol rural contiene sustancias solubles en agua y polvo, encontrándose en zonas continentales alejadas de grandes núcleos urbanos. El aerosol forestal es típico de las selvas sudamericanas y africanas, cargado de componentes biológicos. El aerosol urbano es propio de zonas con alto grado de contaminación antropogénica, sus componentes básicos son nitratos, sustancias con azufre y carbono, polvo mineral y cenizas (Vergaz, 2001).

## 1.2. Técnicas de medición de aerosoles

Existen múltiples técnicas para medir y obtener información de los aerosoles atmosféricos. Se diferencian dos tipos de técnicas las in-situ, basadas en el análisis directo de las muestras de partículas presentes en el aire, y las remotas, también denominadas teledetección, las cuales analizan la interacción del aerosol con una fuente de iluminación.

En las técnicas in-situ, se hace circular un flujo de aire sobre unos filtros o instrumentos que permiten el análisis físico, químico, morfológico, etc., en tiempo real o posteriormente. Estas medidas suelen utilizarse para medir la calidad del aire en los puntos donde se ubican las bombas que succionan el aire, por lo que son generalmente representativas localmente (González, 2021).

Por otro lado, las técnicas de teledetección son utilizadas principalmente para el estudio del cambio climático y del calentamiento global. Se puede distinguir entre las medidas a través de instrumentos en la superficie terrestre o de satélites. Los satélites tienen mayor cobertura espacial que los instrumentos de tierra, pudiendo alcanzar medidas por todo el globo terráqueo. Sin embargo, los instrumentos situados en la superficie ofrecen una cobertura temporal continua frente a los satélites, a excepción de los geostacionarios, que toman una medida de un punto concreto cada órbita completa que realizan (González, 2021).

Como las medidas en tierra son habitualmente más precisas que las de los satélites, se utilizan medidas de varios puntos distribuidos en la superficie de la Tierra para calibrar y validar los datos obtenidos por los satélites. Ambas medidas son necesarias y complementarias, por eso existe una densa red de instrumentos en superficie como la red fotométrica AERONET (AErosol RObotic NETwork; Holben et al., 1998).

Se puede distinguir entre la teledetección activa y pasiva en función del tipo de fuente de iluminación utilizada. La teledetección activa presenta una fuente de iluminación propia, en comparación con la pasiva que recibe iluminación de una fuente existente, habitualmente natural como el sol, la luna o las estrellas. Los instrumentos de teledetección activa más utilizados son el LIDAR (Light Detection and Ranging), el RADAR (Radio Detection and Ranging) y el ceilómetro. El más destacado es el sistema LIDAR que emite pulsos de luz monocromática, mediante un láser pulsado que apunta al cenit. Los sistemas LIDAR pueden estar a nivel de superficie o en dispositivos aéreos (González, 2021). En teledetección pasiva destacan el fotómetro, el radiómetro, el espectrómetro o el espectroradiómetro. El

espectroradiómetro es el más completo siendo capaz de medir la intensidad de la radiación en varias bandas de longitud de onda, es decir, es multiespectral (Graham, 1999).

A través de la teledetección pasiva se obtiene una magnitud fundamental para el estudio de los aerosoles atmosféricos, el espesor óptico de aerosoles o AOD (Aerosol Optical Depth). La fotometría solar presenta el problema de que no está disponible durante la mitad del año, lo cual afecta especialmente en las zonas polares, ya que el Sol no sale durante meses, no pudiendo obtener datos del AOD durante periodos de tiempo prolongados. Por eso, se han desarrollado fotómetros lunares que aprovechan la irradiancia lunar extraterrestre lo cual es más complejo debido a que no emite radiación visible si no que a la Tierra llega la radiación solar reflejada sobre la Luna, la cual es muy variable. Otro tipo de fotometría, aunque con un grado menor de implantación, es la estelar, que se basa en obtener la radiación emitida por las estrellas. Para que estas medidas sean precisas se utiliza un telescopio que capta la radiancia de la estrella evitando la luz parásita producida por otras fuentes (González, 2021).

### 1.3. Propiedades de los aerosoles

En la atmósfera, el tamaño de las partículas no es despreciable respecto a la longitud de onda de la radiación. Las características químicas, físicas y ópticas de los aerosoles determinan la interacción con la radiación. Las partículas atmosféricas producen una discontinuidad en el índice de refracción con respecto al aire de su alrededor, lo cual provoca la dispersión de la luz en todas las direcciones, este suceso se explica en la teoría de scattering de Mie (Mie, 1908).

A continuación, se exponen los parámetros de los aerosoles atmosféricos más importantes y que se han utilizado en este trabajo.

#### 1.3.1 Espesor óptico de aerosoles

El espesor óptico de aerosoles cuyas siglas en inglés son AOD (Aerosol Optical Depth) es un identificador de la cantidad de aerosol que hay en la columna atmosférica. La radiometría estudia los componentes de la atmósfera comparando el espectro de radiación solar directa en la superficie terrestre y el espectro solar extraterrestre. La diferencia observada entre ambos espectros se debe principalmente a la atenuación debida a los aerosoles (scattering de Mie) y moléculas (scattering de Rayleigh), y por la absorción selectiva debida a ciertos componentes de la atmósfera (Toledano, 2005).

La atenuación de la intensidad de la luz transmitida, si aproximamos la atmósfera a una capa plano-paralela, se expresa mediante la ley de Beer-Bouguer-Lambert:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\tau(\lambda) m} \quad (1.1)$$

Siendo  $I_0$  e  $I$ , respectivamente, la irradiancia extraterrestre y la irradiancia medida a nivel del suelo ambas a una longitud de onda  $\lambda$ ,  $\tau$  el espesor óptico total de la atmósfera para una longitud de onda concreta, y  $m$  la masa óptica, la cual se define como la relación entre el camino óptico en la dirección de observación y la vertical. Habitualmente se realiza una medida directa al sol para medir el AOD, por lo que se puede asumir un modelo plano paralelo de la atmósfera, pudiéndose expresar la masa óptica en función del ángulo cenital solar ( $\theta$ ) como:

$$m = \sec(\theta) \quad (1.2)$$

Esta fórmula al ser una aproximación deja de ser precisa para ángulos mayores de  $60^\circ$ , debido a la acción de la curvatura de la Tierra, al efecto de la refracción y al scattering múltiple que generan un cierto error. La fórmula empírica de Kasten and Young (1989) proporciona mayor precisión:

$$m = 1/(\cos\theta + 0.50572 \cdot (1.46468 - \theta)^{-1.6364}) \quad (1.3)$$

Siendo  $\theta$  el ángulo cenital solar en radianes.

El espesor óptico,  $\tau(\lambda)$ , representa la disminución en intensidad que sufre la radiación al atravesar la columna atmosférica. A partir de la ecuación (1.1) el espesor óptico atmosférico viene dado por:

$$\tau(\lambda) = -\frac{1}{m} \ln(I/I_0) \quad (1.4)$$

Para conocer la contribución debida a los aerosoles en el espesor óptico total, AOD ( $\tau_a(\lambda)$ ), se utiliza la siguiente expresión:

$$\tau_a(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_R(\lambda) - \tau_g(\lambda) \quad (1.5)$$

donde  $\tau_R(\lambda)$  representa al scattering de Rayleigh y  $\tau_g(\lambda)$  las absorciones por parte de los gases atmosféricos. Los valores de AOD no consideran el espesor óptico de las nubes ya que se calculan para situaciones con el cielo despejado. Este parámetro, el espesor óptico de los aerosoles, es fundamental para el estudio de las propiedades de los aerosoles, como la turbiedad atmosférica (Toledano, 2005; González, 2021).

### 1.3.2. Parámetro alfa de Ångström

El scattering de Mie (1908) relaciona el tamaño de la partícula y la longitud de onda de la radiación incidente. Como el espesor óptico de los aerosoles presenta una dependencia con la longitud de onda, Ångström (1929) propuso la siguiente expresión parametrizada:

$$\tau_a = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (1.6)$$

Donde  $\beta$  se denomina coeficiente de turbidez, es una constante que coincide con el espesor óptico de aerosoles correspondiente a  $1\mu\text{m}$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda expresada en micrómetros y  $\alpha$  es el parámetro alfa o exponente de Ångström (AE), que se relaciona con tamaño del aerosol. Los parámetros  $\beta$  y  $\alpha$  caracterizan el aerosol dispersante y absorbente (Ångström, 1961).

El parámetro alfa puede variar entre 0 y 4, correspondiendo los valores más bajos a partículas más gruesas y los valores más altos asociados a partículas más finas. La dispersión de las partículas pequeñas tiene una fuerte dependencia espectral, aumentando para longitudes de onda cortas, mientras que la en las partículas grandes apenas presentan dependencia espectral. En el caso de los aerosoles, lo habitual es que el AE se encuentre entre 0 y 2.5 (Toledano, 2005).

Para el cálculo del AE se utilizan datos medidos de AOD en diferentes longitudes de onda. Según el rango elegido para calcular alfa, el resultado será distinto, lo que es un problema a la hora de comparar estudios distintos. Inicialmente, se calcula el valor de alfa en pares de longitudes de onda, denotándose como  $\alpha(\lambda_1/\lambda_2)$ . Tras tomar logaritmos en la expresión (1.6) se obtiene:

$$\ln \tau_a = \ln \beta - \alpha \cdot \ln \lambda \quad (1.7)$$

Esta expresión se verifica para cada longitud de onda, por lo que su resta permite obtener el valor del parámetro alfa:

$$\ln \tau_a(\lambda_1) - \ln \tau_a(\lambda_2) = -\alpha (\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2) \quad (1.8)$$

Otra opción para el cálculo del AE es a partir de 3 o más datos espectrales del AOD mediante un ajuste logarítmico por mínimos cuadrados. Un conjunto de valores espectrales de AOD permite conocer los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ . Este resultado se representa con las longitudes inicial y final de un rango espectral representativo,  $\alpha(\lambda_1-\lambda_2)$  (Toledano, 2005).

#### 1.4. Objetivos

El estudio de los aerosoles atmosféricos es un tema importante debido a que afectan, como se ha comentado anteriormente, al clima terrestre. En este proyecto el objetivo principal es el estudio de diferentes instrumentos para determinar la concordancia entre sus medias y con ello entender mejor cómo son los aerosoles en la región del Ártico.

Los objetivos específicos que persigue este proyecto:

- Análisis multi-instrumental de los aerosoles de la región del círculo polar Ártico y la correlación entre ellos.
- Evolución temporal de los aerosoles del Ártico y determinación de la existencia de una correlación entre los sucesos de gran importancia climática y los aerosoles observados en esta región.

## 2. Instrumentación y metodología

### 2.1. Características de las estaciones

El clima en Svalbard está dominado por su situación septentrional (ver Figura 3), mientras que la corriente de Noruega y la de Spitsbergen occidental moderan sus temperaturas. El clima ártico se considera al lugar donde el aire polar frío del norte y oeste se encuentra con el aire marino suave y húmedo del sur. Por este motivo, en esta región se registran circulaciones ciclónicas muy activas, frentes con nubosidad, lluvias y fuertes vientos. Svalbard presenta un clima cambiante debido a los factores anteriormente expuestos, lo que genera diferencias significativas entre las diferentes regiones del archipiélago. La parte occidental es más cálida, mientras que el interior tiene un clima más continental que las costas (Pakszys et al., 2015).



Figura 3. Vista aérea de la localización del archipiélago Svalbard dentro del globo terráqueo. (<https://earth.google.com/web>)

Se han utilizado los datos proporcionados por la red AERONET de AOD, así como del exponente de Ångström de dos localizaciones en Svalbard: las estaciones de Ny-Ålesund (78°55'44" N, 11°51'39" E, a 46 m s.n.m.) y de Hornsund (77°00'03" N, 15°33'36" E, a 10 m s.n.m.). En ambas localizaciones se utilizaba fotometría solar, pero en los últimos años se ha incluido la fotometría lunar en el CIMEL.

La estación principal de medida es la AWIPEV (Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, AWI; and Polar Institute Paul Emile Victor, IPEV) de Ny-Ålesund, siendo la más septentrional del archipiélago de Svalbard. Las observaciones se han realizado en la base de investigación Ártica Franco-Alemana, AWIPEV, cuyo clima típico es de tundra. Esta base cuenta con una instrumentación científica muy completa dedicada al estudio de diversas disciplinas, como la biología, química, geología y la física atmosférica. Hornsund es el fiordo más meridional de la parte occidental de Spitsbergen, donde se sitúa la estación polar polaca. Esta estación se encuentra ubicada aproximadamente a 230 km en línea recta de la estación de Ny-Ålesund. La ubicación de estas estaciones, mostrada en la Figura 4, hace que existan

diferencias en las masas de aire que se desplazan a las zonas de estudio (Pakszys et al., 2015; Pakszys y Zielinski, 2017).



Figura 4. Ubicación de las estaciones de estudio dentro del archipiélago de Svalbard. (<https://earth.google.com/web>)

## 2.2. Instrumentación utilizada

Las redes operativas tienen instrumentos estandarizados. Sus características se explican en este apartado, destacando sus diferencias y similitudes. En la Tabla 1 se exponen las principales características de los diferentes instrumentos utilizados en este trabajo (Toledano et al., 2012).

Tabla 1. Resumen de las características de los fotómetros solares

| Instrumento                 | CIMEL         | SP1A          | PFR          |
|-----------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Rango espectral             | 340 - 1640 nm | 350 - 1050 nm | 368 - 862 nm |
| Nº de canales               | 9             | 17            | 4            |
| Intervalos de medida al Sol | 5 - 15 min    | 1 min         | 1 min        |
| Incertidumbre del AOD       | 0.01 - 0.02   | 0.01          | 0.01         |
| Ángulo de visión            | 1°            | 1°            | 2.5°         |

### 2.2.1. CIMEL-381

Este instrumento es un fotómetro solar multibanda que toma medidas automáticas de la irradiancia solar espectral y radiancias de cielo. Los últimos modelos de estos fotómetros presentan toma de medidas nocturnas de irradiancia lunar espectral.

Las mediciones en la red AERONET se realizan mediante fotómetros solares CIMEL-381 compuestos por un cabezal óptico, una caja de control electrónico y un sistema robotizado (Figura 5). En el cabezal óptico se encuentran instalados un conjunto de filtros de interferencia

espectral en el rango de 340-1640 nm, así como sensores de humedad y temperatura. Este cabezal se une a un colimador que limita el campo para evitar la luz parásita. Dos microprocesadores controlan el funcionamiento en tiempo real de la adquisición de datos y la dirección del movimiento del instrumento. El sistema robotizado presenta dos motores con movimientos en los ejes azimutal y cenital, que permiten orientar el cabezal del sensor en la dirección de la bóveda celeste para la medida requerida. Antes de una medición, el colimador del fotómetro solar calcula la posición del Sol en función de la hora, la latitud y la longitud para realizar las mediciones de radiancia directa; se orienta al sol con una precisión de aproximadamente  $1^\circ$ , posteriormente emplea un detector de cuatro cuadrantes para el seguimiento preciso del sol. Las mediciones se realizan de forma automática, suspendiendo cualquier medición en el caso de que el sensor de lluvia detecte precipitaciones. Las mediciones se realizan en secuencia de 3 medidas consecutivas de radiación directa a intervalos de 15 minutos (actualmente bajando a una resolución de 5 minutos), lo que permite detectar la contaminación por nubes (Holben et al., 1998; Herrero, 2021).



Figura 5. Componentes principales de un fotómetro solar CIMEL-318. Imagen tomada de Velasco Merino (2020).

Para obtener unos datos de calidad con los que calcular los valores de AOD y de AE, debe de realizarse una calibración previa. La precisión de los datos es de 0.01 (visible) o 0.02 (ultravioleta). La red de AERONET ofrece tres niveles de datos: 1.0 (datos brutos), nivel 1.5 (datos filtrados por la nube) y nivel 2.0 (datos de calidad garantizada) (Pakszys et al., 2015).

### 2.2.2. SP1A

El fotómetro solar tipo SP1A está fabricado por Dr. Schulz & Partner GmbH con 17 canales cubriendo un rango espectral entre 350 nm y 1050 nm. El campo de visión es de  $1^\circ$ , una resolución temporal de 1 minuto y el tiempo de medición para un espectro completo es  $< 5$  s. Este instrumento también presenta un fotómetro lunar para la medición de la radiación lunar

directa durante la noche polar para derivar la profundidad óptica de los aerosoles y para las mediciones del brillo del cielo durante el día polar. El sensor óptico convierte la radiación incidente en una tensión que se amplifica hasta ocho órdenes de magnitud en función de la intensidad de la radiación entrante, realizándose los cálculos necesarios para la obtención de los parámetros ópticos como el AOD o el AE (Herber et al., 2002; Graßl y Ritter, 2019).

### 2.2.3. PFR

El Radiómetro de Filtros de Precisión (PFR) es un instrumento que mide de forma precisa la radiación solar directa en cuatro bandas espectrales estrechas centradas en las siguientes longitudes de onda: 368, 411, 501 y 862 nm. El PFR (Figura 6) presenta una cabeza de sensor óptico con amplificadores de señal y una caja electrónica con fuente de alimentación y registrador de datos. Está diseñado para funcionar de manera automática, el sensor de seguimiento electrónico se dirige al sol y lo sigue a través del cielo durante el día. Cada minuto se registra el promedio de diez mediciones individuales tomadas en 1.25 segundos, que permiten obtener las densidades ópticas de los aerosoles en cuatro longitudes de onda. Los datos están gestionados por el World Radiation Centre de Davos (Suiza) (Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos World Radiation Center, 2012; Hermansen et al., 2003).



Figura 6. Imagen del fotómetro PFR. Imagen tomada de PMODWRC (2012).

### 3. Resultados

Los datos utilizados en este trabajo han sido proporcionados por el tutor, procedentes de la database de Svalbard del proyecto europeo Rehearsol. Las medidas de AOD y AE en se encuentran agrupadas en ficheros anuales con una resolución de 1 minuto, para poder comparar y analizar los datos.

En la base de Ny-Ålesund, se han realizado observaciones con tres instrumentos diferentes: PFR desde 2002 en la estación de Sverdrup, SP1A desde 2003 en la estación de AWIPEV y el CIMEL desde 2017 en la estación de AWIPEV. Mientras que en el asentamiento de Hornsund, se han realizado observaciones con un único instrumento el CIMEL desde 2005. Para buscar las medidas en común, nos centraremos en el análisis de tres longitudes de onda: 368-380 nm, 500 nm y 860-870 nm y el AE.

#### 3.1. Comparación de los conjuntos de datos de Ny-Ålesund

Para esta comparación se considera como instrumento de referencia el CIMEL de AWIPEV, en el caso de comparar otros instrumentos sin incluir el CIMEL se considera como referencia el SP1A. Se utilizan los datos válidos desde finales de marzo del 2017 hasta finales de septiembre del 2018. En la Tabla 2 se pueden observar las fechas de inicio y fin, así como el número de datos válidos de cada instrumento.

Tabla 2. Intervalos de estudio de los distintos fotómetros utilizados.

| Instrumento | CIMEL AWIPEV | SP1A       | PFR        |
|-------------|--------------|------------|------------|
| Nº de datos | 3305         | 71477      | 47063      |
| Inicio      | 01/06/2017   | 21/03/2017 | 01/04/2017 |
| Fin         | 21/09/2018   | 03/10/2018 | 16/09/2018 |

Como se puede apreciar en la Tabla 2 cada instrumento utilizado tiene diferentes fechas tanto de comienzo para la toma de datos válidos como de finalización de la toma de los datos, así como diferencias sustanciales entre el número de datos obtenidos entre cada uno de ellos. El CIMEL presenta un número de datos más reducido, teniendo en cuenta que comienza a funcionar aproximadamente dos meses más tarde que el resto de los instrumentos a comparar.

A continuación, se muestran las correlaciones entre los valores de AOD por pares de instrumentos para tres longitudes de onda del 2017 al 2018. Las diferencias no son homogéneas a lo largo del año, sino que son variables dependiendo de la estación en un año.

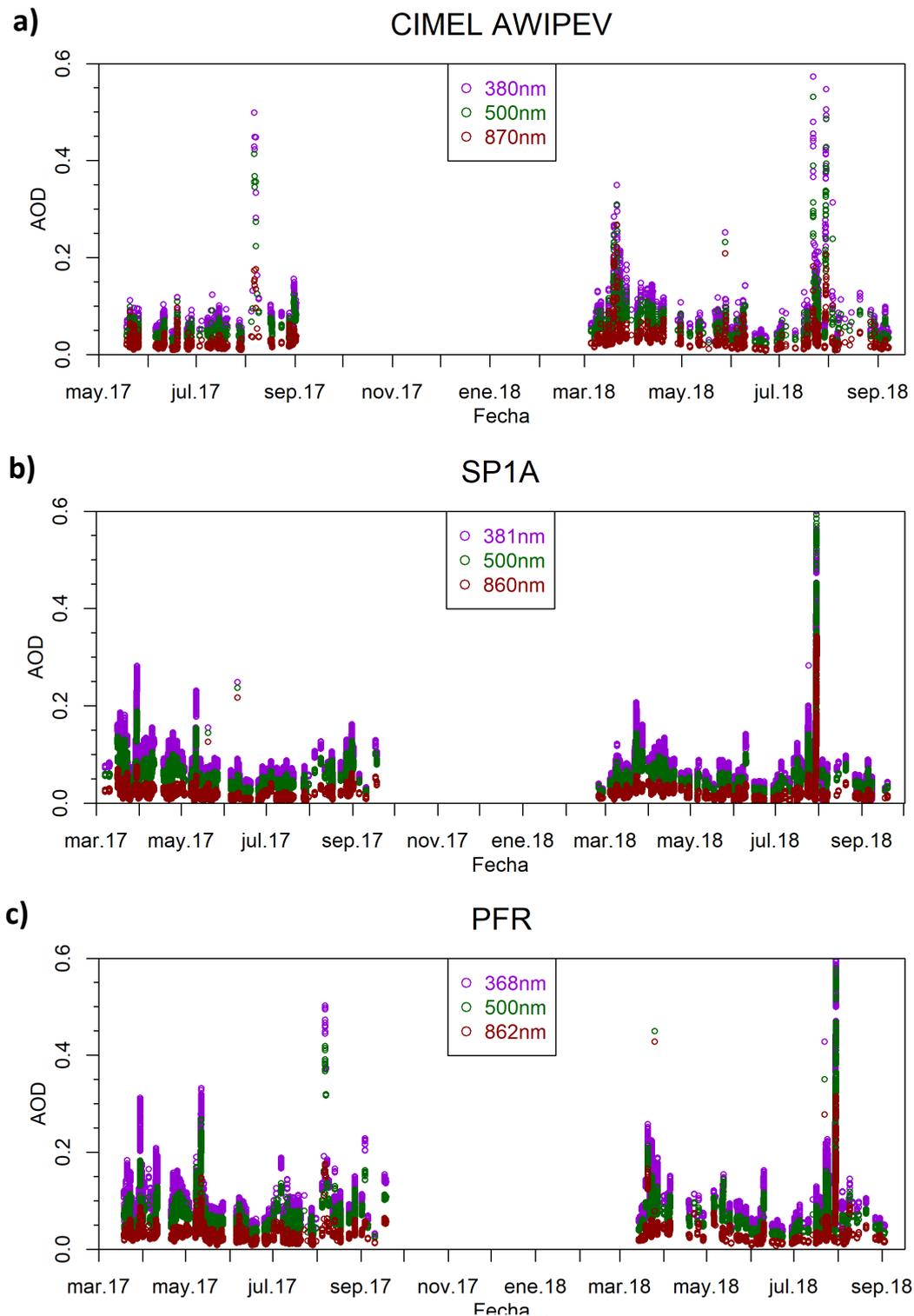


Figura 7. Valores de AOD para tres longitudes de onda en Ny-Ålesund durante el periodo de 2017 a 2018 de (a) CIMEL AWIPEV, (b) SP1A y (c) PFR.

Se aprecia en la Figura 7 que, para todos los fotómetros, el AOD disminuye al aumentar la longitud de onda; existe una relación inversamente proporcional entre el AOD y la longitud de onda. Esto se debe a que los aerosoles más habituales dispersan con mayor facilidad la luz en rangos cercanos al azul (longitud de onda corta) que los cercanos al rojo (longitud de onda larga).

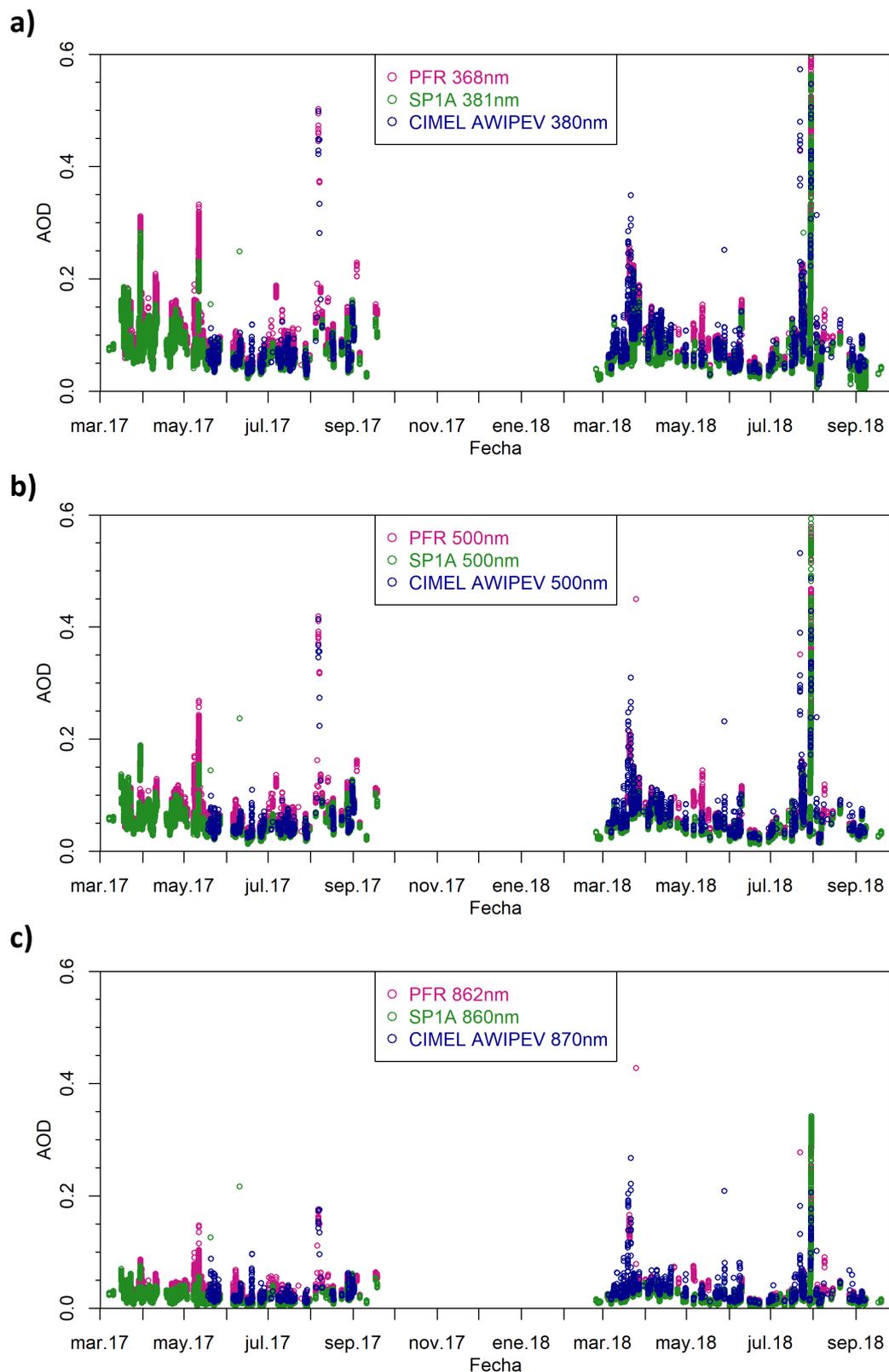


Figura 8. Evolución temporal de los valores de AOD de los diferentes fotómetros para longitudes de onda de (a) 368-381 nm, (b) 500 nm y (c) 860-870 nm.

En la Figura 8, se aprecia como existen menos diferencias entre los diferentes fotómetros en longitudes de onda larga ( $\approx 870$  nm), frente a las demás longitudes de onda analizadas. Sin

embargo, se puede observar una diferencia mayor entre los valores de AOD del PFR frente al resto de instrumentos.

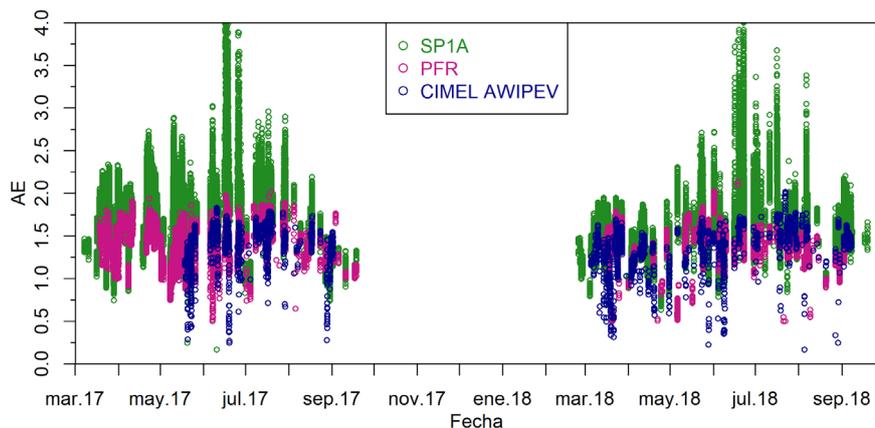


Figura 9. Evolución temporal de los valores del exponente de Ångström de los diferentes fotómetros entre 2017 y 2018.

El exponente de Ångström presenta variaciones apreciables entre los diferentes fotómetros como se puede observar en la Figura 9. El fotómetro CIMEL tiene valores de AE menores que los dos fotómetros con los que se compara en Ny-Ålesund. El PFR presenta valores ligeramente superiores al CIMEL, sin embargo, los valores de AE del SP1A llegan a ser el doble, en muchos de los casos, que los fotómetros con los que se compara. Esta diferencia apreciable del SP1A respecto al resto, hace pensar que son valores calculados del AE están sobreestimados. Los valores más habituales de AE para las zonas del Ártico presentan un amplio rango de entre 0.5 y 1.8, asociándose los valores más altos al aerosol continental limpio y los más bajos al marítimo limpio (Toledano et al., 2012).

Tras estudiar la evolución temporal del AOD de los diferentes fotómetros, se pueden analizar las diferencias que presenta cada instrumento frente al de referencia, CIMEL AWIPEV.

### PFR VS CIMEL AWIPEV

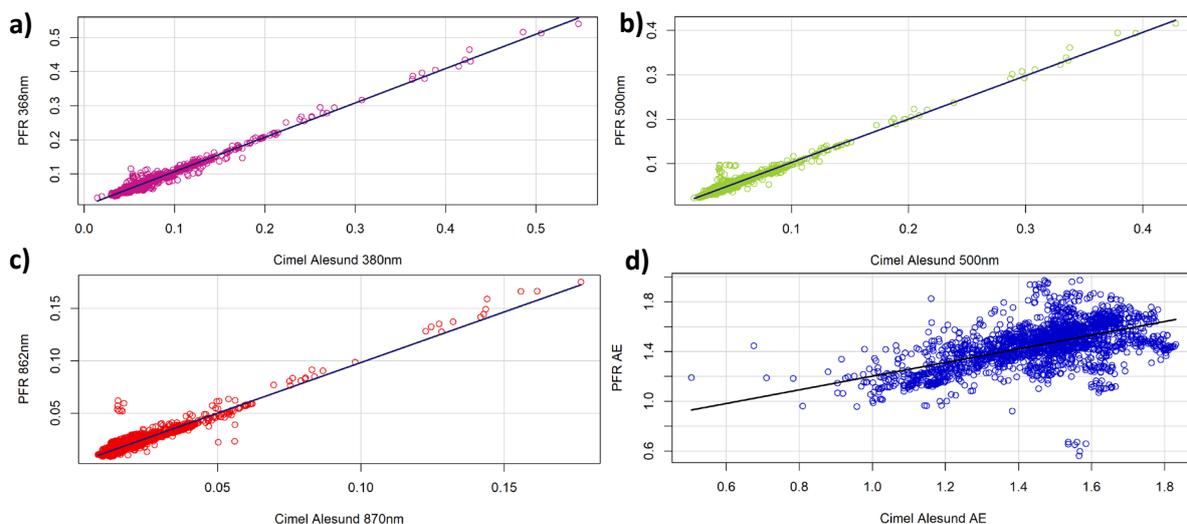


Figura 10. Comparación para (a) 3868-380 nm, (b) 500 nm y (c) 862-870 nm del AOD de los fotómetros PFR y CIMEL. (d) Comparación del AE de los fotómetros PFR y CIMEL.

Se puede apreciar en la Figura 10 que existe una pequeña sobreestimación del PFR respecto al CIMEL, existiendo más dispersión en la longitud de onda más larga ( $\approx 870$  nm). Los valores del AOD son bastante similares en ambos instrumentos, sin embargo, los valores del exponente de Ångström difieren más siendo superiores en el PFR.

### SP1A VS CIMEL AWIPEV

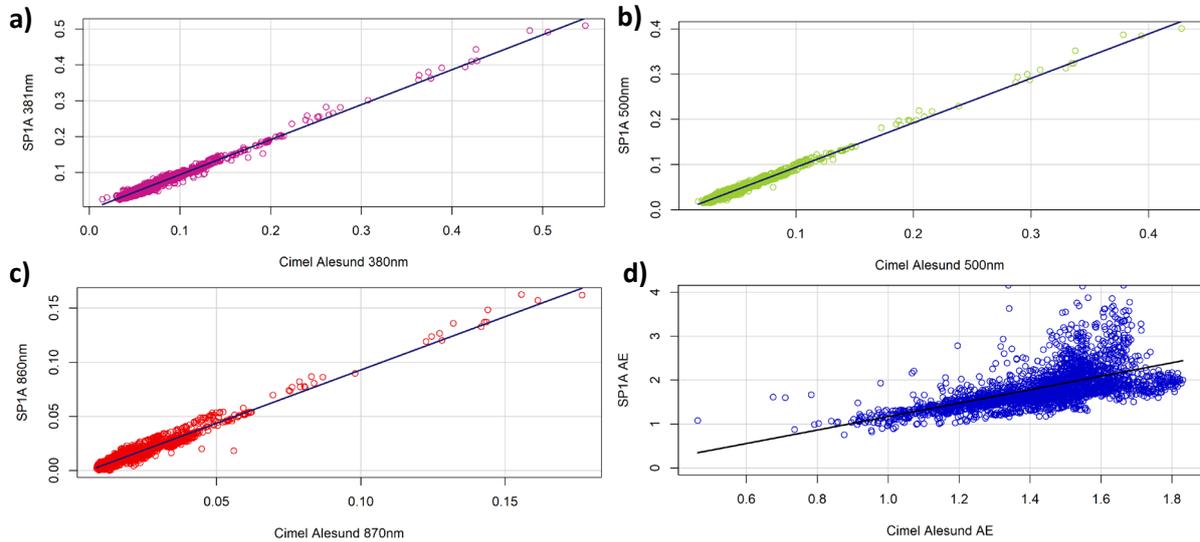


Figura 11. Comparación para (a) 3868-380 nm, (b) 500 nm y (c) 862-870 nm del AOD de los fotómetros SP1A y CIMEL. (d) Comparación del AE de los fotómetros SP1A y CIMEL.

En la comparación entre el SP1A y el CIMEL AWIPEV (ver figura 11) se puede observar una ligera diferencia entre los datos obtenidos entre ambos instrumentos. Existe una ligera subestimación del SP1A respecto al CIMEL en los valores de AOD, en cambio, en los valores de AE el SP1A presenta valores sustancialmente superiores a los calculados por el CIMEL.

### SP1A VS PFR

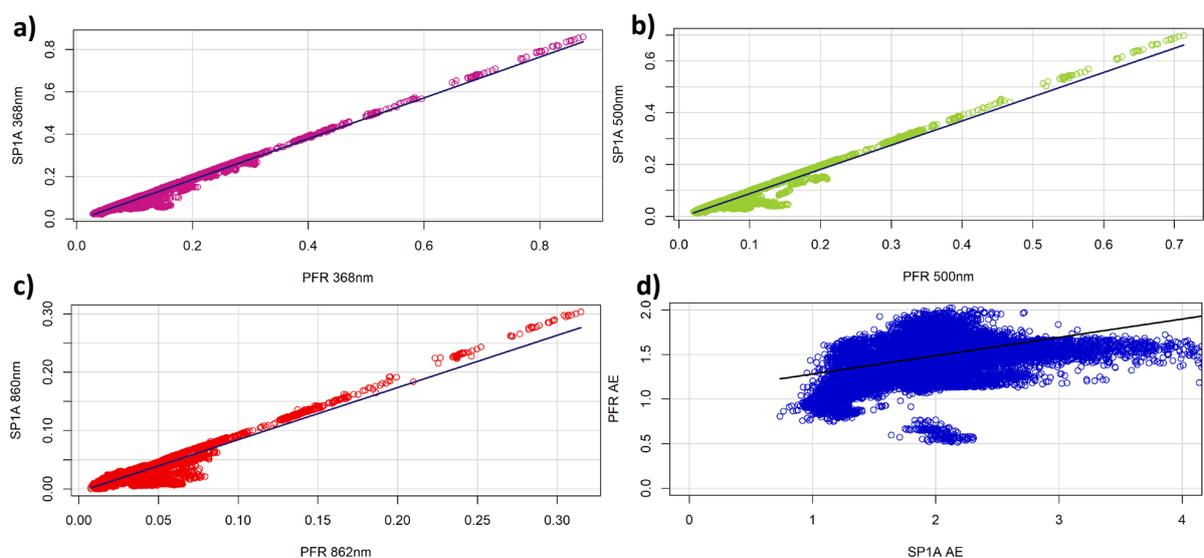


Figura 12. Comparación para (a) 3868-380 nm, (b) 500 nm y (c) 862-870 nm del AOD de los fotómetros SP1A y PFR. (d) Comparación del AE de los fotómetros SP1A y PFR.

Se puede apreciar en la Figura 12 que son mayores los valores del AOD obtenidos por el PFR frente a los del SP1A, viéndose que la diferencia se incrementa en el rango de unos 860 nm. Respecto a los valores del AE se observa una diferencia notable entre los dos instrumentos de medida, obteniéndose valores que llegan incluso al doble del valor del SP1A respecto del PFR. Como se ha comentado anteriormente, esta diferencia tan clara se debe probablemente a una sobreestimación de este instrumento al realizar los cálculos para obtener el exponente de Ångström.

En la Figura 13 se puede apreciar las diferencias por pares de instrumentos, tanto de las distintas longitudes de onda analizadas como del exponente de Ångström.

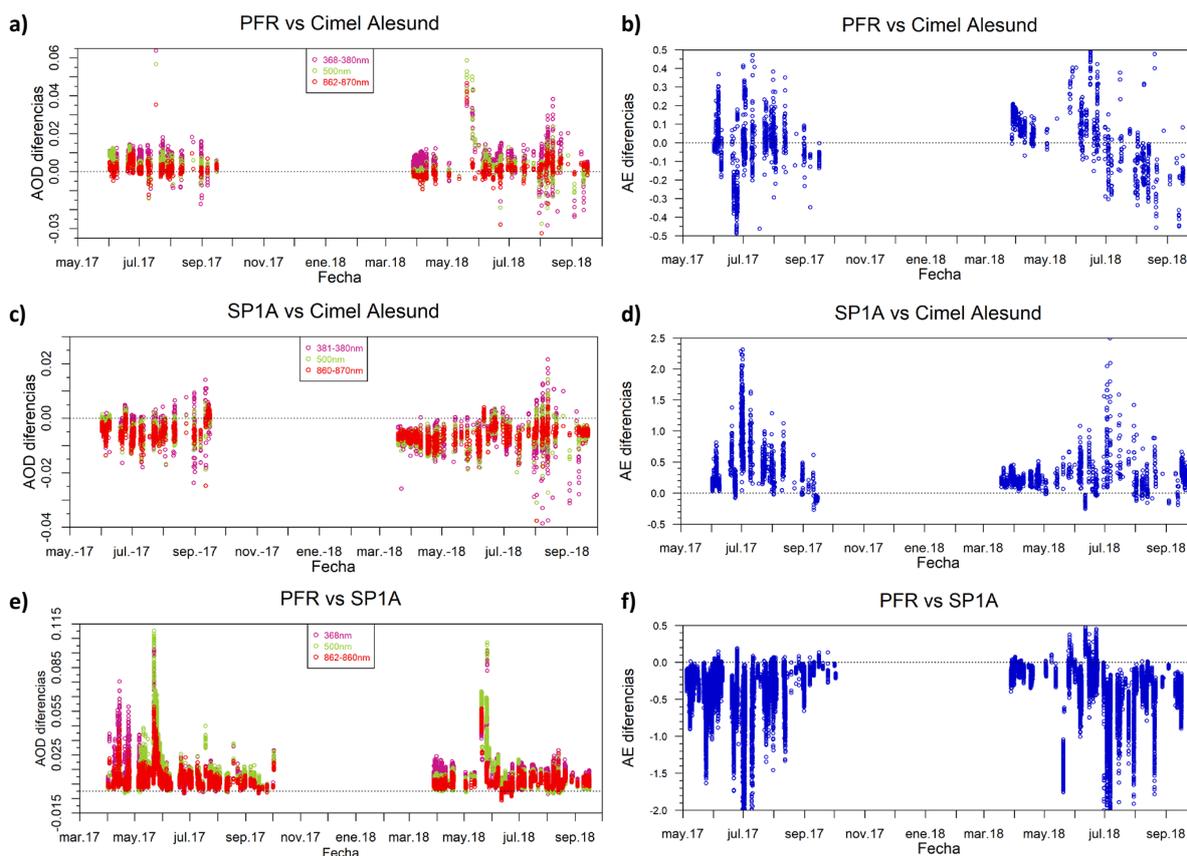


Figura 13. Evolución temporal desde mayo del 2017 a octubre de 2018 de las diferencias entre los diferentes instrumentos por parejas. (a) Diferencias entre PFR y CIMEL de AOD, (b) diferencias entre PFR y CIMEL de AE, (c) diferencias entre SP1A y CIMEL de AOD, (d) diferencias entre SP1A y CIMEL de AE, (e) diferencias entre PFR y SP1A de AOD y (f) diferencias entre PFR y SP1A de AE.

En la comparación entre el PFR y el CIMEL, como se podía intuir en figuras anteriores, las diferencias de AOD sobrestiman ligeramente el PFR respecto del CIMEL. En cambio, en el caso de AE no se observa una tendencia clara de que los datos sean superiores o inferiores de un fotómetro respecto del otro, esto puede deberse a que al ser valores bajos de AOD el AE tiene bastante error.

Como se puede ver en los histogramas de la Figura 14, la comparativa del AOD entre el SP1A y el CIMEL presentan una menor dispersión de los valores, que en el resto de los instrumentos. En cuanto a las diferencias observadas entre el PFR y el SP1A del AOD, se ve que apenas hay valores negativos siendo claramente los valores del PFR ligeramente superiores a los del SP1A.

En el caso de la comparativa del AE, la diferencia entre el PFR y el CIMEL es de las que menor dispersión presenta. En cambio, al comparar el SP1A y el CIMEL se observa una dispersión mayor desplazada hacia los valores positivos al igual que en la comparativa del PFR y SP1A, pero en este caso se desplaza hacia valores negativos.

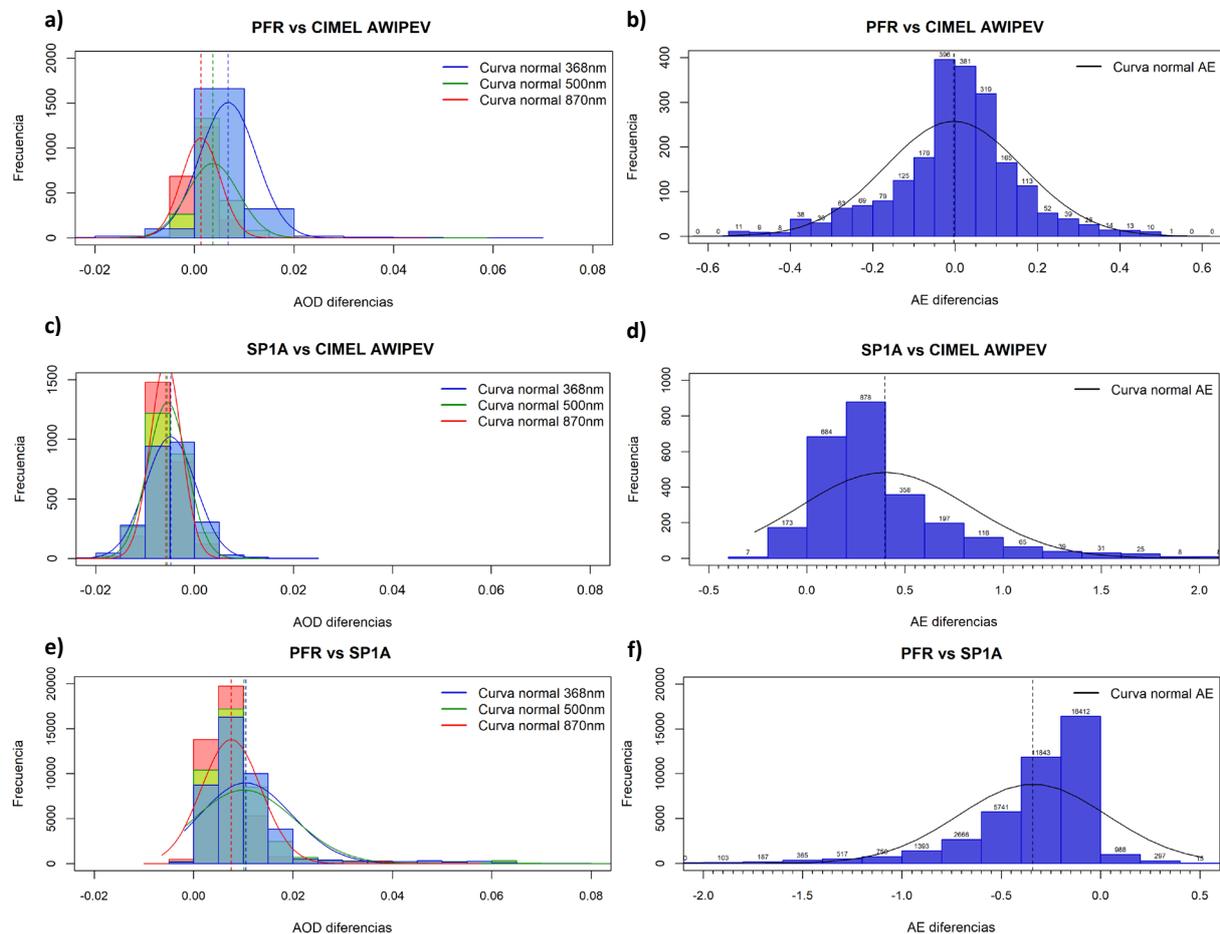


Figura 14. Histogramas de las diferencias de los diferentes instrumentos por parejas con las curvas normales para cada longitud de onda. Las líneas discontinuas representan la medida de la diferencia de AOD de cada longitud de onda. Los gráficos (a) y (b) reflejan la comparación de las diferencias entre el PFR y el CIMEL, los (c) y (d) muestran la comparación de las diferencias entre el SP1A y el CIMEL y los (e) y (f) manifiestan la comparación de las diferencias entre el PFR y el SP1A. Resultados para el AOD a tres longitudes de onda: a), c), e) y para el AE: b), d), f).

En el caso de la comparación del PFR y del CIMEL, las diferencias medias del AOD son positivas por lo que más de la mitad de los valores del PFR son mayores que los del CIMEL. Se observa que las medias de las diferencias del AOD disminuyen a mayor longitud de onda. En las diferencias del AE, se observa que los valores se encuentran bastante dispersos tanto a la derecha como a la izquierda del 0, por lo que no se encuentra diferencia clara entre ambos fotómetros.

En la comparación del SP1A y del CIMEL, la media de las diferencias del AOD se encuentra en valores negativos lo que indica que los valores del CIMEL son superiores a los del SP1A, pero no existe mucha dispersión de estos valores como se puede apreciar en la curva normal.

Las medias de las diferencias del AOD apenas difieren en relación con la longitud de onda. En el caso de las diferencias del AE, el pico del histograma se encuentra representado para valores positivos, es decir, siendo mayores los valores del SP1A que los del CIMEL. Se observa una curva aplanada y amplia horizontalmente lo que indica que la desviación estándar es elevada.

Finalmente, la comparativa del PFR y del SP1A, muestra un desplazamiento de la media de las diferencias del AOD hacia valores positivos, es decir, los valores del PFR son ligeramente superiores a los del SP1A. Existe una mayor dispersión de los valores en la longitud de onda de 500 nm, existiendo diferencias más grandes entre ambos instrumentos. En el caso de las diferencias del AE, se observa bastante dispersión de las medidas siendo la media de los valores del SP1A mayor que los del PFR. Al igual que en la anterior comparación, la curva es aplanada y amplia horizontalmente indicando que la desviación estándar es elevada.

Basándonos en el artículo de Willmott (1982), no es suficiente utilizar el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) ni el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) para determinar la correlación entre el valor observado ( $O$ ) y el valor predicho por el modelo ( $P$ ). Esto se debe a que no tienen valor práctico real en la evaluación del rendimiento del modelo. Por eso además de indicar los valores de  $r^2$  y de los coeficientes de la recta de regresión ( $a$  y  $b$ ), se calculan otros cuatro tipos de medidas de diferencias que se explican más adelante. La recta de regresión ( $P_i = a + b O_i$ ) es un modelo lineal que relaciona la variable  $P$  con  $O$ .

Las medidas de diferencia que se observan en la Tabla 4 son el error medio de sesgo (MBE), la varianza de la distribución de las diferencias representada por  $s_d^2$ , el error medio cuadrático (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). Además, se incluyen el error medio cuadrático relativo (RRMSE) que indica el porcentaje de variación en la precisión del RSME, el error de porcentaje medio absoluto (MAPE) que es una medida relativa que determina el error en unidades de porcentaje en lugar de en unidades de la variable, y un índice de acuerdo ( $d$ ) introducido por Willmott y Wicks (1980). El índice de acuerdo ( $d$ ) es una medida descriptiva, que se puede aplicar para realizar comparaciones cruzadas entre modelos. Estos índices toman la siguiente forma:

$$\text{MBE} = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (3.1)$$

$$s_d^2 = (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i - \text{MBE})^2 \quad (3.2)$$

$$\text{RMSE} = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3.3)$$

$$\text{MAE} = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (3.4)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i'| - |O_i'|)^2} \right] \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (3.5)$$

Con  $P'_i = P_i - \bar{O}$  y  $O'_i = O_i - \bar{O}$

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

$$\text{MAPE} = \frac{100}{N} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{|P_i|} \right] \quad (3.7)$$

En la Tabla 3 también se muestran el valor medio de P ( $\bar{P}$ ), valor medio de O ( $\bar{O}$ ), la desviación estándar de la variable P ( $s_p$ ) y la desviación estándar de la variable O ( $s_o$ ).

Las mejores medidas globales del rendimiento del modelo son el RMSE y el MAE, ya que ofrecen estimaciones del error medio, siendo el MAE menos sensible que el RSME a los valores extremos, pero evita la exponenciación físicamente artificial que es un artefacto del razonamiento estadístico-matemático del que procede el RMSE (Willmott, 1982; Despotovic et al., 2016).

Tabla 3. Medidas cuantitativas de cada fotómetro y de las diferencias entre dos fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.

|  | $\lambda(\text{nm})$ | N     | $\bar{P}$ | $\bar{O}$ | $s_p$ | $s_o$ | a       | b    | $r^2$ |
|--|----------------------|-------|-----------|-----------|-------|-------|---------|------|-------|
| PS1A vs PFR<br>P $\rightarrow$ PS1A<br>O $\rightarrow$ PFR | 368                  | 41536 | 0.07      | 0.08      | 0.05  | 0.05  | 0.0074  | 0.96 | 0.97  |
|  | 500                  | 41536 | 0.05      | 0.06      | 0.04  | 0.04  | -0.0064 | 0.94 | 0.93  |
|  | 870                  | 41536 | 0.018     | 0.03      | 0.016 | 0.017 | -0.0048 | 0.89 | 0.87  |
|  | AE                   | 41536 | 1.8       | 1.4       | 0.4   | 0.19  | 0.38    | 0.98 | 0.20  |
| CA vs PFR<br>P $\rightarrow$ CA<br>O $\rightarrow$ PFR     | 368                  | 2147  | 0.07      | 0.07      | 0.04  | 0.04  | -0.0050 | 0.98 | 0.98  |
|  | 500                  | 2147  | 0.05      | 0.05      | 0.03  | 0.03  | -0.0035 | 0.99 | 0.97  |
|  | 870                  | 2147  | 0.02      | 0.02      | 0.014 | 0.014 | -0.0004 | 0.96 | 0.93  |
|  | AE                   | 2147  | 1.5       | 1.5       | 0.18  | 0.18  | 0.59    | 0.60 | 0.33  |
| CA vs SP1A<br>P $\rightarrow$ CA<br>O $\rightarrow$ SP1A   | 381                  | 2607  | 0.07      | 0.06      | 0.04  | 0.04  | 0.0042  | 1.01 | 0.98  |
|  | 500                  | 2607  | 0.05      | 0.04      | 0.03  | 0.03  | 0.0055  | 0.99 | 0.98  |
|  | 870                  | 2607  | 0.02      | 0.02      | 0.014 | 0.014 | 0.0064  | 0.96 | 0.95  |
|  | AE                   | 2607  | 1.4       | 1.83      | 0.19  | 0.51  | 1.05    | 0.20 | 0.32  |

Tabla 4. Medidas cuantitativas de las diferencias entre dos fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.

|  | $\lambda(\text{nm})$ | MBE     | $s_a^2$  | RMSE  | MAE   | d    | RRMSE (%) | MAPE (%) |
|--|----------------------|---------|----------|-------|-------|------|-----------|----------|
| PS vs PFR<br>P $\rightarrow$ PS1A<br>O $\rightarrow$ PFR | 368                  | -0.011  | 0.00008  | 0.014 | 0.011 | 0.98 | 17        | 18       |
|  | 500                  | -0.010  | 0.00010  | 0.014 | 0.010 | 0.96 | 24        | 26       |
|  | 870                  | -0.008  | 0.00004  | 0.010 | 0.008 | 0.92 | 38        | 78       |
|  | AE                   | 0.3     | 0.14     | 0.5   | 0.3   | 0.43 | 35        | 17       |
| CA vs PFR<br>P $\rightarrow$ CA<br>O $\rightarrow$ PFR   | 368                  | -0.007  | 0.00003  | 0.009 | 0.007 | 0.99 | 12        | 13       |
|  | 500                  | -0.004  | 0.00003  | 0.006 | 0.004 | 0.99 | 12        | 11       |
|  | 870                  | -0.0013 | 0.000015 | 0.004 | 0.002 | 0.98 | 18        | 14       |
|  | AE                   | 0.003   | 0.03     | 0.17  | 0.12  | 0.75 | 11        | 8        |
| CA vs SP1A<br>P $\rightarrow$ CA<br>O $\rightarrow$ SP1A | 381                  | 0.005   | 0.00003  | 0.007 | 0.006 | 0.99 | 11        | 9        |
|  | 500                  | 0.006   | 0.000016 | 0.007 | 0.006 | 0.99 | 15        | 13       |
|  | 870                  | 0.006   | 0.000010 | 0.007 | 0.006 | 0.94 | 41        | 33       |
|  | AE                   | -0.40   | 0.19     | 0.59  | 0.4   | 0.54 | 32        | 28       |

El número de datos utilizados en el estudio es elevado, por lo que los valores obtenidos son representativos. Se aprecian por lo general desviaciones estándar de P y O grandes al comparar con los valores medios de estas variables, y con pendientes de las rectas de regresión que rondan la unidad en el caso de los valores de AOD, mientras que difieren mucho de la unidad en el caso del AE. El  $r^2$  es cercano al 0.95 en la mayoría de los casos del AOD e incluso superior, mientras que el AE presenta valores del  $r^2$  bastante bajos cercanos al 0.3, lo que implica que no existe mucha correlación entre los dos instrumentos comparados.

El MBE es negativo en las dos primeras comparaciones lo que implica que el instrumento comparado con el de referencia sobrestima sus valores de AOD mientras que, en la última comparación, el CIMEL AWIPEV-SP1A subestima los valores de AOD. En el caso de los valores de AE ocurre el fenómeno contrario, es decir, en las dos primeras comparaciones se subestiman los valores respecto al de referencia, y en el último se sobrestima.

Las diferencias entre el MAE y el RMSE se deben especialmente a la ponderación de cada  $(P_i - O_i)$  por su cuadrado lo que genera valores más elevados de RMSE al haber valores extremos presentes. Aunque los valores del RMSE son mayores a los del MAE, las diferencias no son importantes a excepción de los valores de AE entre el PFR-SP1A y el CIMEL AWIPEV-SP1A.

El índice de correlación (d) es elevado en la mayor parte de los valores de AOD, mientras que es más bajo en el caso de los valores de AE. Al analizar los valores de RRMSE se observan errores porcentuales no muy elevados, indicando una aceptable precisión del RSME, a excepción de algunos valores puntuales del AOD y AE, posiblemente por la existencia de valores extremos. La precisión del modelo se considera excelente si el valor de RRSME < 10%,

buena si  $<20\%$ , regular si  $20\%-30\%$  y pobre si  $>30\%$ . En el caso del MAPE si los porcentajes son  $<10\%$  la precisión es muy buena,  $10\%-20\%$  la precisión es buena,  $20\%-50\%$  la precisión es regular y si son  $>50\%$  la precisión es mala. Como en la mayoría de los casos estudiados los valores del MAPE  $<20\%$ , es decir, que en promedio los valores se alejan menos del  $20\%$  de los del instrumento de referencia (Despotovic et al., 2016).

Se ha utilizado para calcular el valor de la masa óptica la fórmula empírica de Kasten and Young (1.3). Para la obtención del ángulo cenital ( $\theta$ ) se han utilizado los valores de la latitud y longitud de Ny-Ålesund ( $78.923^{\circ}\text{N}$   $11.9208^{\circ}\text{E}$ ), del día y la hora para cada valor, ya que este ángulo depende del ángulo horario y de la declinación solar.

Se obtuvieron un total de 41536 pares de puntos entre 2017 y 2018 para la comparación entre el PFR y el SP1A, que se puede ver representado en la Figura 15. Se aprecia que las diferencias de AOD se encuentran la mitad de los valores dentro de los límites de WMO U95 (WMO, 2005). Aun así, un número elevado de los valores se encuentran fuera de esos límites. Posiblemente los puntos que se encuentran muy por encima de los límites WMO U95 puedan ser atribuidos a puntos contaminados por nubosidad. Esto se debe a que no se usan los mismos métodos de detección de nubes en ambos instrumentos por lo que el cloud-screening, en particular del SP1A, puede estar dando resultados erróneos. Se aprecia claramente una sobrestimación de los valores de AOD del PFR respecto al SP1A, disminuyendo las diferencias para el valor de AOD a  $870\text{ nm}$ , encontrándose las diferencias entre  $0$  y  $0.05$ . En cambio, el AE presenta una dispersión muy grande encontrándose la mayor parte de los valores fuera de los límites de WMO U95, encontrándose la mayor parte de las diferencias entre  $-0.1$  y  $-0.02$ . Los valores de la masa óptica se reparten entre  $2$  y  $8$  en los valores de AOD, mientras que el AE se concentra en especial entre  $3$  y  $6$ .

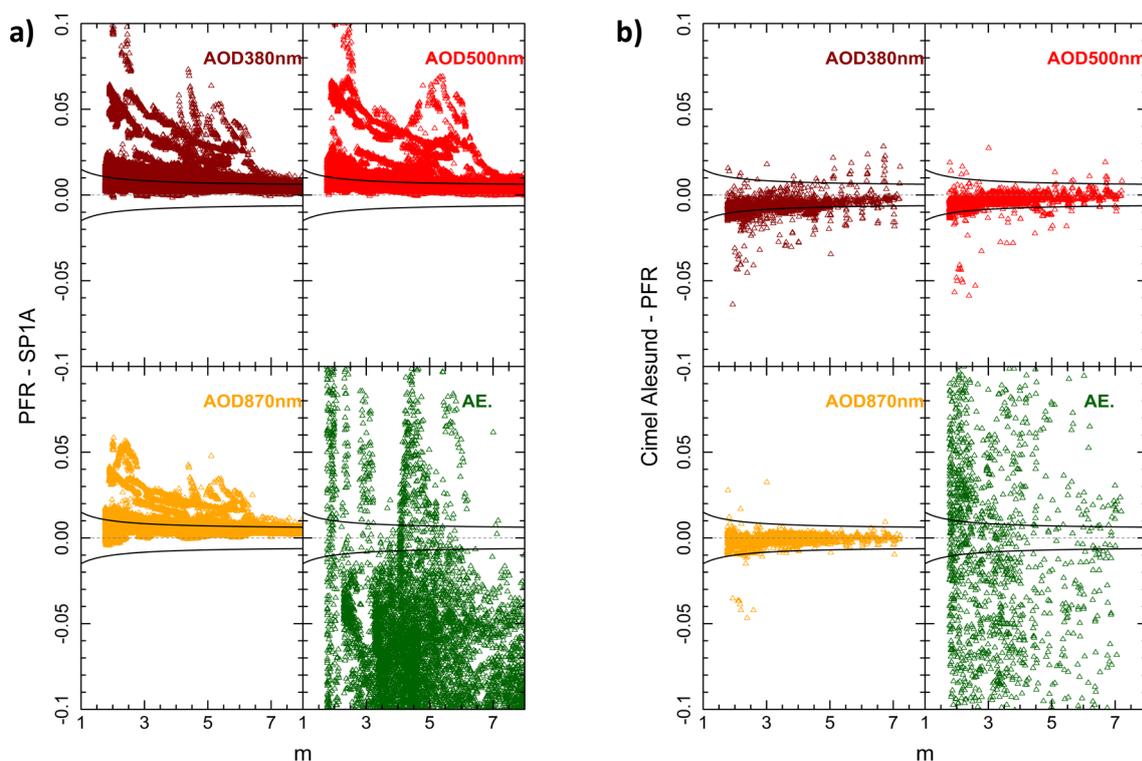


Figura 15. Diferencias de AOD (a) entre PFR y Sp1A y (b) entre CIMEL y PFR en Ny-Ålesund versus masa óptica en el período 2017-2018. Las líneas continuas indican los límites U95.

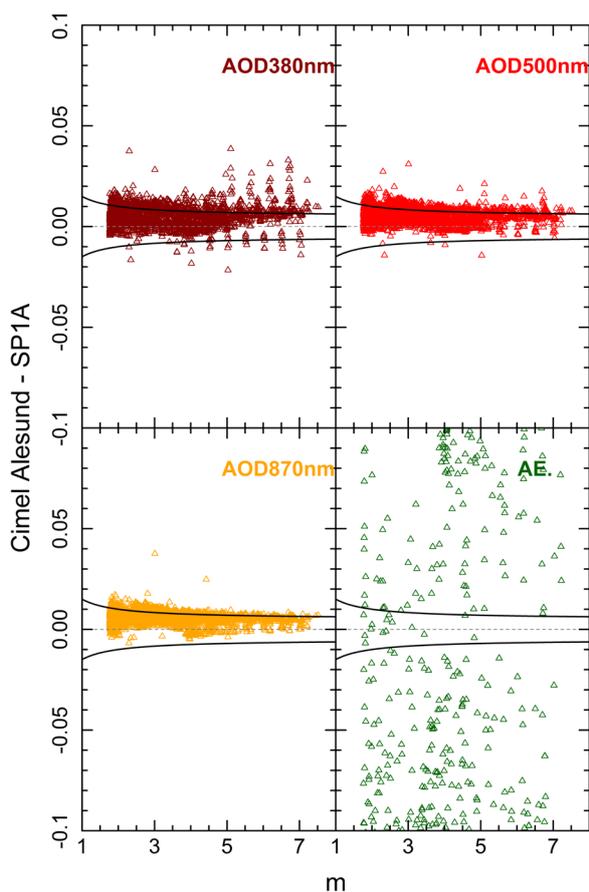


Figura 16. Diferencias de AOD entre CIMEL y SP1A en Ny-Ålesund versus masa óptica en el período 2017-2018. Las líneas continuas indican los límites U95.

una pequeña subestimación del SP1A respecto del CIMEL. En cambio, el AE presenta una dispersión muy grande, las diferencias se reparten tanto para valores positivos como negativos, aunque con un mayor número de valores negativos.

### 3.2. Comparación en distintas localizaciones

En este apartado se va a comparar el mismo instrumento, CIMEL, en diferentes localizaciones dentro de la península de Svalbard, es decir, comparamos los datos en Ny-Ålesund frente a los de Hornsund. Estas localizaciones en línea recta están aproximadamente a unos 230 km por lo que los resultados no deberían diferir en exceso.

Se toman los datos válidos desde finales de julio del 2017 hasta finales de agosto del 2020. En la siguiente tabla se muestran las fechas de inicio y fin, así como el número de datos válidos de cada instrumento.

Se obtuvieron un total de 2147 pares de puntos entre 2017 y 2018 para la comparación entre el CIMEL y el PFR, que se puede ver representado en la Figura 15. Los valores de las diferencias de AOD están dentro de los límites de WMO U95. Se aprecia una pequeña sobreestimación del PFR respecto del CIMEL, encontrándose prácticamente todos los valores dentro de los límites WMO U95 en el caso del AOD a 870 nm. En cambio, el AE presenta una dispersión muy grande encontrándose la mayor parte de los valores fuera de los límites de WMO U95, las diferencias se reparten tanto para valores positivos como negativos, por lo que no se aprecia una tendencia clara de sobreestimación o subestimación de un instrumento respecto de otro. Los valores de la masa óptica se reparten entre 1.5 y 7 tanto en los valores de AOD como de AE.

Se obtuvieron un total de 2607 pares de puntos entre 2017 y 2018 para la comparación entre el CIMEL y el SP1A, que se puede ver representado en la Figura 16. La mayor parte de los valores de las diferencias de AOD están dentro de los límites de WMO U95. Existe

Tabla 5. Intervalos de estudio de los distintos fotómetros utilizados.

| Instrumento | CIMEL AWIPEV | CIMEL Hornsund |
|-------------|--------------|----------------|
| Nº de datos | 3305         | 2280           |
| Inicio      | 01/06/2017   | 22/07/2017     |
| Fin         | 25/09/2020   | 04/10/2020     |

Se observa una diferencia de unos mil datos entre una localización y otra, teniendo más datos en la estación de AWIPEV. Como no hay muchos datos entre esas fechas y que concuerden entre ambas localizaciones para poder compararlas, se ha utilizado un intervalo temporal mayor que en el anterior apartado.

En primer lugar, se observa la evolución temporal tanto del AOD y del AE en ambas estaciones.

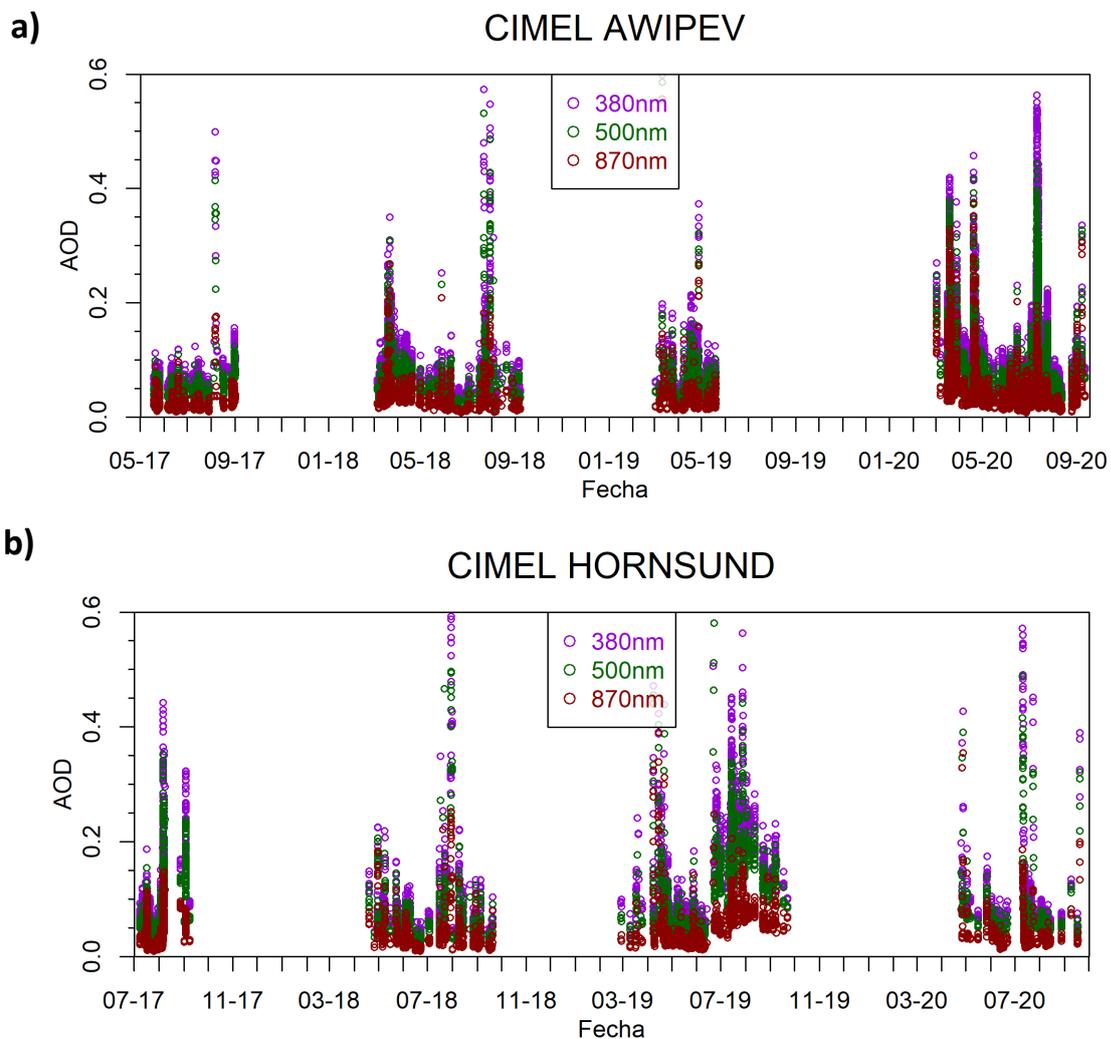


Figura 17. Evolución temporal del AOD obtenido por el CIMEL en Ny-Ålesund y en Hornsund.

Existe claramente una diferencia entre las longitudes de onda estudiadas, mientras la de 380 nm presenta valores de AOD entre un rango amplio entre 0.05 y 0.6, la de 870 nm presenta

valores menores que los de longitudes de onda más cortas y en un rango aproximado de 0-0.4. Si comparamos los periodos en los que ambos instrumentos presentan valores, el CIMEL de Hornsund está activo más meses del año que el CIMEL de AWIPEV, pero tiene un número menor de datos para analizar. Solo se pueden realizar comparaciones en los periodos en los que ambos aparatos funcionen al mismo tiempo.

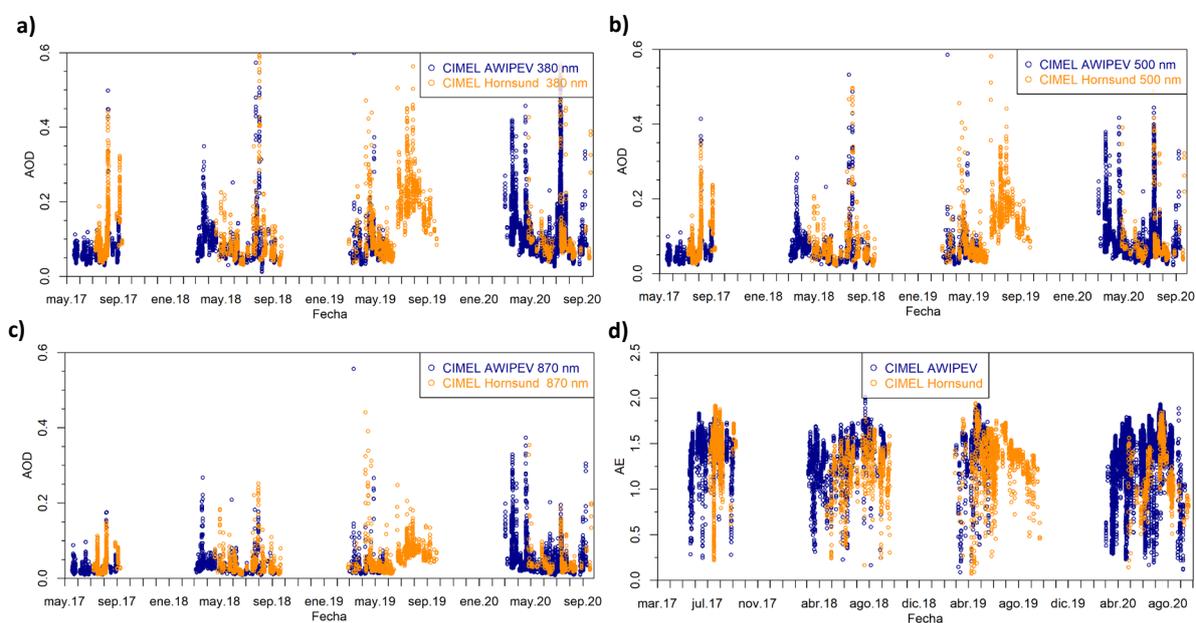


Figura 18. (a), (b) y (c) Evolución temporal del AOD en 380 nm, 500 nm y 870 nm, respectivamente para los fotómetros CIMEL. (d) Evolución temporal del AE en las estaciones de Ny-Ålesund y Hornsund.

En la Figura 18, se muestra una comparativa entre los valores de AOD entre las dos estaciones para las diferentes longitudes de onda y una comparación del exponente de Ångström. Como se ha comentado anteriormente se puede observar con mayor claridad los periodos de estudio, es decir, aquellos en los que hay datos de ambas localizaciones simultáneamente.

Al comparar los valores de AOD para cada longitud de onda en cada localización se observa una gran dispersión de los datos, pero existen mayores valores de AOD en Hornsund que en Ny-Ålesund. Sin embargo, en el caso del exponente de Ångström los valores son mayores en la estación de Ny-Ålesund.

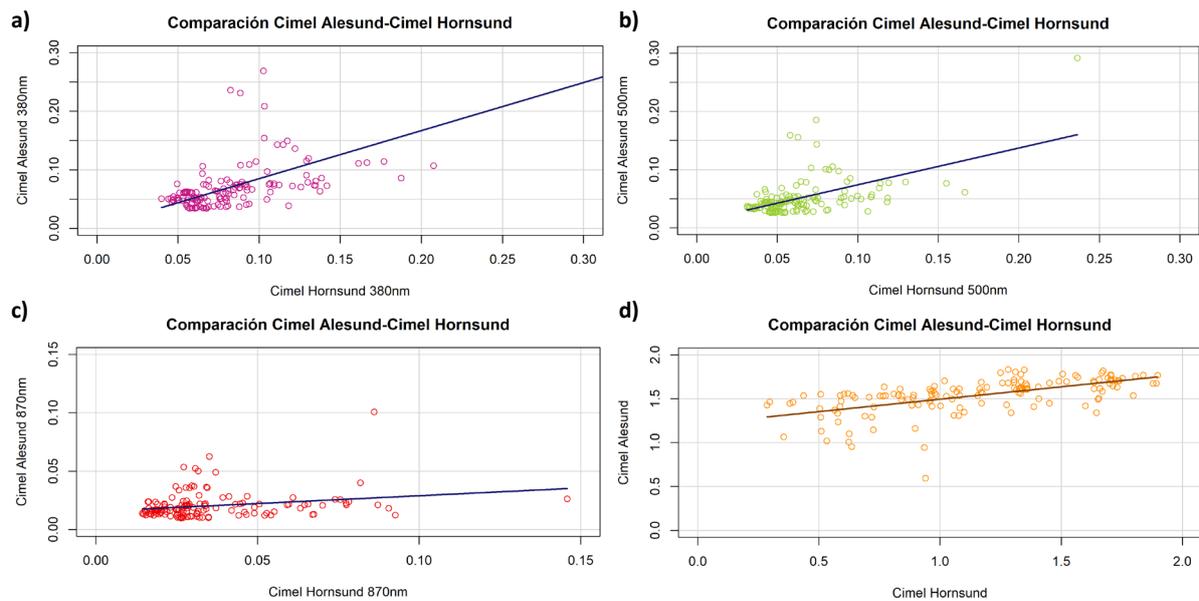


Figura 19. Comparación de los fotómetros CIMEL entre Ny-Ålesund y Hornsund. Comparativa del AOD para (a) 380 nm, (b) 500 nm y (c) 870 nm. (d) Comparativa del AE.

Si analizamos las diferencias entre ambas localizaciones se puede observar cómo la mayor parte de los valores de AOD en Hornsund superan a los de Ny-Ålesund para todas las longitudes de onda. En el histograma, las medias de las diferencias se encuentran en valores negativos lo que implica que en la estación de Hornsund se obtienen valores más altos de AOD. A penas existe diferencia entre las tres longitudes de onda analizadas en cuanto a la media de las diferencias, pero si se aprecia que la curva de distribución presenta mayor aglutinamiento de los datos alrededor de la media en el caso de los 870 nm.

Si analizamos el exponente de Ångström, los valores en Ny-Ålesund son mayores a los obtenidos en Hornsund, siendo las diferencias más importantes en los años 2017 y 2020. El histograma realizado a las diferencias del AE (ver figura 21) presenta frecuencias más altas para diferencias positivas, lo que concuerda con lo analizado en el gráfico anterior.

Como en estas medidas existen pocos datos en relación con el número de datos analizados en el apartado anterior entre los diferentes instrumentos, no se puede analizar con claridad las diferencias entre los diferentes meses del año ya que solo hay datos en unos intervalos muy pequeños entre los meses de junio y agosto.

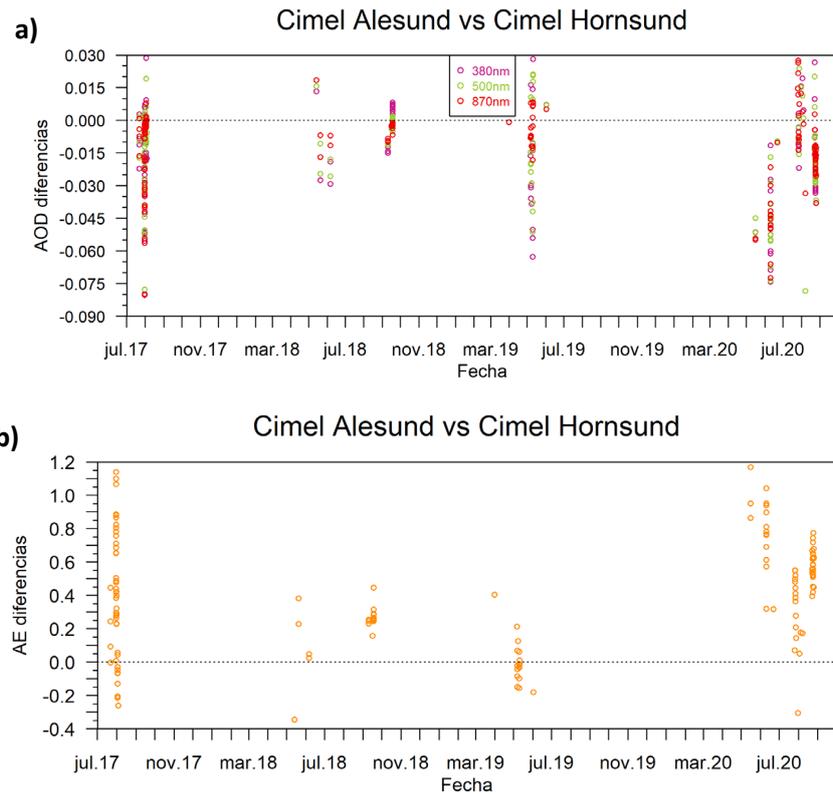


Figura 20. Diferencias de AOD en la gráfica superior, (a), y del AE en la gráfica inferior, (b), respecto los meses de estudio.

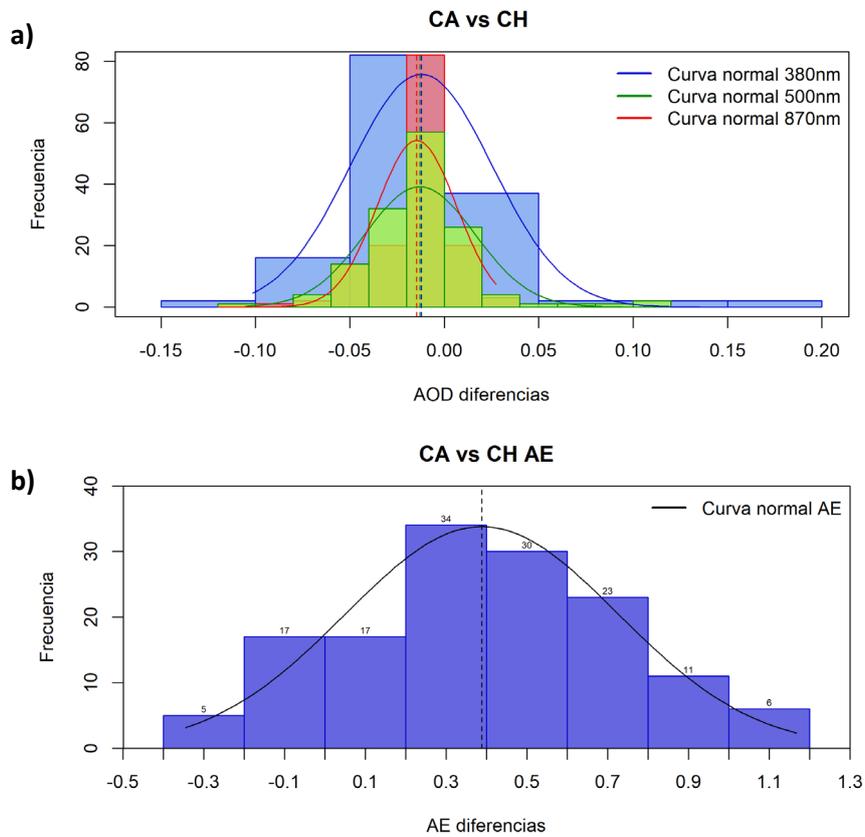


Figura 21. Histogramas de las frecuencias de las diferencias de AOD en (a) y de AE en (b) entre los fotómetros CIMEL entre Ny-Ålesund y Hornsund.

En el apartado anterior se han explicado tanto el significado de los índices que aparecen en las tablas como la interpretación de alguno de sus valores, por lo que solo evaluaremos los valores de la comparación de ambas localizaciones.

En número de datos en este caso es pequeño 143 respecto a los obtenidos en el apartado anterior entre los diferentes fotómetros, pero es suficiente para determinar los diferentes parámetros estadísticos y estudiar sus diferencias. Las desviaciones estándar de P y O grandes comparadas con los valores medios de estas variables, y con pendientes de las rectas de regresión no muy similares pero que difieren bastante de la unidad especialmente para los valores del AE. El  $r^2$  es muy bajo indicando que no existe mucha correlación entre las dos localizaciones comparadas.

El MBE es negativo lo que implica que en Hornsund los valores de AOD son mayores que en Ny-Ålesund. En el caso de los valores de AE son superiores en Ny-Ålesund que en Hornsund. Las diferencias entre el MAE y el RMSE se deben especialmente a la ponderación de cada  $(P_i - O_i)$  por su cuadrado lo que genera valores más elevados de RMSE al haber valores extremos presentes. Aunque los valores del RMSE son mayores a los del MAE, las diferencias no son importantes.

El índice de correlación (d) es superior al 50% por lo que existe correlación, aunque no muy buena, en los valores de AOD y en el AE. Al analizar los valores de RRMSE se observan errores porcentuales bastante elevados ( $>50\%$ ), indicando una pobre precisión del RSME, posiblemente por la existencia de valores extremos. En el caso del MAPE los valores obtenidos se acercan al 50% o incluso lo superan por lo que los datos del AOD en las diferentes localizaciones son bastante diferentes. Mientras que el AE presenta un MAPE de aproximadamente un 30% por lo que su precisión es regular.

Tabla 6. Medidas cuantitativas entre los fotómetros cada ubicación y de las diferencias entre las dos localizaciones de los fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.

|  | $\lambda(\text{nm})$ | N   | $\bar{P}$ | $\bar{O}$ | $s_p$ | $s_o$ | a      | b    | $r^2$ |
|--|----------------------|-----|-----------|-----------|-------|-------|--------|------|-------|
| CA vs CH<br>P $\rightarrow$ CA<br>O $\rightarrow$ CH | 380                  | 143 | 0.07      | 0.08      | 0.05  | 0.04  | 0.0029 | 0.82 | 0.41  |
|  | 500                  | 143 | 0.05      | 0.06      | 0.03  | 0.03  | 0.010  | 0.63 | 0.30  |
|  | 870                  | 143 | 0.02      | 0.03      | 0.011 | 0.02  | 0.016  | 0.13 | 0.050 |
|  | AE                   | 143 | 1.5       | 1.1       | 0.2   | 0.4   | 1.21   | 0.28 | 0.35  |

Tabla 7. Medidas cuantitativas de las diferencias entre las dos localizaciones de los fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.

|                              | $\lambda(\text{nm})$ | MBE    | $s_a^2$ | RMSE | MAE   | d    | RRMSE (%) | MAPE (%) |
|------------------------------|----------------------|--------|---------|------|-------|------|-----------|----------|
| CA vs CH<br>P → CA<br>O → CH | 380                  | -0.012 | 0.0014  | 0.04 | 0.03  | 0.76 | 47        | 42       |
|                              | 500                  | -0.013 | 0.0008  | 0.03 | 0.02  | 0.70 | 50        | 49       |
|                              | 870                  | -0.015 | 0.0004  | 0.03 | 0.017 | 0.49 | 73        | 101      |
|                              | AE                   | 0.4    | 0.11    | 0.5  | 0.4   | 0.59 | 45        | 29       |

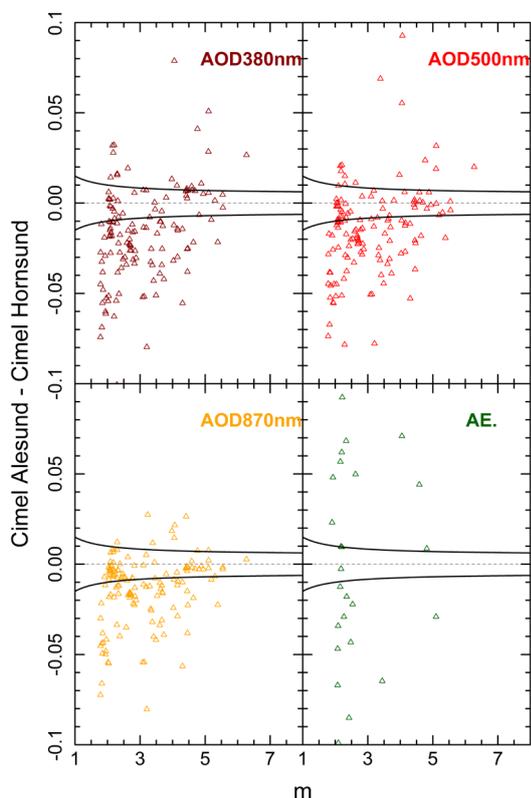


Figura 22. Diferencias de AOD entre fotómetros CIMEL en Hornsund y Ny-Ålesund versus masa óptica en el período 2017-2020. Las líneas continuas indican los límites U95.

Se ha utilizado para calcular el valor de la masa óptica la fórmula empírica de Kasten and Young (1.3). El ángulo cenital depende de la latitud y longitud de Ny-Ålesund ( $78.923^\circ\text{N}$ ,  $11.9208^\circ\text{E}$ ), del día y la hora para cada valor. No existe apenas diferencia entre calcular la masa óptica con las coordenadas de Ny-Ålesund o Hornsund, porque es pequeña la variación.

Se obtuvieron un total de 143 pares de puntos entre 2017 y 2020 y se pueden observar en la Figura 22 los resultados de las diferencias de AOD y AE entre las diferentes localizaciones en relación con la masa óptica ( $m$ ). Los valores de AOD, en general, son superiores en Hornsund como se aprecia en la gráfica ya que las diferencias son negativas. Una gran parte de las diferencias se encuentran dentro de los límites de WMO U95 a pesar de la distancia entre ambos sitios. Sin embargo, existen muchos datos que miden diferentes condiciones de aerosol entre ambas localizaciones. Se aprecia que los datos estudiados se encuentran entre 1.5 y 5 de valor de masa óptica.

### 3.3. Tendencias

A continuación, se muestra un gráfico con la media de cada año desde el 2002 hasta el 2020 de cada fotómetro analizado y con las barras de error que representan la desviación estándar de los datos de cada año. Las medias de los valores anuales únicamente vienen reflejados los valores obtenidos en los meses con luz solar, es decir, desde aproximadamente mayo hasta agosto.

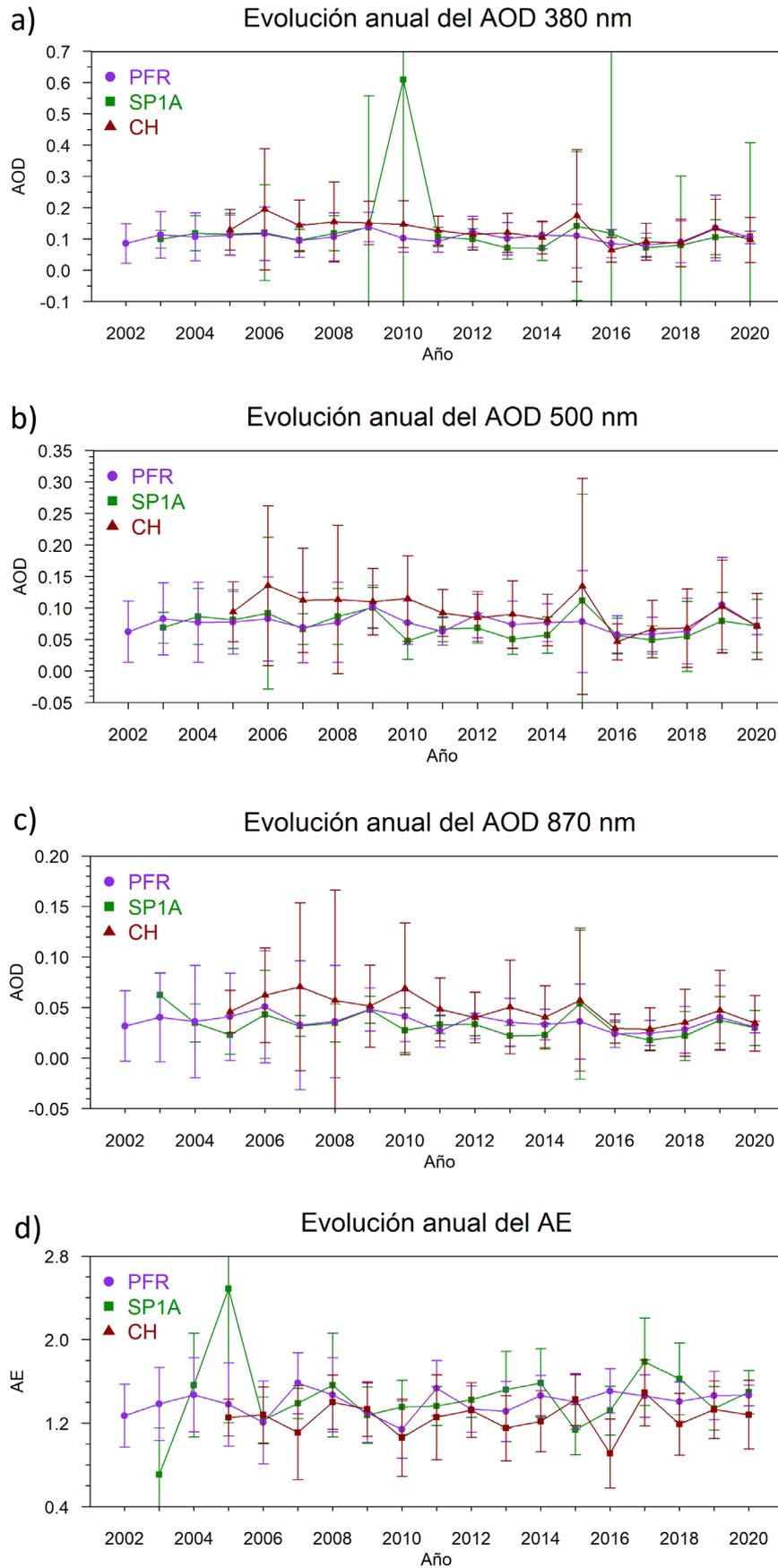


Figura 23. Evolución anual del AOD para (a) 380 nm, (b) 500 nm y (c) 870 nm. La gráfica (d) representa la evolución anual del exponente de Ångström. Las barras indican la desviación estándar de la media anual.

En la Figura 23 se aprecia como algunos años la desviación estándar es muy superior a otros, además los puntos que presentan una desviación estándar elevada son aquellos en los que la media anual difiere en exceso con los valores de años anteriores y posteriores. En la evolución anual del AOD de 380 nm el fotómetro SP1A presenta un valor muy por encima del resto de años con una desviación estándar excesivamente grande, por lo que ese valor no es válido. Ocurre lo mismo con este mismo instrumento en medida del AE, pero en un año diferente al valor erróneo del AOD. Tanto el PFR como el CIMEL AWIPEV presentan desviaciones menores que el resto de fotómetros para los diferentes parámetros estudiados.

Para el cálculo de las tendencias de los parámetros AOD y AE, se ha utilizado el método de Yue y Pilon (Yue Pilon, 2002) donde las pendientes se estiman utilizando el enfoque de Theil-Sen (Sen, 1968). Este método utiliza el procedimiento de preblanqueo sin tendencia (TFPW). Posteriormente, se utiliza la prueba de Mann-Kendall en las series mezcladas de tendencia y residuos para la evaluación del nivel de significación de la tendencia. Se ha utilizado una variación del método de Yue y Pilon que empíricamente proporciona mejores resultados. Esta diferencia consiste en que los valores utilizados para calcular la significación se vuelven a inflar dividiéndolos por  $(1 - AR(1))$ , donde  $AR(1)$  es un modelo autorregresivo cuyo valor de la serie en el momento  $t$  solo depende de la observación previa (Bronaugh, 2019).

El test de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica, es decir, que es válida para todas las distribuciones, pero sus datos no deben tener correlación serial. Se puede utilizar para pocos datos, sin embargo, esto hace que la prueba tenga una alta probabilidad de no encontrar una tendencia. La hipótesis nula es que no hay tendencia en los datos, mientras que la alternativa es que los datos presentan una tendencia. Si el p-valor de la prueba es inferior al nivel de significación, en este caso 0,05, demuestra que existe una tendencia en los datos de la serie temporal (Buhairi, 2010).

Tanto el método de Yue y Pilon como el test de Mann-Kendall se llevaron a cabo dentro del software estadístico R mediante el paquete de funciones “zyp” (<http://cran.r-project.org/package=zyp>).

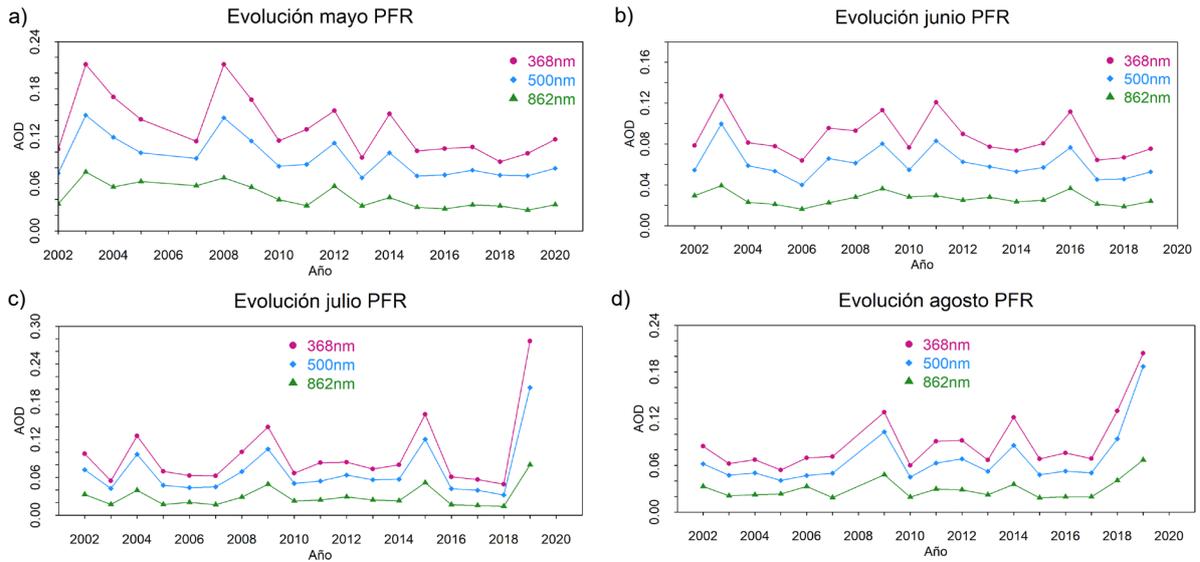


Figura 24. Evolución mensual del AOD obtenido por el PFR en los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto.

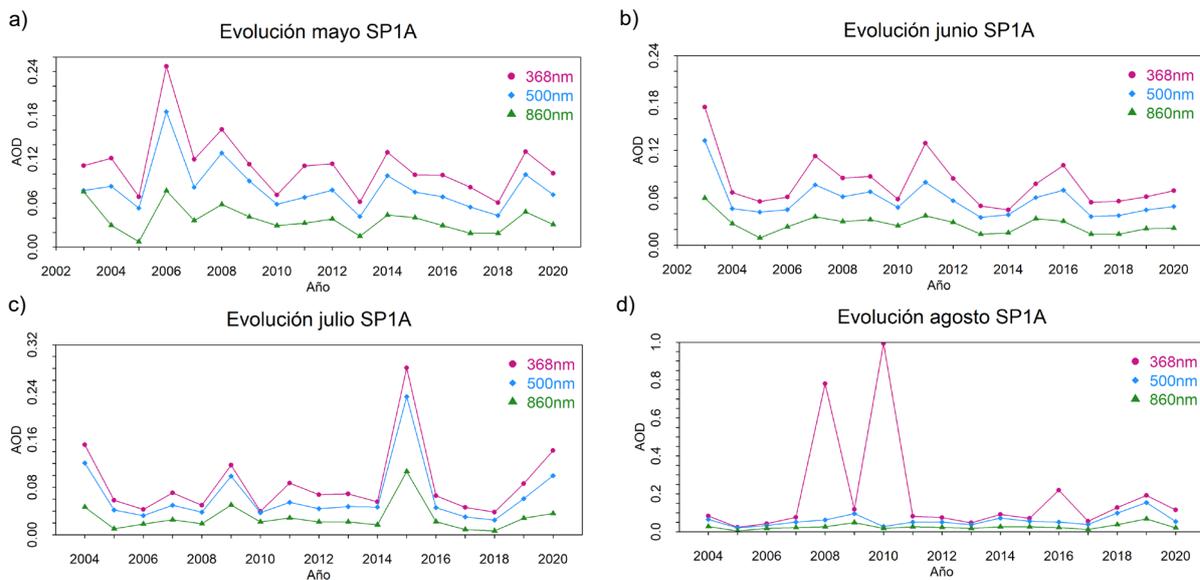


Figura 25. Evolución mensual del AOD obtenido por el SP1A en los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto.

Una vez realizado el análisis de tendencias anuales y mensuales, se han obtenido los siguientes estadísticos: tendencia, p-value e intervalo de confianza de 95%. En la Tabla 8 se observan los estadísticos de la evolución anual para cada instrumento estudiado, mientras que en las tablas 8, 9, 10, 11 y 12 se encuentran los estadísticos de la evolución por meses.

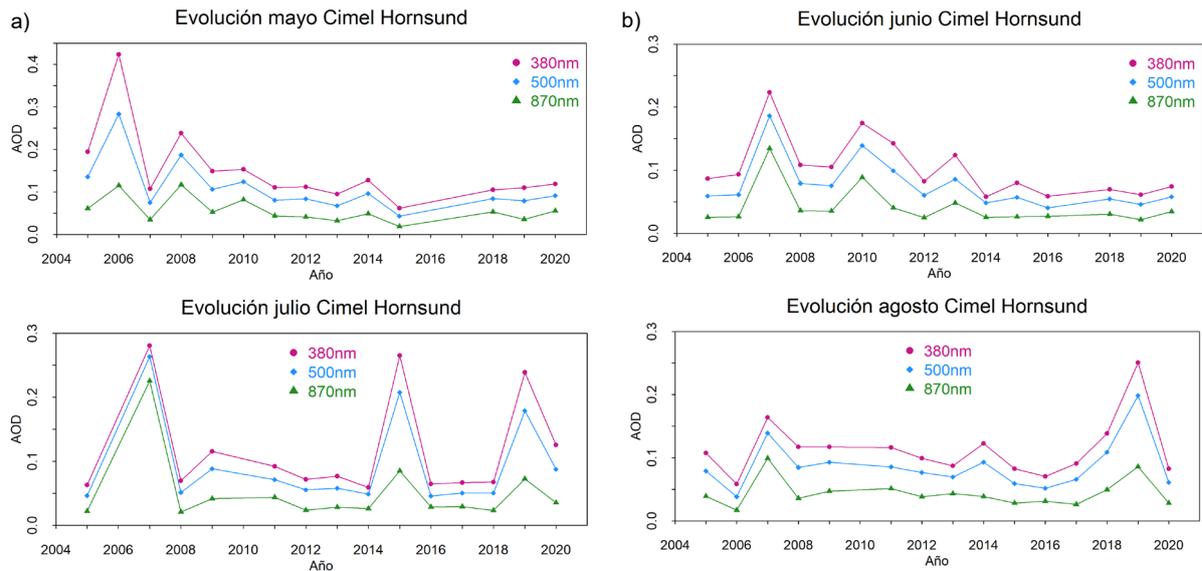


Figura 26. Evolución mensual del AOD obtenido por el CIMEL en Hornsund en los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto.

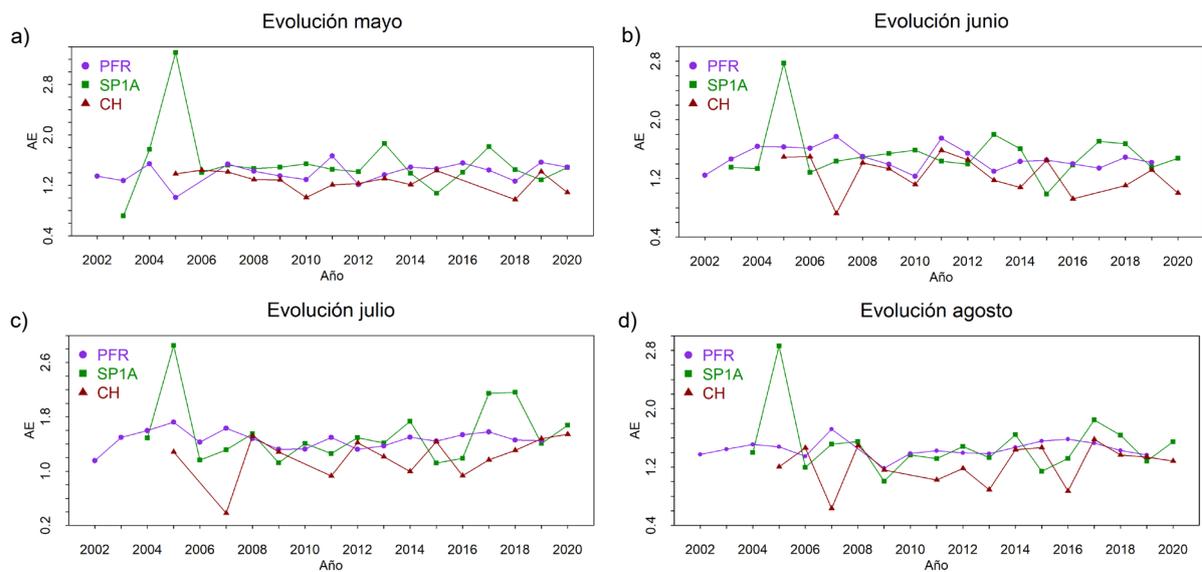


Figura 27. Evolución del AE de los diferentes fotómetros representados en colores distintos para los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto.

Se aprecia cómo en todas las gráficas de los distintos instrumentos, salvo picos puntuales, los valores de AOD del mes de mayo son superiores al resto de los meses. Si comparamos las gráficas de los diferentes instrumentos existen picos en todos los instrumentos de medida de AOD que reflejan medias mayores que el resto de los años, compatibles con posibles sucesos ocurridos que provoquen un aumento del AOD. Los picos notables en mayo son en 2006, 2008 y 2014. Los picos más notables en junio son en 2003, 2007, 2011 y 2016, estos últimos no se observa en el CIMEL situado en Hornsund. Los picos más notables en julio se dan en 2004, 2009, 2015 y 2019. En el caso de agosto, los picos mayores se dan en 2014 y 2019.

Los picos observados de AOD repetidos en todos los instrumentos utilizados se deben a sucesos reales que produjeron el aumento del AOD, no a errores instrumentales o de medida. No se ha realizado el estudio del CIMEL AWIPEV ya que solo tenemos medidas de cuatro años, lo cual es un periodo muy corto de tiempo para ver la evolución anual del AOD o del AE.

Se aprecia un pico de AE en 2005 para todos los meses únicamente el PFR, esto puede ser por un error en las medidas de ese año. El resto de los instrumentos presentan fluctuaciones unos respecto de los otros, siendo el mes de mayo en el que menos diferencias existen entre las medias anuales. Los valores con los que se han realizado los gráficos pertenecientes a las figuras 23, 24, 25, 26 y 27, junto con la desviación estándar y el número de datos válidos para cada medida se encuentran en el Anexo I.

Tabla 8. Valores de tendencia anuales de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el p-valor < 0.05.

| Variable    | tendencia (AOD-unidad/año) | p-value | IntervaloConfianza95% |
|-------------|----------------------------|---------|-----------------------|
| PFR 368 nm  | -0.00037                   | 0.23    | [-0.0019,0.0014]      |
| PFR 500 nm  | -0.00040                   | 0.20    | [-0.0014,0.00093]     |
| PFR 862 nm  | -0.00055                   | 0.023   | [-0.0013,0.00015]     |
| PFR AE      | 0.0051                     | 0.32    | [-0.0046,0.017]       |
| SP1A 381 nm | -0.0011                    | 0.30    | [-0.0035,0.00096]     |
| SP1A 500 nm | -0.0011                    | 0.13    | [-0.0028,0.00091]     |
| SP1A 860 nm | -0.00094                   | 0.13    | [-0.0019,0.00019]     |
| SP1A AE     | 0.0094                     | 0.84    | [-0.012,0.040]        |
| CH 380 nm   | -0.0047                    | 0.0011  | [-0.0080,-0.0022]     |
| CH 500 nm   | -0.0036                    | 0.0022  | [-0.0056,-0.00092]    |
| CH 870 nm   | -0.0019                    | 0.0022  | [-0.0032,-0.00062]    |
| CH AE       | 0.0031                     | 0.43    | [-0.018,0.020]        |

Al analizar los valores de tendencia anual obtenidos se aprecian tendencias muy pequeñas, negativas en el caso del AOD para el PFR, el SP1A y el CIMEL de Hornsund. Sin embargo, teniendo en cuenta que la tendencia será significativa si el p-valor < 0,05 solo las tendencias de AOD del CIMEL de Hornsund y la del AOD a 862 nm del PFR son estadísticamente significativas. La tendencia negativa en estos casos indica que existe una disminución muy ligera del AOD a lo largo de los años, pero esta no es muy notable ya que no con todos los instrumentos es apreciable.

En cuanto al exponente de Ångström, no existe ninguna tendencia estadísticamente significativa, pero en todos los casos los valores obtenidos de tendencia son positivos, es decir, que existiría una tendencia creciente a valores de AE, indicando una mayor presencia de partículas finas. Una causa detrás de este hecho puede atribuirse al aumento de eventos de transporte de quema de biomasa desde Canadá y Rusia hacia la zona ártica europea.

Tabla 9. Valores de tendencia en mayo de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el p-valor<0.05.

| Variable    | Tendencia (AOD-unidad/año) | p-value  | IntervaloConfianza95% |
|-------------|----------------------------|----------|-----------------------|
| PFR 368 nm  | -0.0037                    | 0.00025  | [-0.0073,-0.00083]    |
| PFR 500 nm  | -0.0026                    | 0.000091 | [-0.0049,-0.00059]    |
| PFR 862 nm  | -0.0022                    | 0.000010 | [-0.0032,-0.00077]    |
| PFR AE      | 0.0089                     | 0.053    | [-0.0077,0.021]       |
| SP1A 381 nm | -0.0015                    | 0.11     | [-0.0052,0.00062]     |
| SP1A 500 nm | -0.00092                   | 0.15     | [-0.0045,0.0011]      |
| SP1A 860 nm | -0.00096                   | 0.15     | [-0.0035,0.00081]     |
| SP1A AE     | -0.0089                    | 0.036    | [-0.028,0.015]        |
| CH 380 nm   | -0.0077                    | 0.0019   | [-0.017,-0.00039]     |
| CH 500 nm   | -0.0060                    | 0.0012   | [-0.013,-0.00024]     |
| CH 870 nm   | -0.0029                    | 0.0060   | [-0.0072,0.00088]     |
| CH AE       | -0.019                     | 0.20     | [-0.035,0.0032]       |

Tabla 10. Valores de tendencia en junio de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el p-valor<0.05.

| Variable    | Tendencia (AOD-unidad/año) | p-value | IntervaloConfianza95% |
|-------------|----------------------------|---------|-----------------------|
| PFR 368 nm  | -0.00078                   | 0.13    | [-0.0031,0.00035]     |
| PFR 500 nm  | -0.00062                   | 0.077   | [-0.0021,0.00046]     |
| PFR 862 nm  | -0.00022                   | 0.84    | [-0.00096,0.00030]    |
| PFR AE      | -0.010                     | 0.091   | [-0.023,0.0098]       |
| SP1A 381 nm | -0.0013                    | 0.59    | [-0.0051,0.0011]      |
| SP1A 500 nm | -0.00083                   | 0.39    | [-0.0037,0.00049]     |
| SP1A 860 nm | -0.00084                   | 0.43    | [-0.0020,0.00035]     |
| SP1A AE     | 0.0053                     | 0.90    | [-0.022,0.024]        |
| CH 380 nm   | -0.0041                    | 0.0086  | [-0.012,-0.00088]     |
| CH 500 nm   | -0.0027                    | 0.012   | [-0.0076,-0.00027]    |
| CH 870 nm   | -0.00039                   | 0.080   | [-0.0027,0.00066]     |
| CH AE       | -0.029                     | 0.19    | [-0.051,0.0051]       |

Tabla 11. Valores de tendencia en julio de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el p-valor<0.05.

| Variable    | Tendencia (AOD-unidad/año) | p-value | IntervaloConfianza95% |
|-------------|----------------------------|---------|-----------------------|
| PFR 368 nm  | -0.00022                   | 0.97    | [-0.0040,0.0033]      |
| PFR 500 nm  | -0.00018                   | 1       | [-0.0025,0.0021]      |
| PFR 862 nm  | -0.00011                   | 0.97    | [-0.0012,0.0013]      |
| PFR AE      | 0.0014                     | 0.54    | [-0.012,0.016]        |
| SP1A 381 nm | -0.00013                   | 0.50    | [-0.0044,0.0042]      |
| SP1A 500 nm | 0.00019                    | 0.50    | [-0.0028,0.0023]      |
| SP1A 860 nm | 0.000006                   | 0.50    | [-0.0019,0.0011]      |
| SP1A AE     | 0.017                      | 0.34    | [-0.025,0.061]        |
| CH 380 nm   | 0.00037                    | 0.43    | [-0.0060,0.0051]      |
| CH 500 nm   | -0.000079                  | 0.30    | [-0.0054,0.0040]      |
| CH 870 nm   | 0.00060                    | 0.30    | [-0.0027,0.0016]      |
| CH AE       | 0.020                      | 0.059   | [-0.017,0.078]        |

Tabla 12. Valores de tendencia en agosto de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el p-valor<0.05.

| Variable    | Tendencia (AOD-unidad/año) | p-value | IntervaloConfianza95% |
|-------------|----------------------------|---------|-----------------------|
| PFR 368 nm  | 0.0020                     | 0.027   | [0.000071,0.0060]     |
| PFR 500 nm  | 0.0012                     | 0.053   | [-0.000042,0.0044]    |
| PFR 862 nm  | 0.00019                    | 0.44    | [-0.00067,0.0015]     |
| PFR AE      | 0.0026                     | 0.69    | [-0.0085,0.016]       |
| SP1A 381 nm | 0.0031                     | 0.34    | [-0.0039,0.0089]      |
| SP1A 500 nm | 0.0016                     | 0.043   | [-0.00087,0.0054]     |
| SP1A 860 nm | 0.00030                    | 0.22    | [-0.00055,0.0019]     |
| SP1A AE     | 0.0013                     | 0.96    | [-0.029,0.033]        |
| CH 380 nm   | -0.00062                   | 0.83    | [-0.0056,0.0033]      |
| CH 500 nm   | -0.00095                   | 0.83    | [-0.0047,0.0034]      |
| CH 870 nm   | -0.00068                   | 0.38    | [-0.0026,0.0019]      |
| CH AE       | 0.011                      | 0.19    | [-0.026,0.051]        |

Analizando las tablas de tendencias mensuales se puede apreciar que el único mes en el que se pueden apreciar tendencias significativas estadísticamente es el mes de mayo, en el resto de meses existen algunos instrumentos con tendencias significativas, pero a penas solo de alguna longitud de onda del AOD. En julio no se observa ninguna tendencia significativa para ningún fotómetro.

Las tendencias de mayo para el AOD son negativas y muy pequeñas, pero lo que indica es que tanto en el PFR como en el CIMEL de Hornsund se obtienen valores ligeramente menores con el paso de los años. La tendencia del exponente de Ångström del SP1A es significativa y es ligeramente negativa, los valores del AE de mayo son cada vez menores.

Kabanov (2020) realiza un estudio comparando las variaciones interanuales y estacionales del AOD en Spitsbergen entre 2002 y 2018. En ese estudio, al igual que en este, se obtiene una tendencia de disminución del AOD, sin embargo, las tendencias no son estadísticamente significativas. Como el fotómetro utilizado por Kabanov fue el SP1A en Ny-Ålesund se puede comparar el nivel de significación en ambos estudios, aunque en ambos supera el nivel de significación de 0.05, en el de Kabanov la tendencia es más significativa que en el actualmente realizado. Kabanov concluye que las oscilaciones del AOD anual en Ny-Ålesund están determinadas por los aerosoles finos, los cuales tienen un efecto importante en el comportamiento estacional del AOD. Por ese motivo, probablemente las tendencias no sean significativas debido a la variabilidad de los datos obtenidos.

## 4. Conclusiones

Hemos analizado los datos registrados por diversos fotómetros: CIMEL, SP1A y PFR en los sitios de AERONET en Ny-Ålesund para el período de 2017 a 2018 y en Hornsund período de 2017 a 2020.

Tras comparar los diferentes instrumentos dentro de la misma localización, Ny-Ålesund, se puede observar que el fotómetro que presenta valores más altos de AOD es el PFR y el que presenta valores más bajos es el SP1A. Como el CIMEL es el fotómetro de referencia se puede decir que el PFR sobreestima sus valores de AOD, mientras que el SP1A los subestima. En cambio, al comparar el AE ambos valores sobreestiman respecto del CIMEL. Existe una clara dependencia del AOD con la longitud de onda, siendo menor el valor del AOD cuanto mayor sea la longitud de onda.

La correlación del AOD entre los diferentes fotómetros es muy alta,  $>95\%$  en la mayoría de los casos, aunque la variabilidad entre los datos es elevada. El error cuadrático medio y el error absoluto medio no son muy elevados, concluyendo que los valores del fotómetro de referencia no difieren mucho respecto de los del fotómetro con el que se compara. Sin embargo, respecto al AE la correlación entre las parejas de instrumentos es pequeña, aunque los errores obtenidos son  $<35\%$  en la mayor parte de los casos.

Al comparar diferentes estaciones, Hornsund y Ny-Ålesund, se observa que los valores de AOD en Hornsund son mayores que los observados en Ny-Ålesund. Existe bastante variabilidad entre los datos lo cual queda reflejado en la Tabla 7 al analizar tanto las desviaciones estándar como los errores de las diferencias. Al realizarse el estudio con los mismos instrumentos calibrados y analizados por AERONET, se permite una comparación directa de los datos de AOD y AE en ambas localizaciones. En varios estudios anteriores como el de Pakszys y Zielinski (2017), se compara Hornsund y Ny-Ålesund en el mismo periodo, pero no con los mismos instrumentos. Este llega a la conclusión de que existe una correlación alta entre las observaciones de AOD,

pero con una variabilidad mayor y tendencia hacia valores más altos en el caso de Hornsund. En el estudio de Hansen et al. (2022) en el que se evaluaron medidas en ambos con el fotómetro CIMEL también se obtienen valores superiores en Hornsund que en Ny-Ålesund. Ambos estudios concuerdan con lo obtenido en este trabajo.

Para hacer el estudio de tendencias se han utilizado la media de los valores anuales de cada fotómetro desde 2002 hasta 2020, aunque de algunos fotómetros no tenemos tanto rango de estudio. Los valores medios anuales de AOD varían aproximadamente entre 0.01 y 0.22 en la mayor parte de los fotómetros. Los valores medios presentan una desviación estándar bastante elevada, similares en todos los instrumentos a excepción del SP1A que presenta en ciertas fechas valores de AOD muy extremos generando una desviación estándar muy grande. Se ha considerado el fotómetro CIMEL el de referencia debido a que presenta una calibración y análisis de los datos obtenidos proporcionados por la red AERONET. En los meses de julio el AOD es ligeramente superior al resto de los meses estudiados, mientras que en el AE la mayor parte de sus valores anuales se encuentran entre 0.8 y 2. La mayoría de las tendencias del AOD son negativas y no son significativas estadísticamente. El CIMEL de Hornsund es el instrumento cuyas tendencias de AOD presentan mayor significación estadística. Además, presenta mayor variabilidad de los datos respecto al resto de instrumentos, ya que los eventos llegan a ambas estaciones en momentos diferentes, lo que está relacionado con la circulación de las masas de aire y la orografía de la zona circundante.

## Bibliografía

- Ångström, A. (1961). *Techniques of Determining the Turbidity of the Atmosphere*. *Tellus*, 13(2), 214-223. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v13i2.9493>
- Bronaugh, D. y Werner, A. (2019). *Zhang + Yue-Pilon Trends Package*. <http://cran.r-project.org/package=zyp>
- Buhairi, M. (2010). Analysis of Monthly, Seasonal and Annual Air Temperature Variability and Trends in Taiz City - Republic of Yemen. *Journal of Environmental Protection*, 1(4), 401-409. <https://doi.org/10.4236/jep.2010.14046>
- d'Almeida, G. A., P. Koepke, E. P. Shettle (1991) *Atmospheric Aerosols: Global Climatology and Radiative Characteristics*. A. Deepak Publishing, 561 pp.
- Despotovic, M., Nedic, V., Despotovic, D. y Slobodan Cvetanovic, S. (2016). Evaluation of empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 246-260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.058>.
- Fernández Camacho, R. (2011). *Origen y características de las partículas finas y ultrafinas en el aire ambiente de Huelva*. [Tesis doctoral, Universidad de Huelva]. DSpace. <http://hdl.handle.net/10272/5497>
- González Catón, R. (2021). *Desarrollo de nuevos métodos de procesado de datos de redes fotométricas para el análisis de propiedades del aerosol atmosférico*. [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/46439>
- Graham, S. (17 de septiembre de 1999). *Remote Sensing*. Earth Observatory. [https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing/remote\\_08.php](https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing/remote_08.php)
- Graßl, S. y Ritter, C. (2019). Properties of Arctic Aerosol Based on Sun Photometer Long-Term Measurements in Ny-Ålesund, Svalbard. *Remote Sensing*, 11(11), 1362. <https://doi.org/10.3390/rs11111362>
- Hansen, G., Zielinski, T., Pakszys, P., Ritter, C., Gilardoni, S., Eleftheriadis, K., Kouremeti, N. Mateos, D., Herrero, S., Kazadzis, S., Mazzola, M., Stebel, K. (2022). *Re-evaluation and Homogenization of Aerosol Optical Depth Observations in Svalbard (ReHearsol)ReHearsol Final Report*. Report 03/2022. NILU. <https://www.researchgate.net/publication/358923139>
- Herber, A., Thomason, L. W., Gernandt, H., Leiterer, U., Nagel, D., Schulz, K.-H., Kaptur, J., Albrecht, T., Notholt, J. (2002). Continuous day and night aerosol optical depth observations in the Arctic between 1991 and 1999. *Journal of Geophysical Research*, 107(D10), AAC 6-1-AAC 6-13. <https://doi.org/10.1029/2001JD000536>
- Hermansen, O., Schmidbauer, N., Lunder, C., Stordal, F., Schaug, J., Braathen, O.-A., Holmèn, K. (2003). *Greenhouse gas monitoring at the Zeppelin station. Annual report 2002*. Report 879/03. NILU.

- Herrero Anta, S. (2021). *Análisis de la presencia de una pluma de aerosol mineral en el Ártico detectada mediante fotometría solar*. [Trabajo fin de máster, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/49602>
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., & Smirnov, A. (1998). AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- Kabanov, D. M., Ritter, C. y Sakerin, S. M. (2020). Interannual and seasonal variations in the aerosol optical depth of the atmosphere in two regions of Spitsbergen (2002–2018). *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 5303–5317. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5303-2020>
- Kulmala, M., Maso, M. D., Makela, J. M., Pirjola, L., Vakeva, M., Aalto, P., Miikkulainen, P., Hameri, K., O'Dowd, C. (2001). *On the formation, growth and composition of nucleation mode particles*. *Tellus B*, 53(4), 479-490. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2001.530411.x>
- Marino, D. J. G. (2011). *Estudio teórico experimental sobre respuestas biológicas a compuestos orgánicos de relevancia Ambiental*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. SEDICI. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/2744>
- Pakszys, P. y Zielinski, T. (2017). Aerosol optical properties over Svalbard: a comparison between Ny-Ålesund and Hornsund. *Oceanologia*, 59(4), 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.05.002>
- Pakszys, P., Zielinski, T., Markowicz, K., Petelski, T., Makuch, P., Lisok, J., Chilinski, M., Rozwadowska, A., Ritter, C., Neuber, R., Udusti, R., Mazzola, M. (2015). Annual Changes of Aerosol Optical Depth and Ångström Exponent over Spitsbergen. En: Zielinski, T., Weslawski, M., Kuliński, K. (eds), *Impact of Climate Changes on Marine Environments* (23–36). Springer.
- Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos World Radiation Center. (2012). *Precision Filter Radiometer*. [http://elovep.co.kr/uploaded/product/83/con1\\_a2c6014d95ce2ef85f74fdc55ebb52a00.pdf](http://elovep.co.kr/uploaded/product/83/con1_a2c6014d95ce2ef85f74fdc55ebb52a00.pdf)
- Pieter, B. (2017). Applicability of provisional NRVs to PGNPs and FCNPs. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18241.25445>
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Toledano Olmeda, C. (2005). *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación. "El Arenosillo" de la red AERONET*. [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/29641>

Toledano, C., Cachorro, V., Gausa, M., Stebel, K., Aaltonen, V., Berjon, A., Ortis, J.P., de Frutos, A.M., Bennouna, Y., Blindheim, S., Myhre, C.L., Zibordi, G., Wehrli, C., Kratzer, S., Hakanson, B., Carlund, T., de Leuw, G., Herber, A. (2012). *Overview of Sun photometer measurements of aerosol properties in Scandinavia and Svalbard*. *Atmos. Environ.* 52, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.014>

Velasco Merino, C. (2020). *Identificación de tipos de aerosol mediante medidas fotométricas. Aplicación al transporte de aerosol sahariano hasta el Caribe*. [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/46441>

Vergaz Benito, R. (2001). *Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Caracterización del área del Golfo de Cádiz*. [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. <http://goa.uva.es/wp-content/uploads/2021/03/VERGAZ-Ricardo.pdf>

Willeke, K. and Baron, P. A. (1993). *Aerosol measurement: Principles. Techniques and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)

Willmott, C. J. y Wicks, D. E. (1980). An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Physical geography*, 1(1), 59-73. <https://doi.org/10.1080/02723646.1980.10642189>

WMO. (2005). Experts workshop on a global surface-based network for long term observations of column aerosol optical properties. WMO TD No. 1287 (GAW Report No. 162), World

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. y Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16(9), 1807-1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Forzamiento radiativo del clima terrestre entre 1750 y 2011, fuente de la imagen IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013].  | 3  |
| Figura 2 Distribución esquemática del tamaño de los aerosoles, mostrando cuatro modelos y los mecanismos de formación y eliminación en la atmósfera. Las partículas del modo de acumulación pueden mostrar un carácter bimodal representado por la línea morada. Adaptación de Pieter (2017).  | 4  |
| Figura 3. Vista aérea de la localización del archipiélago Svalbard dentro del globo terráqueo. ( <a href="https://earth.google.com/web">https://earth.google.com/web</a> )   | 10 |
| Figura 4. Ubicación de las estaciones de estudio dentro del archipiélago de Svalbard. ( <a href="https://earth.google.com/web">https://earth.google.com/web</a> )  | 11 |
| Figura 5. Componentes principales de un fotómetro solar CIMEL-318. Imagen tomada de Velasco Merino (2020).   | 12 |
| Figura 6. Imagen del fotómetro PFR. Imagen tomada de PMODWRC (2012).   | 13 |
| Figura 7. Valores de AOD para tres longitudes de onda en Ny-Ålesund durante el periodo de 2017 a 2018 de (a) CIMEL AWIPEV, (b) SP1A y (c) PFR.   | 15 |
| Figura 8. Evolución temporal de los valores de AOD de los diferentes fotómetros para longitudes de onda de (a) 368-381 nm, (b) 500 nm y (c) 860-870 nm.  | 16 |
| Figura 9. Evolución temporal de los valores del exponente de Ångström de los diferentes fotómetros entre 2017 y 2018.  | 17 |
| Figura 10. Comparación para (a) 3868-380 nm, (b) 500 nm y (c) 862-870 nm del AOD de los fotómetros PFR y CIMEL. (d) Comparación del AE de los fotómetros PFR y CIMEL.  | 17 |
| Figura 11. Comparación para (a) 3868-380 nm, (b) 500 nm y (c) 862-870 nm del AOD de los fotómetros SP1A y CIMEL. (d) Comparación del AE de los fotómetros SP1A y CIMEL.  | 18 |
| Figura 12. Comparación para (a) 3868-380 nm, (b) 500 nm y (c) 862-870 nm del AOD de los fotómetros SP1A y PFR. (d) Comparación del AE de los fotómetros SP1A y PFR.  | 18 |
| Figura 13. Evolución temporal desde mayo del 2017 a octubre de 2010 de las diferencias entre los diferentes instrumentos por parejas. (a) Diferencias entre PFR y CIMEL de AOD, (b) diferencias entre PFR y CIMEL de AE, (c) diferencias entre SP1A y CIMEL de AOD, (d) diferencias entre SP1A y CIMEL de AOD, (e) diferencias entre PFR y SP1A de AOD y (f) diferencias entre PFR y SP1A de AE.   | 19 |
| Figura 14. Histogramas de las diferencias de los diferentes instrumentos por parejas con las curvas normales para cada longitud de onda. Las líneas discontinuas representan la medida de la diferencia de AOD de cada longitud de onda. Los gráficos (a) y (b) reflejan la comparación de las diferencias entre el PFR y el CIMEL, los (c) y (d) muestran la comparación de las diferencias entre el SP1A y el CIMEL y los (e) y (f) manifiestan la comparación de las diferencias entre el PFR y el SP1A. Resultados para el AOD a tres longitudes de onda: a), c), e) y para el AE: b), d), f). | 20 |
| Figura 15. Diferencias de AOD (a) entre PFR y Sp1A y (b) entre CIMEL y PFR en Ny-Ålesund versus masa óptica en el período 2017-2018. Las líneas continuas indican los límites U95.   | 24 |
| Figura 16. Diferencias de AOD entre CIMEL y SP1A en Ny-Ålesund versus masa óptica en el período 2017-2018. Las líneas continuas indican los límites U95.   | 25 |
| Figura 17. Evolución temporal del AOD obtenido por el CIMEL en Ny-Ålesund y en Hornsund.   | 26 |
| Figura 18. (a), (b) y (c) Evolución temporal del AOD en 380 nm, 500 nm y 870 nm, respectivamente para los fotómetros CIMEL. (d) Evolución temporal del AE en las estaciones de Ny-Ålesund y Hornsund.  | 27 |
| Figura 19. Comparación de los fotómetros CIMEL entre Ny-Ålesund y Hornsund. Comparativa del AOD para (a) 380 nm, (b) 500 nm y (c) 870 nm. (d) Comparativa del AE.  | 28 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20. Diferencias de AOD en la gráfica superior, (a), y del AE en la gráfica inferior, (b), respecto los meses de estudio. ....  | 29 |
| Figura 21. Histogramas de las frecuencias de las diferencias de AOD en (a) y de AE en (b) entre los fotómetros CIMEL entre Ny-Ålesund y Hornsund.....   | 29 |
| Figura 22. Diferencias de AOD entre fotómetros CIMEL en Hornsund y Ny-Ålesund versus masa óptica en el período 2017-2020. Las líneas continuas indican los límites U95.....   | 31 |
| Figura 23. Evolución anual del AOD para (a) 380 nm, (b) 500 nm y (c) 870 nm. La gráfica (d) representa la evolución anual del exponente de Ångström. Las barras indican la desviación estándar de la media anual. ....          | 32 |
| Figura 24. Evolución mensual del AOD obtenido por el PFR en los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto. ....                                      | 34 |
| Figura 25. Evolución mensual del AOD obtenido por el SP1A en los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto. ....                                     | 34 |
| Figura 26. Evolución mensual del AOD obtenido por el CIMEL en Hornsund en los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto. ....                        | 35 |
| Figura 27. Evolución del AE de los diferentes fotómetros representados en colores distintos para los meses en los que las medidas son más constantes. Donde (a) pertenece a mayo, (b) a junio, (c) a julio y (d) a agosto. .... | 35 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Resumen de las características de los fotómetros solares.....  | 11 |
| Tabla 2. Intervalos de estudio de los distintos fotómetros utilizados. ....   | 14 |
| Tabla 3. Medidas cuantitativas de cada fotómetro y de las diferencias entre dos fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.....   | 22 |
| Tabla 4. Medidas cuantitativas de las diferencias entre dos fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.....   | 23 |
| Tabla 5. Intervalos de estudio de los distintos fotómetros utilizados. ....   | 26 |
| Tabla 6. Medidas cuantitativas entre los fotómetros cada ubicación y de las diferencias entre las dos localizaciones de los fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström..... | 30 |
| Tabla 7. Medidas cuantitativas de las diferencias entre las dos localizaciones de los fotómetros. Las tres primeras filas de cada comparación indican el AOD de cada longitud de onda estudiada y la cuarta el exponente de Ångström.....                                       | 31 |
| Tabla 8. Valores de tendencia anuales de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el $p\text{-valor}<0.05$ . ....                               | 36 |
| Tabla 9. Valores de tendencia en mayo de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el $p\text{-valor}<0.05$ . ....                               | 37 |
| Tabla 10. Valores de tendencia en junio de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el $p\text{-valor}<0.05$ . ....                             | 37 |
| Tabla 11. Valores de tendencia en julio de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el $p\text{-valor}<0.05$ . ....                             | 38 |
| Tabla 12. Valores de tendencia en agosto de los instrumentos utilizados en las diferentes longitudes de onda del AOD y del AE. Los valores en amarillo son aquellos que presentan una tendencia significativa ya que el $p\text{-valor}<0.05$ . ....                            | 38 |
| Tabla 13. Datos anuales del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström....   | 48 |
| Tabla 14. Datos anuales del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström....  | 48 |
| Tabla 15. Datos anuales del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....   | 49 |
| Tabla 16. Datos anuales del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....   | 49 |
| Tabla 17. Datos mensuales de mayo del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....  | 49 |
| Tabla 18. Datos mensuales de mayo del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....   | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 19. Datos mensuales de mayo del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....     | 50 |
| Tabla 20. Datos mensuales de mayo del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....   | 50 |
| Tabla 21. Datos mensuales de junio del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....             | 51 |
| Tabla 22. Datos mensuales de junio del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....            | 51 |
| Tabla 23. Datos mensuales de junio del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....    | 51 |
| Tabla 24. Datos mensuales de junio del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....  | 52 |
| Tabla 25. Datos mensuales de julio del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....             | 52 |
| Tabla 26. Datos mensuales de julio del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....            | 53 |
| Tabla 27. Datos mensuales de julio del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....    | 53 |
| Tabla 28. Datos mensuales de julio del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....  | 53 |
| Tabla 29. Datos mensuales de agosto del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....            | 54 |
| Tabla 30. Datos mensuales de agosto del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....           | 54 |
| Tabla 31. Datos mensuales de agosto del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.....   | 54 |
| Tabla 32. Datos mensuales de agosto del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström..... | 55 |

## Anexo I

## Tablas de datos anuales

Tabla 13. Datos anuales del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |          |        | AOD 500 nm |          |        | AOD 862 nm |          |        | AE     |          |        |
|------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|--------|----------|--------|
|      | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media  | Nº datos | sd     |
| 2002 | 0.0865     | 9726     | 0.0634 | 0.0626     | 9726     | 0.0487 | 0.0319     | 9726     | 0.0348 | 1.2723 | 9691     | 0.3013 |
| 2003 | 0.1139     | 18448    | 0.0749 | 0.0830     | 18448    | 0.0571 | 0.0405     | 18448    | 0.0440 | 1.3849 | 18442    | 0.3515 |
| 2004 | 0.1071     | 9662     | 0.0768 | 0.0777     | 9662     | 0.0637 | 0.0363     | 9662     | 0.0555 | 1.4720 | 9661     | 0.3551 |
| 2005 | 0.1130     | 17519    | 0.0647 | 0.0783     | 17519    | 0.0510 | 0.0410     | 17519    | 0.0431 | 1.3807 | 17499    | 0.3983 |
| 2006 | 0.1173     | 11807    | 0.0854 | 0.0832     | 11807    | 0.0667 | 0.0508     | 11807    | 0.0555 | 1.2077 | 11805    | 0.3967 |
| 2007 | 0.0951     | 23746    | 0.0529 | 0.0692     | 23746    | 0.0556 | 0.0327     | 23746    | 0.0638 | 1.5846 | 23616    | 0.2914 |
| 2008 | 0.1071     | 9662     | 0.0768 | 0.0777     | 9662     | 0.0637 | 0.0363     | 9662     | 0.0555 | 1.4720 | 9661     | 0.3551 |
| 2009 | 0.1391     | 25250    | 0.0470 | 0.1028     | 25250    | 0.0335 | 0.0484     | 25250    | 0.0213 | 1.3008 | 25250    | 0.2838 |
| 2010 | 0.1025     | 23487    | 0.0447 | 0.0770     | 23487    | 0.0342 | 0.0415     | 23487    | 0.0249 | 1.1408 | 23487    | 0.2754 |
| 2011 | 0.0924     | 8293     | 0.0345 | 0.0629     | 8293     | 0.0217 | 0.0269     | 8293     | 0.0160 | 1.5362 | 8293     | 0.2650 |
| 2012 | 0.1234     | 35050    | 0.0499 | 0.0898     | 35050    | 0.0366 | 0.0423     | 35050    | 0.0232 | 1.3360 | 35050    | 0.2208 |
| 2013 | 0.1014     | 33796    | 0.0518 | 0.0741     | 33796    | 0.0372 | 0.0356     | 33796    | 0.0238 | 1.3136 | 33796    | 0.2893 |
| 2014 | 0.1123     | 22912    | 0.0428 | 0.0775     | 22912    | 0.0297 | 0.0333     | 22912    | 0.0152 | 1.4649 | 22912    | 0.1942 |
| 2015 | 0.1101     | 40885    | 0.1015 | 0.0788     | 40885    | 0.0809 | 0.0364     | 40885    | 0.0372 | 1.4035 | 40885    | 0.2625 |
| 2016 | 0.0852     | 30728    | 0.0449 | 0.0580     | 30728    | 0.0303 | 0.0241     | 30728    | 0.0134 | 1.5096 | 30728    | 0.2123 |
| 2017 | 0.0822     | 26812    | 0.0369 | 0.0585     | 26812    | 0.0274 | 0.0250     | 26812    | 0.0124 | 1.4627 | 26812    | 0.2028 |
| 2018 | 0.0907     | 20251    | 0.0671 | 0.0638     | 20251    | 0.0519 | 0.0282     | 20251    | 0.0231 | 1.4070 | 20251    | 0.1877 |
| 2019 | 0.1358     | 32075    | 0.1052 | 0.1053     | 32075    | 0.0756 | 0.0405     | 32075    | 0.0317 | 1.4661 | 32075    | 0.2320 |
| 2020 | 0.1056     | 6611     | 0.0193 | 0.0713     | 6611     | 0.0133 | 0.0308     | 6611     | 0.0058 | 1.4668 | 6611     | 0.0996 |

Tabla 14. Datos anuales del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |          |        | AOD 500 nm |          |        | AOD 862 nm |          |        | AE     |          |        |
|------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|--------|----------|--------|
|      | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media  | Nº datos | sd     |
| 2003 | 0.0999     | 899      | 0.0282 | 0.0693     | 899      | 0.0246 | 0.0622     | 899      | 0.0221 | 0.7098 | 822      | 0.4435 |
| 2004 | 0.1187     | 11521    | 0.0559 | 0.0870     | 11521    | 0.0447 | 0.0351     | 11521    | 0.0188 | 1.5652 | 11450    | 0.4971 |
| 2005 | 0.1159     | 4290     | 0.0669 | 0.0817     | 4290     | 0.0450 | 0.0231     | 4290     | 0.0192 | 2.4868 | 4276     | 1.2822 |
| 2006 | 0.1209     | 8521     | 0.1534 | 0.0922     | 8521     | 0.1201 | 0.0433     | 8521     | 0.0436 | 1.2273 | 8521     | 0.2231 |
| 2007 | 0.0956     | 18577    | 0.0357 | 0.0669     | 18577    | 0.0242 | 0.0319     | 18577    | 0.0102 | 1.3914 | 18577    | 0.1451 |
| 2008 | 0.1187     | 11521    | 0.0559 | 0.0870     | 11521    | 0.0447 | 0.0351     | 18299    | 0.0188 | 1.5652 | 11450    | 0.4971 |
| 2009 | 0.1370     | 30025    | 0.4212 | 0.1006     | 30025    | 0.0326 | 0.0480     | 30025    | 0.0134 | 1.2772 | 30025    | 0.2699 |
| 2010 | 0.6092     | 30006    | 2.2879 | 0.0481     | 30006    | 0.0287 | 0.0277     | 30006    | 0.0221 | 1.3541 | 29893    | 0.2585 |
| 2011 | 0.1070     | 34090    | 0.0309 | 0.0668     | 34090    | 0.0196 | 0.0331     | 34090    | 0.0087 | 1.3656 | 34090    | 0.1860 |
| 2012 | 0.1000     | 28386    | 0.0336 | 0.0684     | 28386    | 0.0237 | 0.0334     | 28386    | 0.0111 | 1.4235 | 28386    | 0.1657 |
| 2013 | 0.0713     | 24691    | 0.0353 | 0.0508     | 24691    | 0.0240 | 0.0220     | 24691    | 0.0105 | 1.5214 | 24691    | 0.3685 |
| 2014 | 0.0720     | 18824    | 0.0398 | 0.0575     | 18824    | 0.0289 | 0.0228     | 18824    | 0.0120 | 1.5860 | 18824    | 0.3277 |
| 2015 | 0.1414     | 35555    | 0.2376 | 0.1119     | 35555    | 0.1690 | 0.0541     | 35555    | 0.0746 | 1.1375 | 35555    | 0.2407 |
| 2016 | 0.1180     | 35785    | 0.6094 | 0.0565     | 35785    | 0.0274 | 0.0251     | 35785    | 0.0105 | 1.3216 | 35785    | 0.2340 |
| 2017 | 0.0730     | 40161    | 0.0313 | 0.0497     | 40161    | 0.0220 | 0.0180     | 40161    | 0.0099 | 1.7899 | 40160    | 0.4185 |
| 2018 | 0.0807     | 31316    | 0.2208 | 0.0553     | 31316    | 0.0557 | 0.0219     | 31316    | 0.0243 | 1.6246 | 31315    | 0.3437 |
| 2019 | 0.1058     | 23042    | 0.0555 | 0.0797     | 23042    | 0.0448 | 0.0378     | 23042    | 0.0230 | 1.3429 | 23042    | 0.2085 |
| 2020 | 0.1082     | 33971    | 0.3002 | 0.0718     | 33971    | 0.0421 | 0.0300     | 33971    | 0.0173 | 1.4986 | 33971    | 0.2075 |

Tabla 15. Datos anuales del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |          |        | AOD 500 nm |          |        | AOD 862 nm |          |        | AE     |          |        |
|------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|--------|----------|--------|
|      | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media  | Nº datos | sd     |
| 2017 | 0.0578     | 1652     | 0.0306 | 0.0421     | 1652     | 0.0249 | 0.0191     | 1652     | 0.0127 | 1.4245 | 1652     | 0.2533 |
| 2018 | 0.0905     | 1653     | 0.0625 | 0.0664     | 1653     | 0.0474 | 0.0320     | 1653     | 0.0252 | 1.3292 | 1653     | 0.2665 |
| 2019 | 0.0829     | 1045     | 0.0397 | 0.0600     | 1045     | 0.0321 | 0.0269     | 1045     | 0.0265 | 1.4730 | 1045     | 0.3124 |
| 2020 | 0.1116     | 9499     | 0.0759 | 0.0804     | 9499     | 0.0561 | 0.0376     | 9499     | 0.0330 | 1.4236 | 9499     | 0.3244 |

Tabla 16. Datos anuales del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |          |        | AOD 500 nm |          |        | AOD 862 nm |          |        | AE     |          |        |
|------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|--------|----------|--------|
|      | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media      | Nº datos | sd     | Media  | Nº datos | sd     |
| 2005 | 0.1299     | 88       | 0.0652 | 0.0943     | 88       | 0.0474 | 0.0459     | 88       | 0.0212 | 1.2555 | 88       | 0.1777 |
| 2006 | 0.1951     | 240      | 0.1938 | 0.1357     | 240      | 0.1267 | 0.0623     | 240      | 0.0470 | 1.2801 | 240      | 0.2684 |
| 2007 | 0.1443     | 320      | 0.0812 | 0.1122     | 320      | 0.0828 | 0.0706     | 320      | 0.0829 | 1.1114 | 320      | 0.4509 |
| 2008 | 0.1546     | 2008     | 0.1277 | 0.1139     | 2008     | 0.1173 | 0.0570     | 2008     | 0.1094 | 1.4018 | 2008     | 0.2592 |
| 2009 | 0.1522     | 1522     | 0.0694 | 0.1104     | 1522     | 0.0526 | 0.0515     | 1522     | 0.0405 | 1.3353 | 1522     | 0.2592 |
| 2010 | 0.1476     | 610      | 0.0753 | 0.1152     | 610      | 0.0677 | 0.0688     | 610      | 0.0651 | 1.0619 | 610      | 0.3689 |
| 2011 | 0.1273     | 1603     | 0.0464 | 0.0923     | 1603     | 0.0372 | 0.0483     | 1603     | 0.0310 | 1.2588 | 1603     | 0.4074 |
| 2012 | 0.1146     | 1603     | 0.0492 | 0.0848     | 1603     | 0.0373 | 0.0401     | 1603     | 0.0250 | 1.3253 | 1603     | 0.2619 |
| 2013 | 0.1201     | 1223     | 0.0628 | 0.0900     | 1223     | 0.0534 | 0.0506     | 1223     | 0.0464 | 1.1549 | 1223     | 0.3118 |
| 2014 | 0.1052     | 1283     | 0.0519 | 0.0812     | 1283     | 0.0409 | 0.0404     | 1283     | 0.0312 | 1.2185 | 1283     | 0.2917 |
| 2015 | 0.1749     | 670      | 0.2111 | 0.1345     | 670      | 0.1715 | 0.0571     | 670      | 0.0699 | 1.4270 | 670      | 0.2496 |
| 2016 | 0.0655     | 364      | 0.0399 | 0.0468     | 364      | 0.0287 | 0.0294     | 364      | 0.0142 | 0.9121 | 364      | 0.3301 |
| 2017 | 0.0919     | 1552     | 0.0586 | 0.0670     | 1552     | 0.0457 | 0.0287     | 1552     | 0.0211 | 1.4917 | 1552     | 0.3169 |
| 2018 | 0.0875     | 728      | 0.0764 | 0.0686     | 728      | 0.0622 | 0.0351     | 728      | 0.0330 | 1.1913 | 728      | 0.2949 |
| 2019 | 0.1344     | 1476     | 0.0933 | 0.1026     | 1476     | 0.0736 | 0.0474     | 1476     | 0.0397 | 1.3312 | 1476     | 0.2754 |
| 2020 | 0.0972     | 914      | 0.0721 | 0.0713     | 914      | 0.0525 | 0.0346     | 914      | 0.0274 | 1.2830 | 914      | 0.3283 |

### Tablas de datos de mayo

Tabla 17. Datos mensuales de mayo del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2002 | 0.1037     | 0.0438 | 3009     | 0.0734     | 0.0330 | 3009     | 0.0345     | 0.0231 | 3009     | 1.3459 | 0.1725 | 3007     |
| 2003 | 0.2111     | 0.0785 | 2867     | 0.1469     | 0.0596 | 2867     | 0.0747     | 0.0461 | 2867     | 1.2777 | 0.2351 | 2867     |
| 2004 | 0.1697     | 0.0750 | 2675     | 0.1190     | 0.0700 | 2675     | 0.0558     | 0.0724 | 2675     | 1.5422 | 0.3680 | 2675     |
| 2005 | 0.1417     | 0.0458 | 4162     | 0.0992     | 0.0380 | 4162     | 0.0628     | 0.0345 | 4162     | 1.0121 | 0.1952 | 4162     |
| 2007 | 0.1137     | 0.0620 | 3843     | 0.0922     | 0.1030 | 3843     | 0.0574     | 0.1391 | 3843     | 1.5400 | 0.2762 | 3721     |
| 2008 | 0.2112     | 0.0806 | 6128     | 0.1436     | 0.0499 | 6128     | 0.0676     | 0.0598 | 6128     | 1.4279 | 0.1513 | 6090     |
| 2009 | 0.1664     | 0.0466 | 4988     | 0.1142     | 0.0307 | 4988     | 0.0555     | 0.0255 | 4988     | 1.3523 | 0.4509 | 4988     |
| 2010 | 0.1144     | 0.0429 | 2880     | 0.0822     | 0.0317 | 2880     | 0.0400     | 0.0223 | 2880     | 1.2955 | 0.2185 | 2880     |
| 2011 | 0.1290     | 0.0191 | 772      | 0.0845     | 0.0130 | 772      | 0.0321     | 0.0060 | 772      | 1.6704 | 0.0933 | 772      |
| 2012 | 0.1524     | 0.0515 | 9584     | 0.1115     | 0.0398 | 9584     | 0.0569     | 0.0270 | 9584     | 1.2158 | 0.1932 | 9584     |
| 2013 | 0.0933     | 0.0452 | 6289     | 0.0674     | 0.0326 | 6289     | 0.0318     | 0.0214 | 6289     | 1.3696 | 0.2537 | 6289     |
| 2014 | 0.1486     | 0.0328 | 3690     | 0.0991     | 0.0214 | 3690     | 0.0426     | 0.0117 | 3690     | 1.4876 | 0.1612 | 3690     |
| 2015 | 0.1014     | 0.0324 | 7630     | 0.0697     | 0.0238 | 7630     | 0.0302     | 0.0119 | 7630     | 1.4629 | 0.1439 | 7630     |
| 2016 | 0.1046     | 0.0495 | 2322     | 0.0713     | 0.0337 | 2322     | 0.0282     | 0.0131 | 2322     | 1.5556 | 0.0942 | 2322     |
| 2017 | 0.1065     | 0.0370 | 8885     | 0.0772     | 0.0290 | 8885     | 0.0330     | 0.0131 | 8885     | 1.4434 | 0.2252 | 8885     |
| 2018 | 0.0880     | 0.0132 | 1143     | 0.0709     | 0.0176 | 1143     | 0.0317     | 0.0128 | 1143     | 1.2691 | 0.3161 | 1143     |
| 2019 | 0.0985     | 0.0366 | 12416    | 0.0701     | 0.0184 | 12416    | 0.0265     | 0.0105 | 12416    | 1.5676 | 0.2311 | 12416    |
| 2020 | 0.1162     | 0.0144 | 2453     | 0.0795     | 0.0108 | 2453     | 0.0335     | 0.0063 | 2453     | 1.4902 | 0.1198 | 2453     |

Tabla 18. Datos mensuales de mayo del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2003 | 0.1113     | 0.0078 | 240      | 0.0775     | 0.0084 | 240      | 0.0755     | 0.0287 | 240      | 0.7177 | 0.5811 | 203      |
| 2004 | 0.1214     | 0.0388 | 4295     | 0.0831     | 0.0247 | 4295     | 0.0298     | 0.0118 | 4295     | 1.7744 | 0.5025 | 4287     |
| 2005 | 0.0687     | 0.0224 | 666      | 0.0532     | 0.0163 | 666      | 0.0072     | 0.0063 | 666      | 3.3046 | 1.1902 | 664      |
| 2006 | 0.2472     | 0.2171 | 2760     | 0.1852     | 0.1743 | 2760     | 0.0770     | 0.0604 | 2760     | 1.4061 | 0.1776 | 2760     |
| 2007 | 0.1202     | 0.0275 | 3947     | 0.0818     | 0.0163 | 3947     | 0.0362     | 0.0077 | 3947     | 1.5221 | 0.1054 | 3947     |
| 2008 | 0.1609     | 0.0351 | 3154     | 0.1287     | 0.0286 | 3154     | 0.0583     | 0.0100 | 3154     | 1.4691 | 0.0917 | 3154     |
| 2009 | 0.1131     | 0.0429 | 4818     | 0.0903     | 0.0276 | 4818     | 0.0413     | 0.0085 | 4818     | 1.4892 | 0.2599 | 4818     |
| 2010 | 0.0712     | 0.0247 | 5666     | 0.0587     | 0.0180 | 5666     | 0.0296     | 0.0056 | 5666     | 1.5438 | 0.0828 | 5666     |
| 2011 | 0.1111     | 0.0241 | 7898     | 0.0680     | 0.0147 | 7898     | 0.0327     | 0.0060 | 7898     | 1.4552 | 0.1571 | 7898     |
| 2012 | 0.1141     | 0.0298 | 7447     | 0.0780     | 0.0208 | 7447     | 0.0383     | 0.0099 | 7447     | 1.4174 | 0.1056 | 7447     |
| 2013 | 0.0619     | 0.0128 | 4161     | 0.0417     | 0.0093 | 4161     | 0.0149     | 0.0056 | 4161     | 1.8648 | 0.3836 | 4161     |
| 2014 | 0.1295     | 0.0186 | 1069     | 0.0976     | 0.0134 | 1069     | 0.0440     | 0.0071 | 1069     | 1.3924 | 0.0557 | 1069     |
| 2015 | 0.0986     | 0.0292 | 8273     | 0.0752     | 0.0219 | 8273     | 0.0404     | 0.0110 | 8273     | 1.0790 | 0.1398 | 8273     |
| 2016 | 0.0986     | 0.0500 | 2868     | 0.0690     | 0.0353 | 2868     | 0.0293     | 0.0128 | 2868     | 1.4094 | 0.1628 | 2868     |
| 2017 | 0.0819     | 0.0258 | 11814    | 0.0547     | 0.0173 | 11814    | 0.0189     | 0.0070 | 11814    | 1.8165 | 0.3014 | 11814    |
| 2018 | 0.0608     | 0.0129 | 1905     | 0.0431     | 0.0096 | 1905     | 0.0191     | 0.0064 | 1905     | 1.4526 | 0.2748 | 1905     |
| 2019 | 0.1307     | 0.0578 | 12888    | 0.0993     | 0.0469 | 12888    | 0.0480     | 0.0241 | 12888    | 1.2900 | 0.1504 | 12888    |
| 2020 | 0.1010     | 0.0189 | 6459     | 0.0716     | 0.0126 | 6459     | 0.0307     | 0.0070 | 6459     | 1.4854 | 0.1558 | 6459     |

Tabla 19. Datos mensuales de mayo del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2018 | 0.0744     | 0.0198 | 98       | 0.0549     | 0.0149 | 98       | 0.0310     | 0.0133 | 98       | 1.1188 | 0.2531 | 98       |
| 2019 | 0.0901     | 0.0386 | 647      | 0.0638     | 0.0292 | 647      | 0.0261     | 0.0213 | 647      | 1.5885 | 0.2183 | 647      |
| 2020 | 0.1056     | 0.0383 | 2037     | 0.0766     | 0.0353 | 2037     | 0.0383     | 0.0330 | 2037     | 1.3891 | 0.3047 | 2037     |

Tabla 20. Datos mensuales de mayo del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2005 | 0.1946     | 0.0655 | 6        | 0.1357     | 0.0453 | 6        | 0.0616     | 0.0200 | 6        | 1.3871 | 0.1202 | 6        |
| 2006 | 0.4234     | 0.2597 | 63       | 0.2837     | 0.1678 | 63       | 0.1155     | 0.0580 | 63       | 1.4438 | 0.2905 | 63       |
| 2007 | 0.1075     | 0.0211 | 90       | 0.0755     | 0.0152 | 90       | 0.0350     | 0.0116 | 90       | 1.4128 | 0.2564 | 90       |
| 2008 | 0.2385     | 0.2527 | 311      | 0.1874     | 0.2545 | 311      | 0.1172     | 0.2601 | 311      | 1.2953 | 0.3016 | 311      |
| 2009 | 0.1491     | 0.0466 | 195      | 0.1065     | 0.0348 | 195      | 0.0526     | 0.0253 | 195      | 1.2902 | 0.2895 | 195      |
| 2010 | 0.1531     | 0.1125 | 111      | 0.1243     | 0.1103 | 111      | 0.0821     | 0.1125 | 111      | 1.0121 | 0.3859 | 111      |
| 2011 | 0.1109     | 0.0328 | 325      | 0.0808     | 0.0285 | 325      | 0.0442     | 0.0275 | 325      | 1.2100 | 0.3770 | 325      |
| 2012 | 0.1121     | 0.0359 | 116      | 0.0842     | 0.0263 | 116      | 0.0416     | 0.0155 | 116      | 1.2314 | 0.1573 | 116      |
| 2013 | 0.0954     | 0.0321 | 164      | 0.0678     | 0.0223 | 164      | 0.0326     | 0.0126 | 164      | 1.3111 | 0.2095 | 164      |
| 2014 | 0.1276     | 0.0402 | 378      | 0.0965     | 0.0320 | 378      | 0.0491     | 0.0266 | 378      | 1.2145 | 0.2975 | 378      |
| 2015 | 0.0623     | 0.0113 | 42       | 0.0432     | 0.0078 | 42       | 0.0192     | 0.0031 | 42       | 1.4334 | 0.0751 | 42       |
| 2018 | 0.1056     | 0.0466 | 73       | 0.0844     | 0.0415 | 73       | 0.0533     | 0.0394 | 73       | 0.9776 | 0.3434 | 73       |
| 2019 | 0.1102     | 0.0510 | 309      | 0.0794     | 0.0390 | 309      | 0.0361     | 0.0279 | 309      | 1.4189 | 0.3043 | 309      |
| 2020 | 0.1193     | 0.0652 | 64       | 0.0914     | 0.0607 | 64       | 0.0562     | 0.0597 | 64       | 1.0903 | 0.3338 | 64       |

## Tablas de datos de junio

Tabla 21. Datos mensuales de junio del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2002 | 0.0786     | 0.0331 | 1855     | 0.0546     | 0.0257 | 1855     | 0.0295     | 0.0238 | 1855     | 1.2444 | 0.2811 | 1855     |
| 2003 | 0.1272     | 0.0535 | 631      | 0.0999     | 0.0479 | 631      | 0.0394     | 0.0406 | 631      | 1.4621 | 0.1140 | 631      |
| 2004 | 0.0813     | 0.0504 | 1131     | 0.0590     | 0.0496 | 1131     | 0.0232     | 0.0495 | 1131     | 1.6355 | 0.2181 | 1131     |
| 2005 | 0.0778     | 0.0393 | 2326     | 0.0535     | 0.0301 | 2326     | 0.0211     | 0.0252 | 2326     | 1.6313 | 0.2258 | 2324     |
| 2006 | 0.0638     | 0.0064 | 349      | 0.0402     | 0.0042 | 349      | 0.0164     | 0.0035 | 349      | 1.6129 | 0.1945 | 349      |
| 2007 | 0.0955     | 0.0340 | 3184     | 0.0658     | 0.0240 | 3184     | 0.0226     | 0.0102 | 3184     | 1.7721 | 0.1454 | 3184     |
| 2008 | 0.0931     | 0.0329 | 4961     | 0.0615     | 0.0257 | 4961     | 0.0281     | 0.0208 | 4961     | 1.4993 | 0.3454 | 4961     |
| 2009 | 0.1130     | 0.0259 | 4567     | 0.0804     | 0.0199 | 4567     | 0.0364     | 0.0135 | 4567     | 1.3899 | 0.2083 | 4567     |
| 2010 | 0.0766     | 0.0175 | 4113     | 0.0549     | 0.0125 | 4113     | 0.0284     | 0.0093 | 4113     | 1.2285 | 0.3394 | 4113     |
| 2011 | 0.1210     | 0.0167 | 986      | 0.0831     | 0.0158 | 986      | 0.0295     | 0.0146 | 986      | 1.7479 | 0.1960 | 986      |
| 2012 | 0.0899     | 0.0464 | 5336     | 0.0627     | 0.0269 | 5336     | 0.0252     | 0.0139 | 5336     | 1.5438 | 0.1375 | 5336     |
| 2013 | 0.0775     | 0.0268 | 5288     | 0.0578     | 0.0194 | 5288     | 0.0280     | 0.0144 | 5288     | 1.2964 | 0.3366 | 5288     |
| 2014 | 0.0737     | 0.0156 | 4155     | 0.0531     | 0.0150 | 4155     | 0.0237     | 0.0129 | 4155     | 1.4327 | 0.2558 | 4155     |
| 2015 | 0.0806     | 0.0155 | 5587     | 0.0570     | 0.0120 | 5587     | 0.0251     | 0.0096 | 5587     | 1.4485 | 0.2666 | 5587     |
| 2016 | 0.1116     | 0.0251 | 3547     | 0.0767     | 0.0178 | 3547     | 0.0366     | 0.0139 | 3547     | 1.3971 | 0.2322 | 3547     |
| 2017 | 0.0644     | 0.0113 | 5366     | 0.0453     | 0.0088 | 5366     | 0.0215     | 0.0058 | 5366     | 1.3391 | 0.1805 | 5366     |
| 2018 | 0.0668     | 0.0203 | 4925     | 0.0458     | 0.0142 | 4925     | 0.0189     | 0.0054 | 4925     | 1.4884 | 0.2040 | 4925     |
| 2019 | 0.0754     | 0.0156 | 4822     | 0.0530     | 0.0148 | 4822     | 0.0241     | 0.0102 | 4822     | 1.4182 | 0.2912 | 4822     |

Tabla 22. Datos mensuales de junio del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2003 | 0.1749     | 0.0140 | 86       | 0.1327     | 0.0127 | 86       | 0.0597     | 0.0059 | 86       | 1.3509 | 0.1080 | 86       |
| 2004 | 0.0667     | 0.0118 | 1846     | 0.0465     | 0.0092 | 1846     | 0.0275     | 0.0163 | 1846     | 1.3345 | 0.6671 | 1785     |
| 2005 | 0.0555     | 0.0158 | 617      | 0.0421     | 0.0109 | 617      | 0.0096     | 0.0078 | 617      | 2.7705 | 1.4144 | 612      |
| 2006 | 0.0611     | 0.0120 | 1662     | 0.0453     | 0.0087 | 1662     | 0.0235     | 0.0046 | 1662     | 1.2825 | 0.1252 | 1662     |
| 2007 | 0.1129     | 0.0344 | 5178     | 0.0765     | 0.0240 | 5178     | 0.0361     | 0.0099 | 5178     | 1.4351 | 0.0925 | 5178     |
| 2008 | 0.0852     | 0.0232 | 5329     | 0.0616     | 0.0167 | 5329     | 0.0303     | 0.0068 | 5329     | 1.4937 | 0.1756 | 5329     |
| 2009 | 0.0870     | 0.0250 | 2712     | 0.0677     | 0.0185 | 2712     | 0.0326     | 0.0061 | 2712     | 1.5402 | 0.1244 | 2712     |
| 2010 | 0.0586     | 0.0283 | 4252     | 0.0480     | 0.0202 | 4252     | 0.0249     | 0.0081 | 4252     | 1.5856 | 0.1642 | 4252     |
| 2011 | 0.1291     | 0.0293 | 11691    | 0.0800     | 0.0191 | 11691    | 0.0376     | 0.0076 | 11691    | 1.4341 | 0.1329 | 11691    |
| 2012 | 0.0845     | 0.0314 | 4940     | 0.0566     | 0.0223 | 4940     | 0.0291     | 0.0102 | 4940     | 1.3950 | 0.1960 | 4940     |
| 2013 | 0.0498     | 0.0092 | 3090     | 0.0354     | 0.0078 | 3090     | 0.0140     | 0.0062 | 3090     | 1.7997 | 0.6033 | 3090     |
| 2014 | 0.0447     | 0.0135 | 5515     | 0.0387     | 0.0095 | 5515     | 0.0157     | 0.0072 | 5515     | 1.6054 | 0.4190 | 5515     |
| 2015 | 0.0777     | 0.0164 | 6077     | 0.0606     | 0.0120 | 6077     | 0.0339     | 0.0070 | 6077     | 0.9858 | 0.2152 | 6077     |
| 2016 | 0.1011     | 0.0187 | 4210     | 0.0700     | 0.0132 | 4210     | 0.0306     | 0.0058 | 4210     | 1.3853 | 0.1293 | 4210     |
| 2017 | 0.0544     | 0.0120 | 5556     | 0.0366     | 0.0090 | 5556     | 0.0142     | 0.0061 | 5556     | 1.7059 | 0.4534 | 5555     |
| 2018 | 0.0557     | 0.0176 | 5499     | 0.0378     | 0.0123 | 5499     | 0.0142     | 0.0056 | 5499     | 1.6730 | 0.3300 | 5499     |
| 2019 | 0.0616     | 0.0109 | 4393     | 0.0449     | 0.0077 | 4393     | 0.0213     | 0.0047 | 4393     | 1.3513 | 0.1842 | 4393     |
| 2020 | 0.0692     | 0.0118 | 5207     | 0.0493     | 0.0094 | 5207     | 0.0218     | 0.0093 | 5207     | 1.4750 | 0.2906 | 5207     |

Tabla 23. Datos mensuales de junio del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2017 | 0.0567     | 0.0133 | 572      | 0.0400     | 0.0101 | 572      | 0.0195     | 0.0083 | 572      | 1.3557 | 0.2791 | 572      |
| 2018 | 0.0646     | 0.0225 | 252      | 0.0468     | 0.0193 | 252      | 0.0243     | 0.0175 | 252      | 1.2884 | 0.3048 | 252      |
| 2019 | 0.0714     | 0.0121 | 78       | 0.0520     | 0.0117 | 78       | 0.0258     | 0.0116 | 78       | 1.3245 | 0.2601 | 78       |
| 2020 | 0.0650     | 0.0155 | 1422     | 0.0484     | 0.0142 | 1422     | 0.0237     | 0.0144 | 1422     | 1.3632 | 0.3263 | 1422     |

Tabla 24. Datos mensuales de junio del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2005 | 0.0869     | 0.0149 | 6        | 0.0595     | 0.0092 | 6        | 0.0256     | 0.0027 | 6        | 1.4907 | 0.1283 | 6        |
| 2006 | 0.0936     | 0.0234 | 5        | 0.0616     | 0.0144 | 5        | 0.0266     | 0.0058 | 5        | 1.4948 | 0.1246 | 5        |
| 2007 | 0.2237     | 0.0723 | 19       | 0.1863     | 0.0728 | 19       | 0.1347     | 0.0782 | 19       | 0.7231 | 0.3576 | 19       |
| 2008 | 0.1084     | 0.0539 | 410      | 0.0795     | 0.0425 | 410      | 0.0361     | 0.0239 | 410      | 1.4139 | 0.2376 | 410      |
| 2009 | 0.1052     | 0.0259 | 260      | 0.0755     | 0.0198 | 260      | 0.0355     | 0.0100 | 260      | 1.3335 | 0.1407 | 260      |
| 2010 | 0.1750     | 0.0887 | 7        | 0.1395     | 0.0879 | 7        | 0.0891     | 0.0873 | 7        | 1.1166 | 0.4987 | 7        |
| 2011 | 0.1429     | 0.0455 | 600      | 0.0994     | 0.0340 | 600      | 0.0405     | 0.0168 | 600      | 1.5829 | 0.2553 | 600      |
| 2012 | 0.0828     | 0.0310 | 208      | 0.0604     | 0.0216 | 208      | 0.0251     | 0.0084 | 208      | 1.4511 | 0.1303 | 208      |
| 2013 | 0.1240     | 0.0415 | 25       | 0.0859     | 0.0400 | 25       | 0.0487     | 0.0309 | 25       | 1.1747 | 0.3481 | 25       |
| 2014 | 0.0579     | 0.0199 | 204      | 0.0487     | 0.0168 | 204      | 0.0258     | 0.0151 | 204      | 1.0769 | 0.2279 | 204      |
| 2015 | 0.0803     | 0.0250 | 98       | 0.0572     | 0.0228 | 98       | 0.0264     | 0.0212 | 98       | 1.4498 | 0.2452 | 98       |
| 2016 | 0.0588     | 0.0140 | 67       | 0.0405     | 0.0131 | 67       | 0.0273     | 0.0127 | 67       | 0.9232 | 0.2317 | 67       |
| 2018 | 0.0696     | 0.0260 | 186      | 0.0549     | 0.0217 | 186      | 0.0305     | 0.0172 | 186      | 1.1011 | 0.3200 | 186      |
| 2019 | 0.0615     | 0.0145 | 558      | 0.0462     | 0.0119 | 558      | 0.0219     | 0.0098 | 558      | 1.3171 | 0.2195 | 558      |
| 2020 | 0.0746     | 0.0254 | 146      | 0.0580     | 0.0215 | 146      | 0.0349     | 0.0175 | 146      | 1.0008 | 0.2101 | 146      |

### Tablas de datos de julio

Tabla 25. Datos mensuales de julio del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2002 | 0.0977     | 0.1522 | 888      | 0.0723     | 0.1065 | 888      | 0.0329     | 0.0393 | 888      | 1.1546 | 0.2458 | 888      |
| 2003 | 0.0549     | 0.0168 | 2551     | 0.0425     | 0.0144 | 2551     | 0.0172     | 0.0109 | 2551     | 1.4960 | 0.3258 | 2549     |
| 2004 | 0.1261     | 0.0995 | 585      | 0.0968     | 0.0783 | 585      | 0.0398     | 0.0426 | 585      | 1.5964 | 0.3232 | 585      |
| 2005 | 0.0697     | 0.0255 | 1622     | 0.0479     | 0.0168 | 1622     | 0.0171     | 0.0102 | 1622     | 1.7207 | 0.1813 | 1622     |
| 2006 | 0.0630     | 0.0423 | 2582     | 0.0441     | 0.0429 | 2582     | 0.0204     | 0.0413 | 2582     | 1.4287 | 0.3119 | 2582     |
| 2007 | 0.0629     | 0.0158 | 4978     | 0.0453     | 0.0119 | 4978     | 0.0169     | 0.0093 | 4978     | 1.6333 | 0.1763 | 4978     |
| 2008 | 0.1005     | 0.0444 | 300      | 0.0694     | 0.0326 | 300      | 0.0291     | 0.0134 | 300      | 1.4819 | 0.2201 | 300      |
| 2009 | 0.1401     | 0.0470 | 8816     | 0.1050     | 0.0375 | 8816     | 0.0492     | 0.0248 | 8816     | 1.3227 | 0.2329 | 8816     |
| 2010 | 0.0668     | 0.0207 | 2350     | 0.0508     | 0.0158 | 2350     | 0.0227     | 0.0080 | 2350     | 1.3268 | 0.2643 | 2350     |
| 2011 | 0.0833     | 0.0490 | 1496     | 0.0546     | 0.0185 | 1496     | 0.0246     | 0.0173 | 1496     | 1.4960 | 0.1977 | 1496     |
| 2012 | 0.0844     | 0.0266 | 4318     | 0.0639     | 0.0211 | 4318     | 0.0292     | 0.0118 | 4318     | 1.3216 | 0.1784 | 4318     |
| 2013 | 0.0735     | 0.0242 | 2996     | 0.0567     | 0.0188 | 2996     | 0.0243     | 0.0096 | 2996     | 1.3738 | 0.1644 | 2996     |
| 2014 | 0.0803     | 0.0455 | 2697     | 0.0574     | 0.0360 | 2697     | 0.0233     | 0.0146 | 2697     | 1.5002 | 0.1721 | 2697     |
| 2015 | 0.1601     | 0.2019 | 7883     | 0.1207     | 0.1633 | 7883     | 0.0517     | 0.0679 | 7883     | 1.4410 | 0.2173 | 7883     |
| 2016 | 0.0609     | 0.0186 | 7400     | 0.0422     | 0.0134 | 7400     | 0.0170     | 0.0061 | 7400     | 1.5357 | 0.2561 | 7400     |
| 2017 | 0.0569     | 0.0148 | 6398     | 0.0400     | 0.0112 | 6398     | 0.0155     | 0.0045 | 6398     | 1.5785 | 0.1392 | 6398     |
| 2018 | 0.0493     | 0.0124 | 2720     | 0.0323     | 0.0084 | 2720     | 0.0143     | 0.0033 | 2720     | 1.4587 | 0.0903 | 2720     |
| 2019 | 0.2766     | 0.1376 | 5378     | 0.2025     | 0.0960 | 5378     | 0.0804     | 0.0350 | 5378     | 1.4505 | 0.1541 | 5378     |

Tabla 26. Datos mensuales de julio del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2004 | 0.1518     | 0.0695 | 3640     | 0.1210     | 0.0557 | 3640     | 0.0469     | 0.0226 | 3640     | 1.4875 | 0.3487 | 3638     |
| 2005 | 0.0586     | 0.0180 | 509      | 0.0420     | 0.0106 | 509      | 0.0105     | 0.0092 | 509      | 2.8504 | 1.5898 | 506      |
| 2006 | 0.0428     | 0.0085 | 1342     | 0.0326     | 0.0053 | 1342     | 0.0185     | 0.0024 | 1342     | 1.1612 | 0.1422 | 1342     |
| 2007 | 0.0709     | 0.0127 | 5282     | 0.0500     | 0.0081 | 5282     | 0.0257     | 0.0041 | 5282     | 1.3145 | 0.0879 | 5282     |
| 2008 | 0.0498     | 0.0110 | 3007     | 0.0384     | 0.0069 | 3007     | 0.0191     | 0.0030 | 3007     | 1.5524 | 0.0870 | 3007     |
| 2009 | 0.1176     | 0.0280 | 8616     | 0.0991     | 0.0243 | 8616     | 0.0503     | 0.0133 | 8616     | 1.1255 | 0.2056 | 8616     |
| 2010 | 0.0397     | 0.0160 | 3137     | 0.0378     | 0.0116 | 3137     | 0.0222     | 0.0044 | 3137     | 1.4061 | 0.2145 | 3137     |
| 2011 | 0.0875     | 0.0227 | 6909     | 0.0551     | 0.0162 | 6909     | 0.0288     | 0.0066 | 6909     | 1.2616 | 0.1508 | 6909     |
| 2012 | 0.0679     | 0.0208 | 3101     | 0.0443     | 0.0149 | 3101     | 0.0221     | 0.0073 | 3101     | 1.4917 | 0.2155 | 3101     |
| 2013 | 0.0691     | 0.0248 | 3731     | 0.0476     | 0.0163 | 3731     | 0.0221     | 0.0075 | 3731     | 1.4154 | 0.1031 | 3731     |
| 2014 | 0.0556     | 0.0418 | 3925     | 0.0471     | 0.0336 | 3925     | 0.0170     | 0.0130 | 3925     | 1.7326 | 0.3473 | 3925     |
| 2015 | 0.2811     | 0.3490 | 9349     | 0.2327     | 0.2950 | 9349     | 0.1068     | 0.1299 | 9349     | 1.1183 | 0.1794 | 9349     |
| 2016 | 0.0661     | 0.0182 | 7959     | 0.0458     | 0.0129 | 7959     | 0.0224     | 0.0055 | 7959     | 1.1889 | 0.1710 | 7959     |
| 2017 | 0.0463     | 0.0113 | 6581     | 0.0305     | 0.0088 | 6581     | 0.0090     | 0.0051 | 6581     | 2.1458 | 0.5480 | 6581     |
| 2018 | 0.0384     | 0.0122 | 3126     | 0.0249     | 0.0090 | 3126     | 0.0070     | 0.0040 | 3126     | 2.1633 | 0.5519 | 3125     |
| 2019 | 0.0866     | 0.0127 | 523      | 0.0613     | 0.0088 | 523      | 0.0284     | 0.0045 | 523      | 1.4087 | 0.0656 | 523      |
| 2020 | 0.1418     | 0.1151 | 6194     | 0.0997     | 0.0812 | 6194     | 0.0361     | 0.0281 | 6194     | 1.6742 | 0.1307 | 6194     |

Tabla 27. Datos mensuales de julio del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2017 | 0.0491     | 0.0133 | 770      | 0.0356     | 0.0106 | 770      | 0.0155     | 0.0079 | 770      | 1.4860 | 0.2094 | 770      |
| 2018 | 0.0472     | 0.0132 | 133      | 0.0316     | 0.0097 | 133      | 0.0134     | 0.0044 | 133      | 1.5568 | 0.1385 | 133      |
| 2020 | 0.1655     | 0.1288 | 1862     | 0.1157     | 0.0896 | 1862     | 0.0434     | 0.0312 | 1862     | 1.6095 | 0.2957 | 1862     |

Tabla 28. Datos mensuales de julio del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2005 | 0.0633     | 0.0219 | 13       | 0.0465     | 0.0128 | 13       | 0.0222     | 0.0045 | 13       | 1.2827 | 0.2218 | 13       |
| 2007 | 0.2805     | 0.1563 | 34       | 0.2634     | 0.1623 | 34       | 0.2257     | 0.1666 | 34       | 0.3789 | 0.2184 | 34       |
| 2008 | 0.0699     | 0.0426 | 256      | 0.0514     | 0.0311 | 256      | 0.0212     | 0.0128 | 256      | 1.5177 | 0.2237 | 256      |
| 2009 | 0.1157     | 0.0367 | 258      | 0.0885     | 0.0300 | 258      | 0.0418     | 0.0170 | 258      | 1.2830 | 0.2174 | 258      |
| 2011 | 0.0921     | 0.0162 | 88       | 0.0715     | 0.0145 | 88       | 0.0438     | 0.0117 | 88       | 0.9284 | 0.1461 | 88       |
| 2012 | 0.0721     | 0.0306 | 171      | 0.0556     | 0.0252 | 171      | 0.0241     | 0.0140 | 171      | 1.4193 | 0.2310 | 171      |
| 2013 | 0.0768     | 0.0240 | 229      | 0.0582     | 0.0182 | 229      | 0.0286     | 0.0101 | 229      | 1.2140 | 0.1437 | 229      |
| 2014 | 0.0594     | 0.0327 | 117      | 0.0491     | 0.0246 | 117      | 0.0263     | 0.0123 | 117      | 0.9945 | 0.2458 | 117      |
| 2015 | 0.2650     | 0.2605 | 349      | 0.2077     | 0.2115 | 349      | 0.0853     | 0.0852 | 349      | 1.4328 | 0.1828 | 349      |
| 2016 | 0.0649     | 0.0308 | 169      | 0.0459     | 0.0220 | 169      | 0.0290     | 0.0130 | 169      | 0.9348 | 0.3005 | 169      |
| 2017 | 0.0669     | 0.0243 | 322      | 0.0508     | 0.0220 | 322      | 0.0295     | 0.0212 | 322      | 1.1663 | 0.4260 | 322      |
| 2018 | 0.0676     | 0.0492 | 75       | 0.0505     | 0.0372 | 75       | 0.0235     | 0.0165 | 75       | 1.3051 | 0.1609 | 75       |
| 2019 | 0.2392     | 0.0974 | 233      | 0.1791     | 0.0721 | 233      | 0.0728     | 0.0296 | 233      | 1.4773 | 0.1506 | 233      |
| 2020 | 0.1257     | 0.1070 | 268      | 0.0877     | 0.0761 | 268      | 0.0358     | 0.0300 | 268      | 1.5422 | 0.2034 | 268      |

## Tablas de datos de agosto

Tabla 29. Datos mensuales de agosto del PFR, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2002 | 0.0850     | 0.0591 | 1507     | 0.0620     | 0.0562 | 1507     | 0.0333     | 0.0566 | 1507     | 1.3746 | 0.2989 | 1505     |
| 2003 | 0.0627     | 0.0244 | 4923     | 0.0476     | 0.0218 | 4923     | 0.0213     | 0.0208 | 4923     | 1.4458 | 0.4304 | 4922     |
| 2004 | 0.0677     | 0.0260 | 2478     | 0.0504     | 0.0243 | 2478     | 0.0224     | 0.0247 | 2478     | 1.5111 | 0.3594 | 2478     |
| 2005 | 0.0542     | 0.0290 | 1199     | 0.0408     | 0.0284 | 1199     | 0.0234     | 0.0308 | 1199     | 1.4766 | 0.5250 | 1181     |
| 2006 | 0.0697     | 0.0569 | 1286     | 0.0472     | 0.0392 | 1286     | 0.0333     | 0.0496 | 1286     | 1.3489 | 0.5494 | 1286     |
| 2007 | 0.0714     | 0.0271 | 2589     | 0.0502     | 0.0210 | 2589     | 0.0188     | 0.0169 | 2589     | 1.7205 | 0.2700 | 2587     |
| 2009 | 0.1286     | 0.0309 | 4449     | 0.1032     | 0.0230 | 4449     | 0.0481     | 0.0101 | 4449     | 1.1865 | 0.1036 | 4449     |
| 2010 | 0.0601     | 0.0097 | 739      | 0.0453     | 0.0074 | 739      | 0.0195     | 0.0039 | 739      | 1.3883 | 0.0841 | 739      |
| 2011 | 0.0913     | 0.0265 | 3713     | 0.0631     | 0.0210 | 3713     | 0.0300     | 0.0180 | 3713     | 1.4232 | 0.2924 | 3713     |
| 2012 | 0.0922     | 0.0313 | 4169     | 0.0684     | 0.0239 | 4169     | 0.0289     | 0.0094 | 4169     | 1.3939 | 0.1920 | 4169     |
| 2013 | 0.0673     | 0.0189 | 2114     | 0.0526     | 0.0153 | 2114     | 0.0226     | 0.0098 | 2114     | 1.3857 | 0.2871 | 2114     |
| 2014 | 0.1219     | 0.0329 | 5452     | 0.0858     | 0.0236 | 5452     | 0.0359     | 0.0131 | 5452     | 1.4696 | 0.1834 | 5452     |
| 2015 | 0.0684     | 0.0406 | 6710     | 0.0480     | 0.0276 | 6710     | 0.0186     | 0.0105 | 6710     | 1.5558 | 0.1731 | 6710     |
| 2016 | 0.0761     | 0.0620 | 4721     | 0.0530     | 0.0430 | 4721     | 0.0197     | 0.0150 | 4721     | 1.5820 | 0.1412 | 4721     |
| 2017 | 0.0688     | 0.0324 | 3100     | 0.0504     | 0.0268 | 3100     | 0.0199     | 0.0117 | 3100     | 1.5286 | 0.1253 | 3100     |
| 2018 | 0.1303     | 0.1216 | 4310     | 0.0941     | 0.0967 | 4310     | 0.0407     | 0.0419 | 4310     | 1.4264 | 0.0934 | 4310     |
| 2019 | 0.2041     | 0.1028 | 4343     | 0.1872     | 0.0481 | 4343     | 0.0673     | 0.0363 | 4343     | 1.3665 | 0.1139 | 4343     |

Tabla 30. Datos mensuales de agosto del SP1A, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2004 | 0.0837     | 0.0024 | 40       | 0.0666     | 0.0025 | 40       | 0.0286     | 0.0051 | 40       | 1.3983 | 0.2219 | 40       |
| 2005 | 0.0243     | 0.0056 | 23       | 0.0212     | 0.0050 | 23       | 0.0052     | 0.0049 | 23       | 2.8600 | 1.9683 | 23       |
| 2006 | 0.0440     | 0.0109 | 605      | 0.0343     | 0.0078 | 605      | 0.0185     | 0.0030 | 605      | 1.1958 | 0.1166 | 605      |
| 2007 | 0.0767     | 0.0293 | 622      | 0.0518     | 0.0189 | 622      | 0.0234     | 0.0076 | 622      | 1.5135 | 0.0962 | 622      |
| 2008 | 0.7807     | 2.5497 | 1648     | 0.0626     | 0.0270 | 1648     | 0.0276     | 0.0093 | 1648     | 1.5487 | 0.1634 | 1648     |
| 2009 | 0.1187     | 0.3205 | 3855     | 0.0967     | 0.0250 | 3855     | 0.0496     | 0.0112 | 3855     | 1.0041 | 0.0841 | 3855     |
| 2010 | 0.9931     | 2.9527 | 5679     | 0.0292     | 0.0081 | 5679     | 0.0181     | 0.0045 | 5679     | 1.3646 | 0.1697 | 5679     |
| 2011 | 0.0827     | 0.0132 | 4675     | 0.0522     | 0.0082 | 4675     | 0.0268     | 0.0055 | 4675     | 1.3170 | 0.1689 | 4675     |
| 2012 | 0.0752     | 0.0245 | 3338     | 0.0516     | 0.0170 | 3338     | 0.0237     | 0.0064 | 3338     | 1.4831 | 0.1948 | 3338     |
| 2013 | 0.0486     | 0.0171 | 2877     | 0.0378     | 0.0121 | 2877     | 0.0188     | 0.0056 | 2877     | 1.3309 | 0.1834 | 2877     |
| 2014 | 0.0924     | 0.0287 | 4399     | 0.0731     | 0.0201 | 4399     | 0.0268     | 0.0076 | 4399     | 1.6429 | 0.1775 | 4399     |
| 2015 | 0.0720     | 0.0431 | 5043     | 0.0565     | 0.0301 | 5043     | 0.0268     | 0.0119 | 5043     | 1.1416 | 0.2147 | 5043     |
| 2016 | 0.2206     | 1.2007 | 6076     | 0.0524     | 0.0417 | 6076     | 0.0223     | 0.0153 | 6076     | 1.3173 | 0.2167 | 6076     |
| 2017 | 0.0566     | 0.0201 | 2889     | 0.0398     | 0.0159 | 2889     | 0.0130     | 0.0066 | 2889     | 1.8476 | 0.2495 | 2889     |
| 2018 | 0.1279     | 0.1508 | 4897     | 0.0986     | 0.1242 | 4897     | 0.0388     | 0.0543 | 4897     | 1.6355 | 0.2143 | 4897     |
| 2019 | 0.1917     | 0.0106 | 110      | 0.1547     | 0.0064 | 110      | 0.0690     | 0.0033 | 110      | 1.2813 | 0.0521 | 110      |
| 2020 | 0.1160     | 0.6593 | 6790     | 0.0554     | 0.0196 | 6790     | 0.0210     | 0.0084 | 6790     | 1.5473 | 0.1208 | 6790     |

Tabla 31. Datos mensuales de agosto del CIMEL AWIPEV, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2014 | 0.1219     | 0.0329 | 5452     | 0.0858     | 0.0236 | 5452     | 0.0359     | 0.0131 | 5452     | 1.4696 | 0.1834 | 5452     |
| 2017 | 0.0750     | 0.0718 | 179      | 0.0564     | 0.0595 | 179      | 0.0233     | 0.0265 | 179      | 1.5143 | 0.1798 | 179      |
| 2018 | 0.1395     | 0.1230 | 242      | 0.1015     | 0.0921 | 242      | 0.0407     | 0.0364 | 242      | 1.5262 | 0.2242 | 242      |
| 2020 | 0.0799     | 0.0412 | 1494     | 0.0570     | 0.0283 | 1494     | 0.0224     | 0.0112 | 1494     | 1.5681 | 0.1316 | 1494     |

Tabla 32. Datos mensuales de agosto del CIMEL Hornsund, incluye las medias, el número de datos de cada año y la desviación típica de cada año del AOD para las diferentes longitudes de onda y del exponente de Ångström.

| Año  | AOD 368 nm |        |          | AOD 500 nm |        |          | AOD 862 nm |        |          | AE     |        |          |
|------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|      | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media      | sd     | Nº datos | Media  | sd     | Nº datos |
| 2005 | 0.1075     | 0.0260 | 10       | 0.0792     | 0.0189 | 10       | 0.0393     | 0.0061 | 10       | 1.2029 | 0.1555 | 10       |
| 2006 | 0.0584     | 0.0089 | 21       | 0.0386     | 0.0078 | 21       | 0.0174     | 0.0052 | 21       | 1.4635 | 0.1359 | 21       |
| 2007 | 0.1640     | 0.0220 | 10       | 0.1392     | 0.0253 | 10       | 0.0994     | 0.0252 | 10       | 0.6339 | 0.1479 | 10       |
| 2008 | 0.1175     | 0.0479 | 217      | 0.0849     | 0.0363 | 217      | 0.0361     | 0.0208 | 217      | 1.4936 | 0.2544 | 217      |
| 2009 | 0.1172     | 0.0259 | 181      | 0.0933     | 0.0227 | 181      | 0.0473     | 0.0195 | 181      | 1.1584 | 0.1886 | 181      |
| 2011 | 0.1166     | 0.0293 | 166      | 0.0858     | 0.0248 | 166      | 0.0515     | 0.0201 | 166      | 1.0216 | 0.2134 | 166      |
| 2012 | 0.0995     | 0.0348 | 140      | 0.0768     | 0.0255 | 140      | 0.0385     | 0.0178 | 140      | 1.1808 | 0.3406 | 140      |
| 2013 | 0.0872     | 0.0366 | 172      | 0.0697     | 0.0325 | 172      | 0.0436     | 0.0296 | 172      | 0.8892 | 0.3023 | 172      |
| 2014 | 0.1227     | 0.0486 | 251      | 0.0933     | 0.0349 | 251      | 0.0391     | 0.0170 | 251      | 1.4370 | 0.1994 | 251      |
| 2015 | 0.0827     | 0.0330 | 131      | 0.0592     | 0.0286 | 131      | 0.0286     | 0.0249 | 131      | 1.4674 | 0.3570 | 131      |
| 2016 | 0.0705     | 0.0570 | 124      | 0.0518     | 0.0404 | 124      | 0.0314     | 0.0164 | 124      | 0.8707 | 0.4078 | 124      |
| 2017 | 0.0912     | 0.0563 | 1140     | 0.0659     | 0.0448 | 1140     | 0.0265     | 0.0199 | 1140     | 1.5784 | 0.2063 | 1140     |
| 2018 | 0.1386     | 0.1268 | 184      | 0.1090     | 0.1034 | 184      | 0.0497     | 0.0507 | 184      | 1.3647 | 0.2374 | 184      |
| 2019 | 0.2508     | 0.0618 | 181      | 0.1985     | 0.0494 | 181      | 0.0861     | 0.0222 | 181      | 1.3388 | 0.0904 | 181      |
| 2020 | 0.0828     | 0.0395 | 400      | 0.0610     | 0.0274 | 400      | 0.0287     | 0.0102 | 400      | 1.2822 | 0.2952 | 400      |