



Universidad de Valladolid

Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias



Máster en Física  
Especialidad en Atmósfera y Clima

Trabajo Fin de Máster

**Precisión y Exactitud de Simulaciones de  
Radiancia de Cielo Mediante su  
Comparación con Medidas  
Experimentales**

Autora: Patricia Martín Sánchez  
Tutores: Roberto Román Díez  
David Mateos Villán

Valladolid, a 23 de septiembre de 2020

Este Trabajo Fin de Máster ha sido depositado en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid para su defensa.

*Trabajo Fin de Máster  
Máster en Física  
Especialidad en Atmósfera y Clima*

*Título: Precisión y Exactitud de Simulaciones de Radiancia de Cielo Mediante su Comparación con Medidas Experimentales*

*Autora:* Patricia Martín Sánchez  
*Tutores:* Roberto Román Díez  
David Mateos Villán  
Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica  
Grupo de Óptica Atmosférica  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Valladolid

*Quisiera agradecer en primer lugar a mis tutores por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de la realización de este trabajo. Gracias a Roberto por toda la ayuda, tiempo y apoyo que me ha dado en todo este proceso. Si este trabajo ha podido seguir adelante durante el periodo de confinamiento ha sido gracias a la dedicación incondicional con sus alumnos. Gracias también a David, que pese a todo el trabajo y diferentes tareas que tenía siempre a su espalda, conseguía sacar un rato para resolver mis dudas. Sin él, probablemente no estaría ahora aquí y este trabajo no existiría, pues escogí esta rama gracias a él.*

*Me gustaría agradecer a todos y cada uno de los integrantes del Grupo de Óptica Atmosférica (GOA) de la Universidad de Valladolid, que no sólo me acogieron con los brazos abiertos desde el primer día, si no que he podido aprender muchísimo de todos ellos y me han apoyado sin reservas durante todo este proceso.*

*También me gustaría dar las gracias a mis padres por su apoyo. Ellos me dieron la base para ser quien soy ahora.*

*No puedo dejar de mencionar a mis amigos, que han conseguido que no perdiera el juicio gracias a sus llamadas y quedadas online. Esos ratos de desconexión han sido clave.*

*Por último, no puedo dejar de agradecerle por todo a Mario. Ha sabido tranquilizarme en los peores momentos y disfrutar de las sonrisas en los buenos. Gracias a su apoyo este trabajo ha salido adelante.*

*Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto ePOLAAR (ref. RTI2018-097864 B-I00), del ministerio de Ciencia Innovación y Universidades, y la convocatoria de ayudas para personal técnico de apoyo (ref. PTA2018-016311-I) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.*



# Resumen

La radiación solar que llega a la Tierra es responsable de multitud de fenómenos dignos de estudio y puede verse afectada por factores astronómicos y atmosféricos. Esta radiación presenta una alta variabilidad y, en ocasiones, su medida puede ser compleja o consumir un tiempo o recursos de los cuales puede no disponerse. Las herramientas de simulación de distintos fenómenos como alternativa a la toma directa de medidas ha probado ser una alternativa viable en muchos campos, capaz de ahorrar tiempo y de ofrecer datos de calidad.

El objetivo de este trabajo es averiguar la precisión y exactitud del programa “libRadtran” para simular correctamente la radiancia que llega a la superficie de la Tierra en condiciones sin nubosidad. Para ello, se van a comparar las medidas de radiancia simuladas obtenidas por dicho programa, con las obtenidas por un fotómetro solar situado en la localidad de Valladolid. Las simulaciones se realizarán para las condiciones conocidas en Valladolid en el periodo enero-marzo 2020.

La toma de datos reales se obtiene de un fotómetro perteneciente a la red AERONET (Aerosol Robotic Network) e instalado en la terraza de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid. Será clave toda la información acerca de las propiedades de los aerosoles y vapor de agua que aporta dicho instrumento para una correcta caracterización de la atmósfera en las simulaciones a realizar.

La simulación en “libRadtran” ha sido configurada mediante dichos archivos para ser lo más similar posible a las condiciones reales de los días que se querían simular. En este trabajo se han realizado un total de 170 simulaciones y los datos de las mismas han sido adquiridos, procesados, y manipulados mediante una rutina escrita en MATLAB. La comparación final de los valores simulados y los valores reales se ha realizado utilizando rutinas programadas en dicha plataforma de la misma manera.

Los datos que se han obtenido reflejan la radiancia obtenida para varios días a lo largo de los primeros meses del año 2020, y han sido tratados para eliminar medidas que estén contaminadas por nubes parciales y que no se pueden usar en la comparación. El estudio se ha realizado en función de las longitudes de onda disponibles en el fotómetro (440, 675, 870, 1020 nm) y del ángulo de “scattering”. Se ha realizado un análisis estadístico de la comparación entre simulaciones y medidas experimentales.

Las principales conclusiones que se pueden obtener de este trabajo son que la simulación con “libRadtran” ofrece un sistema preciso, en el que, aunque funciona mejor para algunas longitudes de onda, las discrepancias generales son bajas. Además, la integración con MATLAB permite realizar modificaciones sucesivas al programa y calcular estos resultados para otras otras condiciones de aerosol, vapor de agua además de diferentes parámetros.



# Abstract

Solar radiation that reaches Earth is responsible for many essential phenomena and it can be affected by astronomical and atmospheric factors. This radiation has an enormous variability, and its measurement can sometimes be complex and consume time or resources which may not be available at the moment. Simulation tools can be used as a viable alternative to direct measuring, providing good quality data and saving time.

The objective of this research is to evaluate the precision and accuracy of the atmospheric simulation program “libRadtran” when used to simulate the radiance that reaches the surface of the Earth under non-cloudy conditions. For this, some simulated radiance values obtained with the program will be compared with solar radiance values measured by a photometer in Valladolid. Simulations will be done under known conditions for Valladolid between January and March 2020.

The real measurements are obtained from a photometer belonging to the AERONET network which is installed on the terrace of the Science Faculty of the University of Valladolid. The information about the aerosol and water vapour properties that the instrument is able to provide will be key for the proper characterization of the atmosphere for the simulations.

The simulation in “libRadtran” has been configured using these files in order to be as similar as possible to the real conditions of the days in which the measures were taken. In total, 170 simulations have been carried out and the obtained data has been acquired, processed, and manipulated through a written routine in MATLAB. The final comparison of the simulated values and the measured values has been performed using routines programmed in MATLAB as well.

The data reflect the radiance obtained for several days throughout the first months of the year 2020, and have been treated to remove measures that were affected by partial clouds and that cannot be used at the comparison. The study has been performed according to the different wavelengths available at the photometer (440, 675, 870, 1020 nm) and the scattering angle. An statistic analysis has been carried out between the experimental measures and the simulations.

The main conclusions that can be obtained from this work are that the simulation with “libRadtran” offers a precise system, in which, although the program works better for some wavelengths, the overall discrepancies are low. Also, the proposed integration with MATLAB allows successive modifications to the program and the calculation of these results for other conditions.





# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La radiación solar . . . . .	1
1.1.1. Factores que afectan a la radiación . . . . .	3
1.1.1.1. Factores astronómicos . . . . .	3
1.1.1.2. Factores atmosféricos . . . . .	5
1.2. Transferencia radiativa . . . . .	8
1.3. Objetivos del trabajo . . . . .	9
<b>2. Instrumentación y datos</b>	<b>11</b>
2.1. AERONET . . . . .	11
2.2. Instrumentación . . . . .	12
2.2.1. Proceso de medida . . . . .	13
2.2.2. Proceso de calibración . . . . .	13
2.2.3. Datos . . . . .	14
2.3. Obtención de los datos atmosféricos . . . . .	16
<b>3. Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”</b>	<b>21</b>
3.1. Consideraciones sobre la ecuación de transferencia radiativa . . . . .	21
3.2. “uvspec” . . . . .	22
3.2.1. Fichero de entrada (input) . . . . .	24
3.2.1.1. Resolución de la longitud de onda . . . . .	24
3.2.1.2. Fuente . . . . .	27
3.2.1.3. Geometría . . . . .	27
3.2.1.4. Atmósfera . . . . .	29
3.2.2. Elección del solucionador de la ecuación de transferencia radiativa	35
3.2.3. Salidas del programa . . . . .	36
3.3. Redacción de los “input” . . . . .	37
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>43</b>
4.1. Muestreo de las simulaciones . . . . .	43
4.2. Representación de almucantares simulados . . . . .	43
4.3. Parámetros estadísticos comparativos entre simulación y mediciones de radiancia . . . . .	47
<b>5. Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>
<b>Anexo</b>	<b>59</b>



# Capítulo 1

## Introducción

El Sol es la estrella central de nuestro Sistema Solar alrededor de la cual orbitan todos los elementos que forman parte de él, y es la más cercana a nuestro planeta y, por lo tanto, la que más influye sobre la vida en la Tierra. Gracias a esta estrella, la vida ha podido desarrollarse en este planeta, y, en última instancia, nosotros estamos aquí ahora. El Sol es el responsable de calentar la Tierra, y su combinación con la atmósfera regula la temperatura y la hace habitable. También es el responsable de proporcionar la energía que muchos procesos biológicos necesitan para tener lugar, e incluso, durante algún tiempo, sirvió de inspiración para que las civilizaciones antiguas desarrollaran su cultura alrededor suyo.

En este primer capítulo, se explorarán las propiedades principales de la radiación solar que llega a la Tierra que son relevantes para este trabajo y se expondrán los conceptos y circunstancias principales que han motivado a la realización de este trabajo. También se explicarán los objetivos del mismo y la estructura que se seguirá.

### 1.1. La radiación solar

El Sol es una estrella enana amarilla de tipo G2, lo que indica que su temperatura oscila entre 5200 y 6000 K y se encuentra localizada entre 147 y 152 millones de kilómetros de la Tierra, según el punto en el que nos encontremos de su órbita elíptica [1].

El Sol se comporta como un cuerpo negro cuya superficie posee una temperatura media de 5790 K, y posee un espectro de emisión electromagnético que responde a la Ley de Planck. La potencia radiativa del Sol que llega a la tierra por unidad de superficie se expresa mediante la irradiancia  $I$ , y esta varía según la longitud de onda  $\lambda$  [2].

El espectro radiativo del Sol comienza por debajo de los 250 nm y se extiende hasta más allá de los 2500 nm, aproximadamente. A la región comprendida entre los 400 y los 720 nm se la conoce como región o espectro visible, y es al que son sensibles nuestros ojos. Longitudes de onda por debajo de 400 nm conforman el espectro ultravioleta (UV), mientras que longitudes de onda superiores conforman las radiaciones infrarrojas [3]. Por encima de estas, aunque no emitidas por el Sol se encontrarían las microondas y de radio.

## 1.1. La radiación solar

Como puede verse en la Figura 1.1, el espectro radiativo del Sol se diferencia entre espectro radiativo extraterrestre, que es aquel que alcanza las capas más altas de la atmósfera, y espectro radiativo en superficie, que es aquel que llega a la Tierra, una vez atravesada la atmósfera. Como puede verse, este es menor, ya que este ha sufrido fenómenos de absorción selectiva de gases en algunas bandas, y de dispersión o “scattering”.

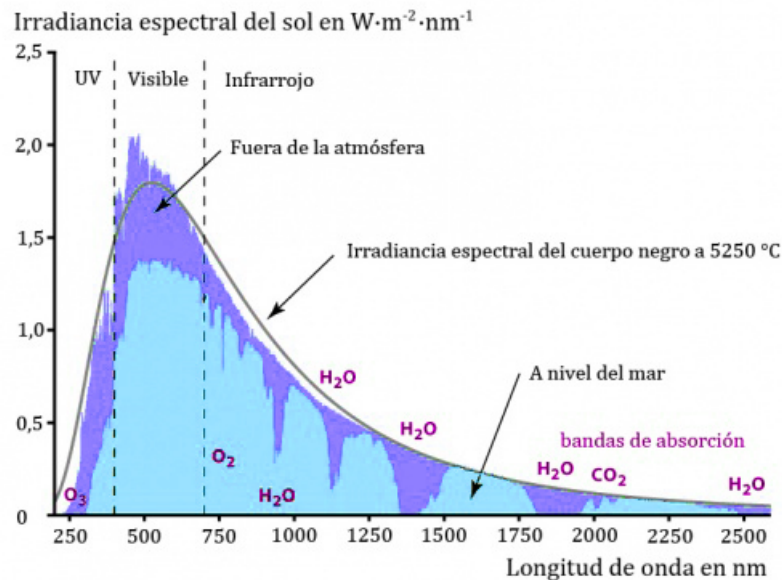


Figura 1.1: Espectro solar extraterrestre e irradiancia solar horizontal en superficie según la longitud de onda.

Como se observa en la imagen, los valores máximos de la irradiancia solar se presentan en la región del espectro visible en ambos casos (entre 400 y 700 nm). Puede percibirse también en la irradiancia solar en la superficie la presencia de ciertas longitudes de onda en las que su valor disminuye notablemente o incluso llegando a desaparecer. Estas corresponden a las bandas de absorción del vapor de agua, ozono y del dióxido de carbono, entre otras.

Para obtener un valor total de la potencia radiativa del Sol que llega a la Tierra, pueden integrarse los valores del espectro, tanto extraterrestre, como en superficie, y obtenerse una medida de la irradiancia total solar de onda corta (SW). El valor de la irradiancia solar total de onda corta extraterrestre que incide perpendicularmente sobre la Tierra cuando esta se encuentra a una distancia de 1 U.A. (Unidad Astronómica) del Sol se conoce como constante solar y su valor es de  $1366,1 W m^{-2}$  [3].

Este valor de irradiancia solar total de onda corta extraterrestre, o constante solar, es muy utilizado para el cálculo, por ejemplo, del dimensionado de paneles solares para la industria y la construcción, ya que estos necesitan conocer la cantidad de energía que van a poder obtener del Sol para cumplir sus funciones en un momento concreto del tiempo, y utilizan esta constante como base para cálculos posteriores en dichas disciplinas, por lo que su conocimiento resulta muy apropiado.

Sin embargo, este valor puede verse afectado por fenómenos de distinto tipo, por lo que el estudio de estos factores que afectan a la radiación es igualmente de gran

## Introducción

---

interés. Aunque no va a entrar a formar parte de este estudio, es interesante resaltar aquí que el Sol no emite siempre la misma cantidad de energía, si no que tiene sus propios ciclos internos; sin embargo, se estima que debido a estos ciclos, la variación en la radiación que emite el Sol es inferior a 0,25 %, por lo que no serán tomados en cuenta.

### 1.1.1. Factores que afectan a la radiación

Podemos diferenciar los siguientes tipos de factores que afectan a la radiación que llega a la Tierra en un momento concreto:

- Factores astronómicos
- Factores atmosféricos

#### 1.1.1.1. Factores astronómicos

Los factores astronómicos hacen referencia a aquellos parámetros que rigen la posición relativa entre la Tierra y el Sol. Estos factores son la distancia Tierra-Sol y el ángulo cenital solar (SZA, solar zenith angle).

Como ya se ha mencionado anteriormente, la distancia entre la Tierra y el Sol varía entre 147 y 152 millones de kilómetros, y esta variación va a producir una atenuación, o un incremento de la radiación solar que llega a la Tierra en cada momento. Esta atenuación va a ser proporcional al cuadrado de la distancia en la que se encuentren en el momento de estudio y una distancia relativa de referencia de 1 U.A. ( $1,49E+11$  m).

Según Iqbal [4], se define un valor de excentricidad Tierra-Sol ( $E_0$ ), correspondiente al cuadrado del cociente entre la distancia de 1 U.A. y la distancia Tierra-Sol ese día. Conocido este valor, la radiación proveniente del Sol un día sería la correspondiente a la que llegaría a una distancia Tierra-Sol de 1 U.A. multiplicada por  $E_0$ .

Estos valores del coeficiente de excentricidad oscilan entre 0,967 y 1,033 para las posiciones extremas de la Tierra en la órbita solar (afelio y perihelio), por lo que se estima que no tiene gran influencia, ya que sólo modifica la radiación extraterrestre un 6,6% como máximo entre ambos puntos extremos, como se refleja en la Figura 1.2.

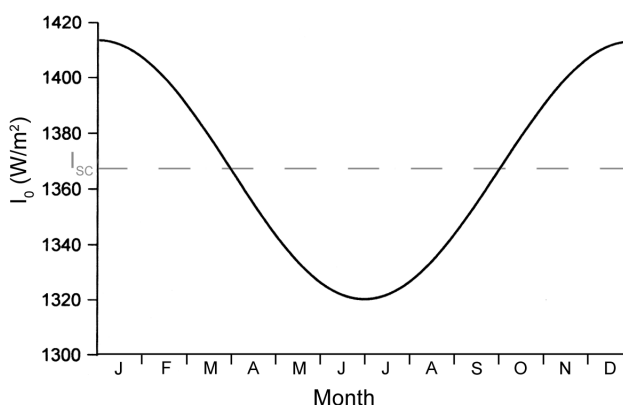


Figura 1.2: Variación de la irradiancia solar según el mes del año.

## 1.1. La radiación solar

El SZA varía entre un valor de  $0^\circ$ , cuando el sol está en el cenit, y  $90^\circ$  cuando está en el horizonte. Este ángulo solar cenital se calcula como el ángulo entre la línea del cenit y una línea dirigida hacia el sol, ambas trazadas desde una localidad concreta en la superficie. La variación entre este máximo en el cenit y el valor nulo al principio y al final del día se desarrollaría siguiendo una ley coseno, por lo que el máximo valor posible teórico de radiación se alcanzaría cuando el Sol se encontrara en el cenit; y un valor nulo de radiación, cuando el sol se escondiera detrás del horizonte.

Este mismo cálculo serviría para tener en cuenta la radiación incidente sobre superficies no horizontales, como por ejemplo, la radiación incidente en superficies verticales, como muros, o inclinadas, como cubiertas de edificios.

De acuerdo con la Figura 1.3, la irradiancia ( $I_{0h}$ ) en un plano distinto al plano horizontal paralelo a la superficie terrestre se calcularía como

$$I_{0h} = I_0 \cos(\theta_Z) \quad (1.1)$$

donde  $\theta_Z$  es el ángulo solar descrito anteriormente, o la inclinación de la superficie de referencia, o el ángulo relativo entre el Sol y la misma; e  $I_0$  es la irradiancia extraterrestre en un plano horizontal.

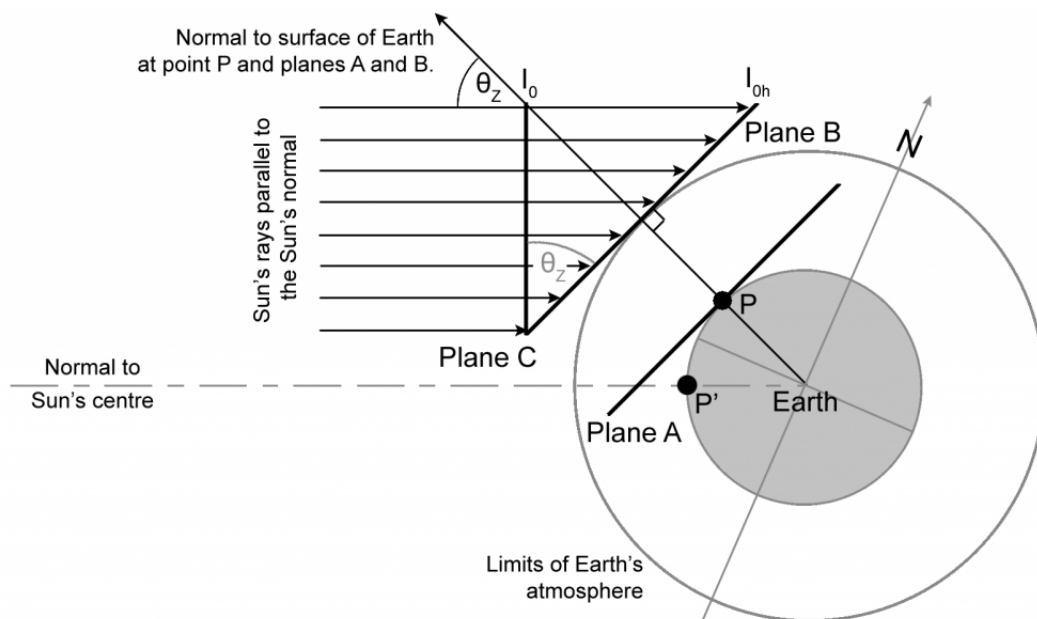


Figura 1.3: Ley del coseno para la irradiancia. Fuente, Wenham, 2013 [5]

Si hablamos de irradiancia total solar, los valores integrados a lo largo de distintos meses del año, teniendo en cuenta la distancia Tierra-Sol, el ángulo solar cenital, y la inclinación de la superficie de medida, de los que hemos hablado por el momento, son, para una superficie horizontal, y para una superficie perpendicular al Sol en todo momento, y como puede verse en la Figura 1.4, respectivamente:

## Introducción

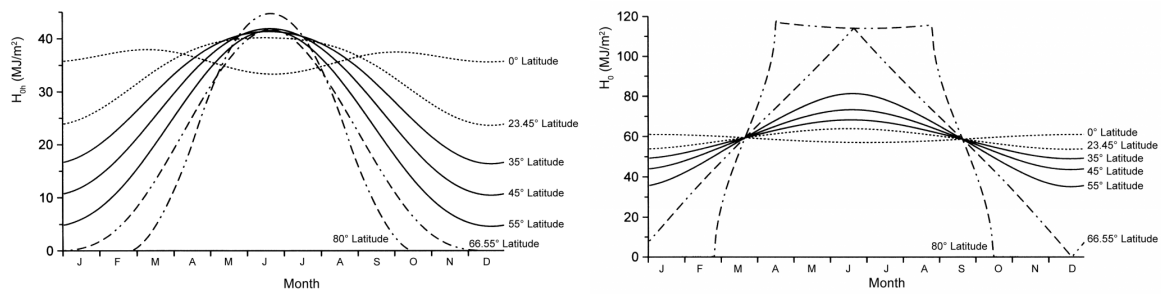


Figura 1.4: Irradiancia total para una superficie horizontal y para una superficie perpendicular al Sol según la latitud. Fuente: Wenham, 2013 [5]

### 1.1.1.2. Factores atmosféricos

Hasta el momento en el que alcanza la atmósfera, la radiación solar procedente del Sol no ha sufrido ninguna alteración; sin embargo, al entrar en contacto con esta, interactúa con sus componentes físicos (gases, nubes y aerosoles), de tal manera que es absorbida y dispersada en otras direcciones, descomponiéndose sus componentes en dos: radiación directa y radiación difusa.

Se entiende como radiación directa aquella que alcanza la superficie terrestre manteniendo la dirección marcada por el SZA y el acimut solar, sin haber sufrido dispersión; y se conoce como radiación difusa la que alcanza la superficie desde cualquier dirección que no sea la de la directa, por haber sido dispersada por la atmósfera. La radiación difusa a su vez, puede dividirse en radiación difusa hacia arriba, reflejada; o radiación difusa hacia abajo (Figura 1.5).

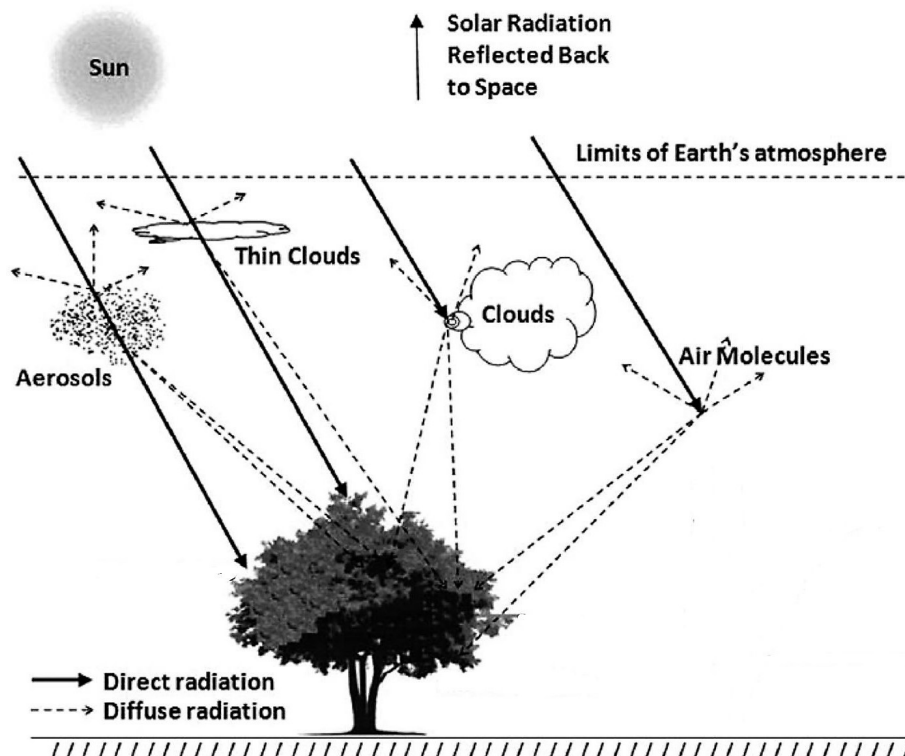


Figura 1.5: Descomposición atmosférica de la radiación

Cabe hacer ahora una distinción, sobre la forma en la que estas radiaciones son medidas, ya que da lugar a dos conceptos distintos: irradiancia, que ya se ha definido, y flujo actínico. La irradiancia total solar es la integración de los espectros radiativos, o radiaciones directas y difusas, sobre una superficie, o plano; sin embargo, el flujo actínico se define como la integración de dichos factores de forma esférica, en cada punto del espacio. Las unidades de la irradiancia son por lo tanto  $W/m^2$ , mientras que las del flujo actínico son  $quantacm^{-2}s^{-1}$ .

### Gases:

La atmósfera es la masa gaseosa que gravita alrededor de nuestro planeta y el aire que la compone es una mezcla mecánica de gases que no reaccionan entre sí, en proporciones notablemente constantes hasta los 80 km de altura. Está constituida en un 99,98% por nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono; y además de estos gases, también están presentes otros gases como el criptón, neón, xenón, helio e hidrógeno, aunque en muy pequeñas cantidades.

Tabla 1.1: Composición de la atmósfera

#### Composición de la atmósfera actual

Gases	%
Nitrógeno ( $N_2$ )	78,08
Oxígeno ( $O_2$ )	20,95
Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )	0,0356
Vapor de agua ( $H_2O$ )	0,001
Metano ( $CH_4$ )	0,00018
Óxido nitroso ( $NO$ )	0,00003
Clorofluorocarbonos ( $CFC$ )	0,00000001
Ozono ( $O_3$ )	0 - 0,1
Argón ( $Ar$ )	0,93
Neón ( $Ne$ )	0,0018
Helio ( $He$ )	0,0005
Kriptón ( $Kr$ )	Trazas
Xenón ( $Xe$ )	Trazas
Hidrógeno ( $H_2$ )	0,00005

Además de estos gases principales, están también presentes en la atmósfera el vapor de agua (variable en el espacio y tiempo), el cual es vital para muchos procesos biológicos, y aerosoles de distintos tipos en cantidades significativas (partículas de sal marina, polvo, humo,...). Estos pueden ser naturales o creados por el hombre y se desarrollarán más adelante. Todos estos componentes varían con la altura, la latitud y la estación.

Los gases reaccionan con la radiación solar y la dispersan, en un fenómeno llamado dispersión o “scattering” molecular, o “scattering” de Rayleigh [2]. Este fenómeno de que un fotón sea redirigido una vez impacta contra una molécula o partícula es representado de forma estadística por la función de fase de esa sustancia, y es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda [6].



## Introducción

---

$$\tau_R(\lambda) = \frac{24\pi^3(n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2 (n^2 + 2)^2} \left( \frac{6 + 3\rho}{6 - 7\rho} \right) \cdot \frac{PA}{m_a g} \quad (1.2)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del aire,  $\lambda$  se expresa en centímetros,  $N_s$  es  $2,546899E+23 \text{ molculasc}m^{-3}$  a 288,15 K y 1013,25 mb,  $\rho$  el ratio de despolarización,  $P$  es la presión superficial del sitio de medición,  $A$  es el número de Avogadro,  $g$  la gravedad y  $m_a$  es el peso molecular medio del aire seco [7].

El otro fenómeno en el que participan los gases es en la absorción, ya que estos gases van a absorber ciertas longitudes de ondas de forma selectiva. De todos los gases que componen la atmósfera, los que principalmente contribuyen a este fenómeno son: el ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono.

- **Ozono:** El ozono ( $O_3$ ) se encuentra principalmente en la estratosfera, entre los 10 y los 50km de altura, formando la zona conocida como la capa de ozono, y absorbe principalmente la radiación solar UV-C (228-280 nm) y UV-B (280-315 nm).
- **Vapor de agua:** El vapor de agua ( $H_2O$ ) se encuentra a una altura inferior, en la troposfera y se forma por la evaporación del agua en la superficie de la Tierra. Estas partículas absorben principalmente radiación IR.
- **Dióxido de carbono:** El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se encuentra desde las capas más bajas de la atmósfera hasta los 40 km de altura y absorbe igualmente en franjas correspondientes al espectro IR.

### Nubes:

Las nubes son volúmenes de aire atmosférico formados por pequeñas gotas de agua o hielo suspendidas en el aire. Las nubes pueden formarse por enfriamiento del aire, añadiendo humedad al mismo o por mezcla de diferentes masas de aire a diferente temperatura.

Las nubes se clasifican por sus formas y su morfología según un método de clasificación introducido en 1803 por Luke Howard. Los diez géneros de nubes se enumeran en la Figura 1.6, junto con sus abreviaturas y símbolos oficiales, tal como se dibujan en los mapas meteorológicos [8].

Las nubes dispersan la radiación incidente mediante dispersión o “scattering” de Mie, que es un tipo de dispersión más compleja que la de los gases, y generalmente producen un efecto final de atenuamiento de la radiación, porque la radiación incidente es retro-dispersada en el sentido contrario de incidencia.

Sin embargo, en ocasiones, puede producirse el conocido como “efecto realce”, que incrementa la radiación difusa en un cielo cubierto y produce que pueda llegar a la superficie terrestre más radiación solar que en un cielo despejado.

De forma normal, un cielo muy cubierto va a ser capaz de atenuar gran parte de la radiación directa (hasta un 93% de la radiación UV) [6].

Genus	Abbreviation	WMO Symbol	USA Symbol
cirrus	Ci		
cirrostratus	Cs		
cirrocumulus	Cc		
altostratus	As		
altocumulus	Ac		
nimbostratus	Ns		
stratus	St		
stratocumulus	Sc		
cumulus	Cu		
cumulonimbus	Cb		

Figura 1.6: Clasificación de las nubes [8].

### Aerosoles:

Los aerosoles se definen como un conjunto de partículas sólidas o líquidas en suspensión en un medio gaseoso [9]. Estas partículas pueden estar a gran altitud sobre la superficie terrestre o estar flotando sobre la atmósfera terrestre, y ejemplos de algunos de estos pueden ser arena del desierto, cristales de sal procedentes del mar, hollín, ...

El comportamiento de los aerosoles es similar al de las nubes: estas partículas presentan absorción y también dispersión de radiación mediante la dispersión o “scattering” de Mie. La probabilidad de que un fotón sea absorbido por un aerosol está relacionada con el espesor óptico de aerosoles por absorción (AAOD), y la probabilidad de que sufra dispersión está en relación de la misma manera con el espesor óptico de aerosoles por dispersión o “scattering” (SAOD). El espesor óptico de aerosoles (AOD) es la suma de ambos y expresa la posibilidad total de la extinción de la radiación al atravesar estas partículas.

## 1.2. Transferencia radiativa

La manera de describir los efectos de absorción, emisión o dispersión que se producen cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera es expresada a través de la ecuación de transferencia radiativa. Esta ecuación explica que cuando una onda electromagnética atraviesa un medio material, existirán fotones que serán absorbidos por el medio, disminuyendo así su energía, otros que serán dispersados en direcciones distintas a la de incidencia, y otros que serán emitidos por parte del medio, aumentando dicha energía.

Esta expresión parte de la ecuación de Boltzmann que describe la distribución de fotones en un gas diluido

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_r(\mathbf{v}f) + \nabla_p(\mathbf{F}f) = Q(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu, t) \quad (1.3)$$

donde  $f(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu, t)$  es la función de distribución de fotones, que varía con la posición, dirección de propagación, frecuencia y tiempo. Las unidades de la función de distribución son  $1/\text{cm}^3 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz}$ .

La variable  $Q(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu, t)$  hace referencia al balance de fotones que intervienen, teniendo en cuenta los fotones que se crean menos los que se absorben.

Por otro lado,  $\nabla_r$  es el operador en el espacio de coordenadas y  $\nabla_p$  en el espacio de momentos.

Asumiendo una ausencia de efectos relativistas (el vector que hace referencia a las fuerzas que intervienen son 0 ( $\mathbf{F} = 0$ )), y un estado estacionario, la ecuación de transferencia radiativa queda reducida a

$$(\hat{n} \cdot \nabla)I(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu) = h\nu Q(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu) \quad (1.4)$$

siendo  $I$  la intensidad de la radiación.

Esta ecuación puede ser considerada como la ecuación de transferencia radiativa para cualquier geometría, y es la que tendremos en cuenta para los siguientes desarrollos en capítulos posteriores.

### 1.3. Objetivos del trabajo

Una vez explicadas las bases teóricas sobre las que se ha fundamentado este trabajo, se plantea la siguiente cuestión: el problema con el que nos enfrentamos día a día es que la medida de la radiación de forma directa mediante instrumentación física puede ser un proceso laborioso, en el que se depende mucho de la climatología y de tener una instrumentación siempre lista y bien calibrada, cuestión que en ocasiones es imposible de tener por tiempo o costo.

La alternativa a la medida directa es la simulación por ordenador de los elementos componentes de la atmósfera que afectan a la radiación para la obtención de una medida simulada de esos valores sobre la superficie. Existen diversos programas que permiten realizar dichos cálculos, aunque en este caso se ha usado “libRadtran”.

El programa “libRadtran” es un paquete de software que permite realizar cálculos sobre transferencia radiativa en la atmósfera. Se trata de un software libre que puede ser adquirido a través de su web: <http://www.libradtran.org>, y con el que es posible modelizar cualquier circunstancia que ocurra en el cielo. Se trata de un programa muy potente que se desarrollará en un capítulo independiente.

Con todo esto, puede establecerse que el objetivo de este trabajo es realizar simulaciones de radiancia solar con el programa “libRadtran” en el que se obtenga la irradiancia solar, afectada bajo ciertas condiciones sin nubosidad. Estas simulaciones obtenidas por el programa serán comparadas con valores de radiancia solar medidos en tierra para cuantificar la exactitud e incertidumbre del modelo de transferencia radiativa.

### **1.3. Objetivos del trabajo**

---

En un primer momento, se pensó para este trabajo realizar simulaciones de radiancia sobre un modelo tridimensional. Los resultados que se querían obtener iban a incluir también un análisis de cómo los diferentes tipos de nubes afectaban a la radiancia que llegaba a los instrumentos de tierra firme, y se iba a intentar averiguar si dichas alteraciones que las nubes habrían causado se podrían corregir de alguna forma dentro de la simulación. Sin embargo, para la implementación de estas correcciones, era necesario una estancia en Ludwig-Maximilians-University, donde se iba a aprender a usar el modelo MYSTIC, y que, lamentablemente, debido a la pandemia de la COVID-19 y a todas las restricciones que ha dado lugar no se ha podido realizar.

La estructura de este trabajo es la siguiente: el segundo capítulo de este trabajo, se explicarán los datos e instrumentos que se utilizarán para obtener las medidas directas con las que luego se compararán las simulaciones. El tercer capítulo introducirá el software “libRadtran” y se detallarán los parámetros utilizados para su configuración, para, a partir de los resultados obtenidos, en el capítulo cuarto, compararlos con los datos físicos y obtener los resultados de exactitud. El quinto y último capítulo se corresponde con las conclusiones obtenidas de esta investigación.

## Capítulo 2

# Instrumentación y datos

El objeto de las simulaciones que se van a llevar a cabo en este trabajo es valorar la precisión que tienen estas en relación con las mediciones tomadas desde la superficie de la Tierra. En este capítulo, se hablará de la instrumentación que se utiliza y el tipo de medidas que se toman desde la superficie.

### 2.1. AERONET

Las medidas de radiación solar para este trabajo han sido tomadas con instrumentación perteneciente a la red AERONET (Aerosol RObotic NETwork). Dicha red es una federación de redes (AERONET norteamericana, PHOTONS de Francia, Aerocan de Canadá, o RIMA, Red Ibérica de Medida de Aerosoles, de España), que utilizan fotómetros para la medida de aerosoles y la caracterización de sus propiedades. Su fundación se produjo en 1998, aunque existen registros previos, y su objetivo es proporcionar una base de datos pública, continua y accesible de propiedades de los aerosoles para su uso en la investigación [10].

La red RIMA nació en el año 2004 para hacerse cargo de los fotómetros instalados en la Península Ibérica, que hasta aquel momento dependían del LOA - Universidad de Lille, y que venían a saturar la infraestructura que existía hasta el momento.

En la actualidad, el Grupo de Óptica Atmosférica (GOA) de la Universidad de Valladolid es el encargado de calibrar los fotómetros de un gran número de estaciones en colaboración con el observatorio de AEMet de Izaña CIAI-AEMET, donde se calibran los fotómetros máster.

Los datos para este trabajo han sido obtenidos de estación de AERONET de Valladolid, que posee los siguientes datos (ver Figura 2.1):

- Latitud: 41°39'49" N
- Longitud: 4°42'21" E
- Altitud (m.s.n.m.): 705 m

## 2.2. Instrumentación

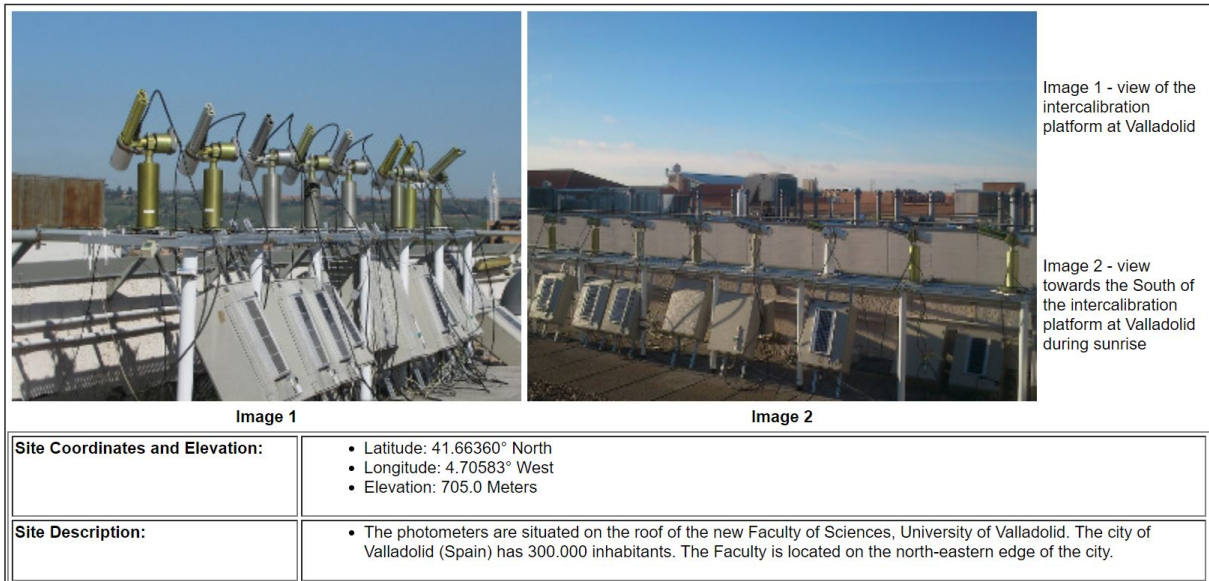


Figura 2.1: Captura de la información de AERONET sobre la estación de Valladolid. [https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/photo\\_db\\_v3/Valladolid.html](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db_v3/Valladolid.html)

La red AERONET ofrece tres tipos de datos, siempre amparados por unos niveles y requisitos de calidad para los instrumentos y las mediciones que estos producen: el nivel 1.0 corresponde a las medidas brutas; el nivel 1.5, a estas medidas tras atravesar un algoritmo automático que elimina las medidas afectadas por la nubosidad; y, por último, el nivel 2.0 son los datos definitivos una vez que el instrumento ha sido post-calibrado después del periodo de medida.

## 2.2. Instrumentación

El instrumento con el cual han sido obtenidos los datos para este trabajo es el fotómetro Cimel-318. Este instrumento es fabricado por la firma francesa *Cimel Electronique*, y se trata de un fotómetro automático portátil.

El fotómetro cuenta con una rueda de filtros que le permiten realizar medidas de radiación a distintas longitudes de onda y está conectado a un robot móvil orientable, que es capaz de posicionarlo apuntando a cualquier posición que se desee, siguiendo trayectorias solares, o en posición de reposo, donde el fotómetro apunta hacia el suelo, evitando la entrada de polvo o lluvia.

Sus características son las siguientes:

- Campo de visión: 1,2°
- Medidas de irradiancia directa: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 936, 1020 y 1640 nm
- Medidas de radiancia del cielo: 440, 675, 870 y 1020 nm (modelos más recientes incluyen 380 y 1640 nm)
- Incertidumbre del espesor óptico de aerosol: 0,01 para longitudes de onda mayores a 440 nm, y 0,02 para el resto

## Instrumentación y datos

- Incertidumbre en la columna de vapor de agua: 0,12 cm
- Exactitud del apuntamiento del acimut y cenital: 0,05°
- Exactitud del apuntamiento a posición del Sol: 0,1°
- Alimentación: panel solar o corriente eléctrica
- Peso total: 15 kg

### 2.2.1. Proceso de medida

Este fotómetro permite automatizar y tomar medidas del cielo de formas distintas. El robot móvil orientable permite que el fotómetro siga el plano solar principal, el almucántar, o incluso, una trayectoria híbrida (ver Figura 2.2). Estas medidas se hacen mirando al sol de forma directa, detectando las cuentas digitales que recibe de él, obteniendo, por tanto, la irradiancia directa del sol. Este instrumento, provisto de una rueda de filtros, permite medir esta irradiancia a diferentes longitudes de onda. Además, estas medidas sirven para inferir, entre otras cosas, en el AOD.

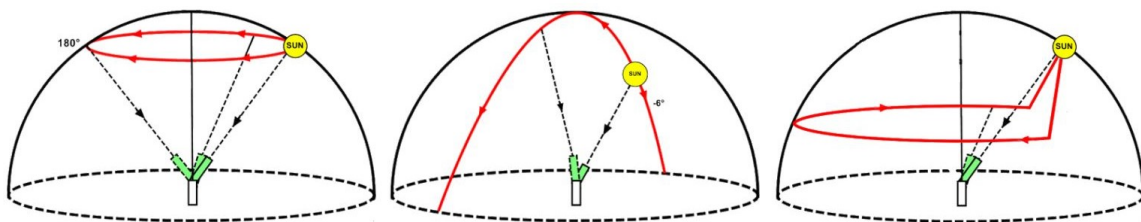


Figura 2.2: Geometrías del fotómetro Cimel. Almucántar, plano principal y plano híbrido [11].

### Plano solar principal

Se entiende como trayectoria solar principal o plano principal, aquel plano perpendicular al horizonte terrestre que contiene al Sol y al cenit.

### Almucántar

El almucántar es aquella trayectoria que describe un círculo en la esfera del cielo paralelo al horizonte a la altura del Sol. Todos los objetos que están en el mismo almucántar tienen la misma altitud.

### Plano híbrido

Es aquel que combina un almucántar para cierta altitud, y el plano principal, una vez que esta es superada.

### 2.2.2. Proceso de calibración

El proceso de calibración de un fotómetro Cimel-318 consta de cinco pasos principales: calibración “sun” y calibración “sky” según se recibe el instrumento, mantenimiento, y finalmente, una segunda calibración tanto “sun” como “sky”.

En el momento en que se recibe el instrumento, se analiza el estado en el que llega y se realizan medidas directas al Sol durante unos días. Cuando los datos que recoge el instrumento y las condiciones meteorológicas son suficientemente buenos para ello, se realiza la calibración “sun”. Posteriormente, se realizan una serie de medidas “sky” gracias a una esfera integrante. Tras tomar y comprobar estas medidas, se da por realizada la calibración “sky”. Esta primera calibración sirve para aplicar una corrección a los datos que se han tomado en las diferentes estaciones durante los, aproximadamente, seis meses anteriores a la llegada del instrumento, ya que es recomendable la calibración de estos una vez al año.

Después del posterior mantenimiento y/o arreglo de los posibles fallos que pudiera tener el instrumento, se vuelve a proceder a una segunda calibración, tanto “sun” como “sky”, que servirá para corregir los datos que tome el instrumento en un futuro.

En ocasiones, si durante el mantenimiento o alguna de las dos calibraciones se detecta algún fallo en alguno de los filtros del fotómetro Cimel, es necesaria hacer una caracterización térmica de éstos para poder conocer el comportamiento en función de la temperatura de cada uno de ellos, y saber si dan problemas a partir de una temperatura en concreto.

Al finalizar todos estos procesos, los instrumentos se envían de vuelta a la instalación que corresponda, finalizando el proceso de calibración en el momento que el instrumento comienza a medir en la estación de destino.

### 2.2.3. Datos

El fotómetro Cimel es capaz de medir la irradiancia directa a través de la cual estima el espesor óptico de aerosoles, además de la radiancia del cielo. Con ambas medidas (espesor óptico de aerosoles y radiancia del cielo), la red AERONET ofrece un amplio catálogo de propiedades ópticas y microfísicas de aerosoles obtenido con algoritmos de inversión. Estos procedimientos permiten inferir dichas cantidades de las medidas iniciales que toma el instrumento. Algunos ejemplos de estas propiedades inferidas son la distribución de tamaños, el albedo de dispersión simple de aerosoles o la función de fase. Se detallan ahora a continuación.

#### Espesor Óptico de Aerosoles (AOD)

Como ya se explicó, el AOD está relacionado con la probabilidad de que un fotón con una incidencia normal sobre la superficie terrestre desaparezca. El AOD depende de la longitud de onda  $\lambda$ , y se puede modelizar mediante dos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la siguiente forma:

$$AOD(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (2.1)$$

donde  $\alpha$  es el exponente de Ångström y  $\beta$ , la turbiedad de Ångström, ambos adimensionales, y  $\lambda$  debe expresarse en micras. El exponente de Ångström  $\alpha$  cuantifica la variación espectral del AOD, la cual está ligada al tamaño de las partículas presentes (a menor  $\alpha$  mayor será el radio de las partículas), y podría ser obtenido mediante la siguiente fórmula, tomando los valores de AOD para dos longitudes de ondas experimentalmente:



$$\alpha = -\frac{\ln\tau_{\lambda_1} - \ln\tau_{\lambda_2}}{\ln\lambda_1 - \ln\lambda_2} \quad (2.2)$$

La turbiedad de Ångström  $\beta$  hace referencia al espesor óptico de aerosoles a 1000 nm y se calcula con la siguiente expresión, una vez conocida  $\alpha$  [9].

$$\beta = \tau_a \cdot \lambda^\alpha \quad (2.3)$$

### Algoritmo de inversión

Como ya se ha mencionado, los algoritmos de inversión son rutinas que permiten inferir las propiedades ópticas y físicas de los aerosoles a través de medidas radiativas. Estos algoritmos se fundamentan en una modelización de la transferencia radiativa hacia adelante, que consiste en poder modelizar las medidas a partir de los datos de los aerosoles, y aplicar después una estrategia de inversión, capaz de realizar las operaciones en sentido contrario, minimizando el error.

De todos los algoritmos creados, se reseñan ahora el creado en primer lugar por King et al. en 1978, que fue el primero que se utilizó. En 1983 y 1996, Nakajima et al. lo mejoraron añadiendo nuevas propiedades, hasta que el 2000, Dubovik y King desarrollaron el algoritmo que se utilizó durante mucho tiempo. En el año 2006, Dubovik et al. lo ampliaron permitiendo su uso para partículas no esféricas [3] [11] [12] [13].

En la actualidad, se ha desarrollado GRASP (Generalized Retrieval of Atmosphere and Surface Properties), que permite la interconexión e inferencia de multitud de medidas para obtener productos de aerosoles más complejos [14].

### Albedo de dispersión simple (SSA)

El albedo de dispersión simple se define como el cociente entre el espesor óptico de aerosoles por dispersión (SAOD) y el espesor óptico de aerosoles por extinción (AOD), y representa la fracción absorbente de un aerosol, frente a la dispersada, y es que cuanto mayor es su valor, menos absorbente es el aerosol presente, correspondiendo a un aerosol completamente no absorbente un SSA de 1 (100 %).

### Función de fase

La función de fase determina la probabilidad de que un fotón tome una dirección determinada al sufrir interacción con una partícula. Para un aerosol, la función de fase posee simetría de revolución y depende de la longitud de onda. La función de fase se expresa mediante la función de Henyey-Greenstein, dependiente de un parámetro de asimetría  $g$ :

$$p_A(\Theta) = \frac{1 - g^2}{[1 - 2g\cos(\Theta) + g^2]^{3/2}} \quad (2.4)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de “scattering”.

### Parámetro de asimetría ( $g$ )

El parámetro de asimetría  $g$  es un valor adimensional utilizado en la función de fase, que varía con la longitud de onda y puede tomar valores entre -1 y 1. Un valor de  $g$  igual a -1 indica que toda la radiación dispersada es redirigida en el sentido opuesto al de incidencia, mientras que un valor de 1 indica que la radiación es dispersada en el mismo sentido que la dirección de incidencia.

## 2.3. Obtención de los datos atmosféricos

La medida que se decidió comparar fue la radiancia en el plano del almucántar en aquellas fechas para las cuales se dispusieran tanto los datos definitivos de irradiancia. Estas medidas reales, junto con los datos de los parámetros necesarios para poder simular la atmósfera correctamente, se obtuvieron desde la página web de AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), ya que estas son de dominio público.

Para acceder a ellas una vez en la página, es necesario navegar por las distintas categorías que aparecen listadas a la izquierda. La medida de los almucántares se obtuvo dentro de la categoría “AEROSOL INVERSIONS”, señalada en la Figura 2.3 en verde, mientras que, como parámetros de simulación, se descargaron las variables de “Profundidad Óptica de Aerosoles - Aerosol Optical Depth”, que se descargó dentro de la categoría de “AEROSOL OPTICAL DEPTH (V3)-SOLAR”, señalada en rojo en la misma Figura, y las variables “Albedo de Dispersión Simple”, “Factor de Asimetría” y “Función de Fase”, que fueron encontradas dentro de la categoría “AEROSOL INVERSIONS”, al igual que los almucántares.

El proceso de descarga continúa seleccionando la estación de la cual quieren obtenerse sus datos. Al realizar este proceso, se presenta una nueva página con un mapa de todas las estaciones que pertenecen a la red AERONET, desde la cual se selecciona la estación de Valladolid (no confundir con Valladolid\_Sci, ya que las coordenadas son diferentes), como puede verse en la Figura 2.4.

Para finalizar el proceso, en cada uno de los casos, el programa nos solicita los datos que deseamos descargar. En el caso primero, se descarga el espesor óptico de aerosoles (AOD), mientras que entrando por la otra ruta, se descargan el resto de parámetros. El proceso termina antes de la descarga con un aviso, así como un contacto de las personas responsables de la estación de la que se están obteniendo los mismos, como puede verse en la Figura 2.5.

Todas las medidas fueron descargadas para las fechas entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de marzo de 2020, siempre y cuando tuviera todos los datos disponibles, y el nivel de datos que AERONET proporcionó, según lo explicado en el capítulo 2, fue el nivel 1.5, debido a que para las fechas que se querían manejar, no había dado tiempo a obtener los datos en el nivel 2.0. Para que los resultados obtenidos fueran más fiables, posteriormente se les ha hecho un filtrado para asegurar la estabilidad de los mismos.

# AERONET

## AEROSOL ROBOTIC NETWORK

+ AEROSOL OPTICAL DEPTH

+ AEROSOL INVERSIONS

+ SOLAR FLUX

+ OCEAN COLOR

+ MARITIME AEROSOL

Web Site Feature AERONET Data Synergy Tool - Access Earth Science data sets for AERONET sites

-Home

Home

+ AEROSOL/FLUX NETWORKS

+ CAMPAIGNS

+ COLLABORATORS

+ DATA

+ LOGISTICS

+ NASA PROJECTS

+ OPERATIONS

+ PUBLICATIONS

+ SITE INFORMATION

+ STAFF

+ SYSTEM DESCRIPTION

+ DRAGON FIREX-AQ

MISSION

The AERONET (Aerosol RObotic Network) project is a federation of ground-based remote sensing aerosol networks established by NASA and PHOTONS (PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire; Univ. of Lille 1, CNES, and CNRS-INSU) and is greatly expanded by networks (e.g., RIMA, AeroSpan, AEROCAN, and CARSNET) and collaborators from national agencies, institutes, universities, individual scientists, and partners. For more than 25 years, the project has provided long-term, continuous and readily accessible public domain database of aerosol optical, microphysical and radiative properties for aerosol research and characterization, validation of satellite retrievals, and synergism with other databases. The network imposes standardization of instruments, calibration, processing and distribution.

AERONET collaboration provides globally distributed observations of spectral aerosol optical depth (AOD), inversion products, and precipitable water in diverse aerosol regimes. Version 3 AOD data are computed for three data quality levels: Level 1.0 (unscreened), Level 1.5 (cloud-screened and quality controlled), and Level 2.0 (quality-assured). Inversions, precipitable water, and other AOD-dependent products are derived from these levels and may implement additional quality checks.

The processing algorithms have evolved from Version 1.0 to Version 2.0 and now Version 3.0. The Version 3 databases are available from the AERONET and PHOTONS web sites. Version 2 data may be downloaded from the web site through 2018 and thereafter upon special request. New AERONET products will be released as new measurement techniques and algorithms are adopted and validated by the AERONET research community. The AERONET web site also provides AERONET-related news, a description of research and operational activities, related Earth Science links, and an AERONET staff directory.

+ Read More



NEWS

23 July 2019  
+ DRAGON FIREX-AQ

12 February 2019  
+ Inversion Uncertainty Estimates and Provisional Lunar AOD Announcement

11 January 2019  
+AERONET Version 3 manuscript published in Atmospheric Measurement Techniques

2 October 2015

- CE318-T Sun-Sky-Lunar spectral photometer is accepted for AERONET use. Extensive testing of the new model Cimel photometer has been completed and is now fully integrated into the AERONET network.

The new model is essentially a new control box that has all the functionality of the current CE318 photometers. It is fully compatible with the existing robots and the latest Version 5 sensor heads (with an upgrade kit). We note the following characteristics:

- Improved solar tracking accuracy and operational range
- Micro-stepping: faster and smoother robot response
- Enhanced measurement scenarios yet data sets are compatible with historic database
- Onboard data storage prevents data loss GPS time and location stamped data
- Communication via serial, USB, cellular and DCS satellite
- Lunar measurements

AERONET will no longer accept previous models as new entries into the network. All current models used in the field will continue to be supported but replacement of the analog models (Version 4) produced before 2004 is encouraged.

+ More Announcements

FEATURES

Figura 2.3: Página web de AERONET y ubicación de las descargas.

## 2.3. Obtención de los datos atmosféricos

Select the Geographic Region of interest:

Geographic Location

Alaska\_and\_Canada ▾

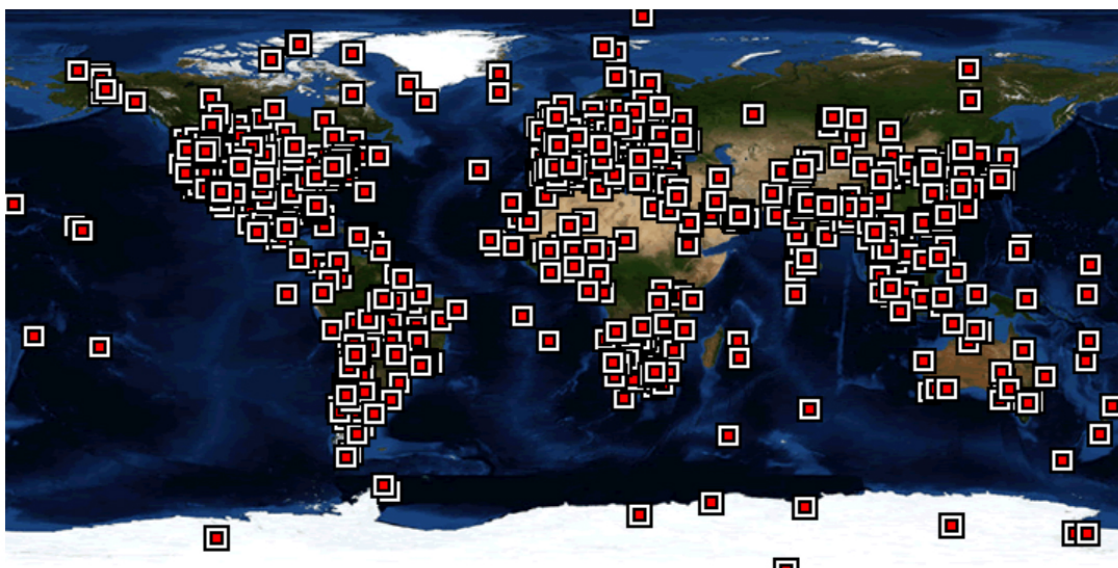
Get Country or State

[Back to World Map](#)

Sites:  Permanent  Campaigns

Total Data (Years):  All  >0.5  >1  >2  >3  >5  >7  >10  >15

Click on the map to zoom and select sites below map for download form.



<a href="#">Upper_Buffalo (35.826N, 93.203W)</a>	<a href="#">UPRM_Lidar_Lab (18.210N, 67.140W)</a>	<a href="#">USC_SEAPRISM (33.564N,118.118W)</a>
<a href="#">USC_SEAPRISM_2 (33.564N,118.118W)</a>	<a href="#">USDA (39.030N, 76.880W)</a>	<a href="#">USDA_ALARC (33.077N,111.973W)</a>
<a href="#">USDA-BARC (39.031N, 76.932W)</a>	<a href="#">USDA-Howard (39.054N, 76.877W)</a>	<a href="#">USGS_Flagstaff_ROLO (35.215N,111.634W)</a>
<a href="#">USM Penang ( 5.358N,100.302E)</a>	<a href="#">Ussuriysk (43.700N,132.163E)</a>	<a href="#">Utsteinen (71.950S, 23.333E)</a>
<a href="#">Valladolid (41.664N, 4.706W)</a>	<a href="#">Valladolid_Sci (41.656N, 4.715W)</a>	<a href="#">Vechernaya_Hill (67.660S, 46.158E)</a>
<a href="#">Venise (45.314N, 12.508E)</a>	<a href="#">Veracruz_MAX_MEX (19.144N, 96.187W)</a>	<a href="#">Victoria_JC ( 1.307N,103.919E)</a>
<a href="#">Vienna_BOKU (48.238N, 16.332E)</a>	<a href="#">Vienna_UNIVIE (48.222N, 16.356E)</a>	<a href="#">Vientiane (17.992N,102.570E)</a>
<a href="#">Villefranche (43.684N, 7.329E)</a>	<a href="#">Vinon (43.709N, 5.759E)</a>	<a href="#">VirginiaTech (37.231N, 80.425W)</a>
<a href="#">Vishkhatnam (17.724N, 83.327E)</a>	<a href="#">Walker_Branch (35.958N, 84.287W)</a>	<a href="#">Wallops (37.933N, 75.472W)</a>

Figura 2.4: Página web de AERONET. Selección de la estación.

# Instrumentación y datos

Click Geographic Region, Country/State or AERONET Site to change site selection:

Geographic Region: Europe | Country/State: Spain | AERONET Site: Valladolid

**Download Data for Valladolid**

Select the start and end time of the data download period:

START: Day/Month/Year 1 JAN 2020 | END: Day/Month/Year 30 JUN 2020

[Data Descriptions](#) | [Data Units](#)

**Note:** Data are not available if the data type is *italicized*

Select the data type(s) using the corresponding check box:

Direct Sun Products	Select
Aerosol Optical Depth (AOD) with Precipitable Water and Angstrom Parameter	Level 1.0 <input type="checkbox"/>
	Level 1.5 <input checked="" type="checkbox"/>
	Level 2.0 <input type="checkbox"/>
Total Optical Depth based on AOD Level*	Level 1.0 <input type="checkbox"/>
	Level 1.5 <input type="checkbox"/>
	Level 2.0 <input type="checkbox"/>
Spectral Deconvolution Algorithm (SDA) Retrievals -- Fine Mode AOD, Coarse Mode AOD, and Fine Mode Fraction	Level 1.0 <input type="checkbox"/>
	Level 1.5 <input type="checkbox"/>
	Level 2.0 <input type="checkbox"/>

Data Format:  All Points  Daily Averages  Monthly Averages

Click Geographic Region, Country/State or AERONET Site to change site selection:

Geographic Region: Europe | Country/State: Spain | AERONET Site: Valladolid

**Download Data for Valladolid**

Select the start and end time of the data download period:

START: Day/Month/Year 1 JAN 2020 | END: Day/Month/Year 30 JUN 2020

[Data Descriptions](#) | [Data Units](#)

**Note:** Data are not available if the data type is *italicized*

Select the data type(s) using the corresponding check box:

Radiance Products (with calibration and temperature correction applied)\*\*

Raw Almucentar

Raw Hybrid

Raw Principal Plane

Raw Polarized Principal Plane (with degree of polarization)

Raw Polarized Almucentar (with degree of polarization)

Raw Polarized Hybrid (with degree of polarization)

\*\*Available using All Points option

Derived Inversion Products

Uncertainty Estimates\*

Spectral Flux

Radiative Forcing

Volume Size Distribution

Size Distribution Parameters

Refractive Index

Coincident AOD

Single Scattering Albedo

Absorption AOD

Extinction AOD

Lidar and Depolarization Ratios

Asymmetry Factor

Phase Function

All Products Except Phase Function and U27

Product Scenario and Data Quality

Sky Scan Scenario:  Almucentar  Hybrid

Data Quality:  Level 1.5  Level 2.0

Data Format:  All Points  Daily Averages  Monthly Averages

[aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/print\\_warning\\_v3](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/print_warning_v3)

## AERONET Download Site

### Notice to users:

The public domain data you are about to download are contributed by the International AERONET Federation. Each site has a Principal Investigator(s) (PI), responsible for deployment, maintenance and data collection. The PI has priority use of the data collected at the site. The PI is entitled to be informed of any other use of that site data.

The Principal Investigator(s) and Co-Investigator(s) of 'Valladolid' is(are): **Victoria E. Cachorro Revilla and Carlos Toledano**. If you intend to use the following data please consult with him/her/them via e-mail(s) :

chiqui@goa.uva.es  
toledano@goa.uva.es

### Recommended guidelines for data use and publication:

Although journal paper authorship and acknowledgement is the domain of the senior author and no policy is universally applicable, the AERONET contributors ask that every practical attempt be made to honor the following general guidelines.

#### Using AERONET data:

Please consult with the PI(s) and Co-I(s) of the data to be used.

#### Referencing:

Always cite the appropriate [key AERONET papers](#) for any publications as well as cite relevant manuscripts pertaining to previously published site data.

#### Publishing AERONET data from a 'few' sites:

Please consider authorship for the PI(s) and Co-I(s) and/or the following acknowledgement:

We thank the (Project/PI(s)/Co-I(s)) for (its/theirs) effort in establishing and maintaining (site name(s)) sites.

#### Publishing data from 'many' sites:

A general acknowledgement is typically sufficient and may read:

We thank the (PI(s) and Co-I(s)) and their staff for establishing and maintaining the (#)sites used in this investigation.

However if the AERONET data are a principal component of the paper then co-authorship to PI and Co-I(s) should be offered.

If you accept the above conditions, please click the "Accept" button below to download the ZIP file. If you do not agree with the above conditions, click "Do Not Accept" to return to the data plots.

or

Figura 2.5: Página web de AERONET. Selección de los archivos de descarga y finalización.



## Capítulo 3

# Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

“libRadtran” es un programa libre que contiene los conjuntos de bibliotecas y rutinas necesarias para llevar a cabo simulaciones relacionadas con la transferencia radiativa y permite modificar y configurar la atmósfera alterando entre otros, moléculas, aerosoles, nubes, ... [15][16]. Las simulaciones que proporciona este programa se llevan a cabo mediante la resolución de la ecuación de transferencia radiativa, y se incluyen hasta 10 maneras diferentes de solucionarla, pudiendo hacer resoluciones incluso en modelos tridimensionales, aunque de forma pública únicamente se puede obtener soluciones en 1D.

La herramienta principal de este programa es la denominada “uvspec”. Esta es una herramienta de transferencia radiativa que calcula la irradiancia espectral y el flujo actínico tanto en el espectro ultravioleta como en el visible llegando hasta el infrarrojo lejano. Este software lleva en funcionamiento muchos años, por lo que ha ido sufriendo mejoras y se le han ido añadiendo nuevas herramientas en sus distintas versiones. En este capítulo se desarrollará “libRadtran”, los parámetros que este programa incluye y cómo funciona el programa que se ha diseñado.

### 3.1. Consideraciones sobre la ecuación de transferencia radiativa

El programa parte de la ecuación de transferencia radiativa para una geometría general que se había desarrollado anteriormente:

$$(\hat{n} \cdot \nabla)I(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu) = h\nu Q(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu) \quad (3.1)$$

El término  $\hat{n} \cdot \nabla$  está relacionado con la geometría por lo que se le denomina término de geometría. En las atmósferas planetarias, las geometrías que predominan son la cartesiana y la esférica, por lo que únicamente se analizarán estas dos.

En la geometría cartesiana, para resolver la ecuación de transferencia radiativa se utiliza una aproximación plano-paralela; es decir, se aproxima el planeta a una tierra plana y la atmósfera se divide en capas paralelas de extensiones infinitas en las

direcciones  $x$  e  $y$ . Esto implica que no hay variaciones en estas dos variables, por lo que el término de geometría se convierte en  $\hat{n} \cdot \nabla = \mu \frac{\partial}{\partial z}$ .

Por otra parte, en la geometría esférica, el término se reduce a  $\hat{n} \cdot \nabla = \mu \frac{\partial}{\partial r}$ , ya que se asume una simetría esférica y según Dahlback y Stamnes [17], para intensidades medias con ángulos de cenit solar de hasta  $90^\circ$ , es suficiente incluir sólo el término  $\mu \frac{\partial}{\partial r}$ .

En este trabajo, se ha utilizado la aproximación plano-paralela, que es la que utiliza por defecto el método DISORT para resolver la ecuación de transferencia radiativa, y que se desarrollará más adelante.

Por otro lado tenemos el término de fuente,  $h\nu Q(\mathbf{r}, \hat{n}, \nu)$ , el cual recoge todas las pérdidas y ganancias de la radiación en la dirección y frecuencia que interese. Este término de forma expandida se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
 h\nu Q(r, \hat{n}, \nu) &= h\nu Q(r, \theta, \phi, \nu) = -\beta^{ext}(r, \nu)I(r, \theta, \phi, \nu) + \\
 &\frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \beta^{sca}(r, \nu, \nu') \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^\pi d\theta' p(r, \theta, \phi; \theta', \phi') I(r, \theta', \phi', \nu') d\nu' + \\
 &\beta^{abs}(r, \nu)B[T(r)]
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

El primer término representa la pérdida de radiación debido a la absorción y dispersión de fotones fuera del haz; el segundo, denominado término de dispersión múltiple, describe la cantidad de fotones dispersos en el resto de las direcciones y frecuencias; y el tercero, la cantidad de radiación térmica emitida en el rango de frecuencias que interese.

El perfil de temperatura, las densidades y las secciones transversales de absorción y dispersión son necesarios para resolver la ecuación de transferencia radiativa. Las temperaturas y densidades pueden obtenerse fácilmente a partir de mediciones o modelos atmosféricos. Las secciones transversales se toman de las mediciones, de los modelos teóricos o de una combinación de ambos.

### 3.2. “uvspec”

“uvspec” es el módulo central de “libRadtran” que calcula el campo radiativo de la atmósfera terrestre, o de cualquier atmósfera, siempre que se le proporcionen los parámetros adecuados. Esta herramienta se estructura en tres partes principales:

- **Datos de entrada:** Esta primera parte del programa debe proporcionar una manera de introducir una serie de parámetros para poder caracterizar la atmósfera con la que se quiere trabajar, como, por ejemplo, el perfil de ozono, dióxido de carbono, presión, nubes, aerosoles, ... Todo esto queda recogido en un fichero de entrada, al que nos referiremos a partir de ahora como “input”.



## Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

- **“Solver”**: Este módulo se encarga de resolver la ecuación de transferencia radiativa. Calcula irradiancias, flujos actínicos y tasas de calentamiento para todas las propiedades ópticas que se han descrito de la atmósfera.
- **Post-procesamiento**: Para estos últimos pasos, se deben proporcionar al programa todas las correcciones necesarias para poder trabajar con los datos de salida del “Solver”, como la distancia Tierra-Sol, o la integración del intervalo en longitud de onda.

Este proceso puede verse claramente explicado en la Figura 3.1:

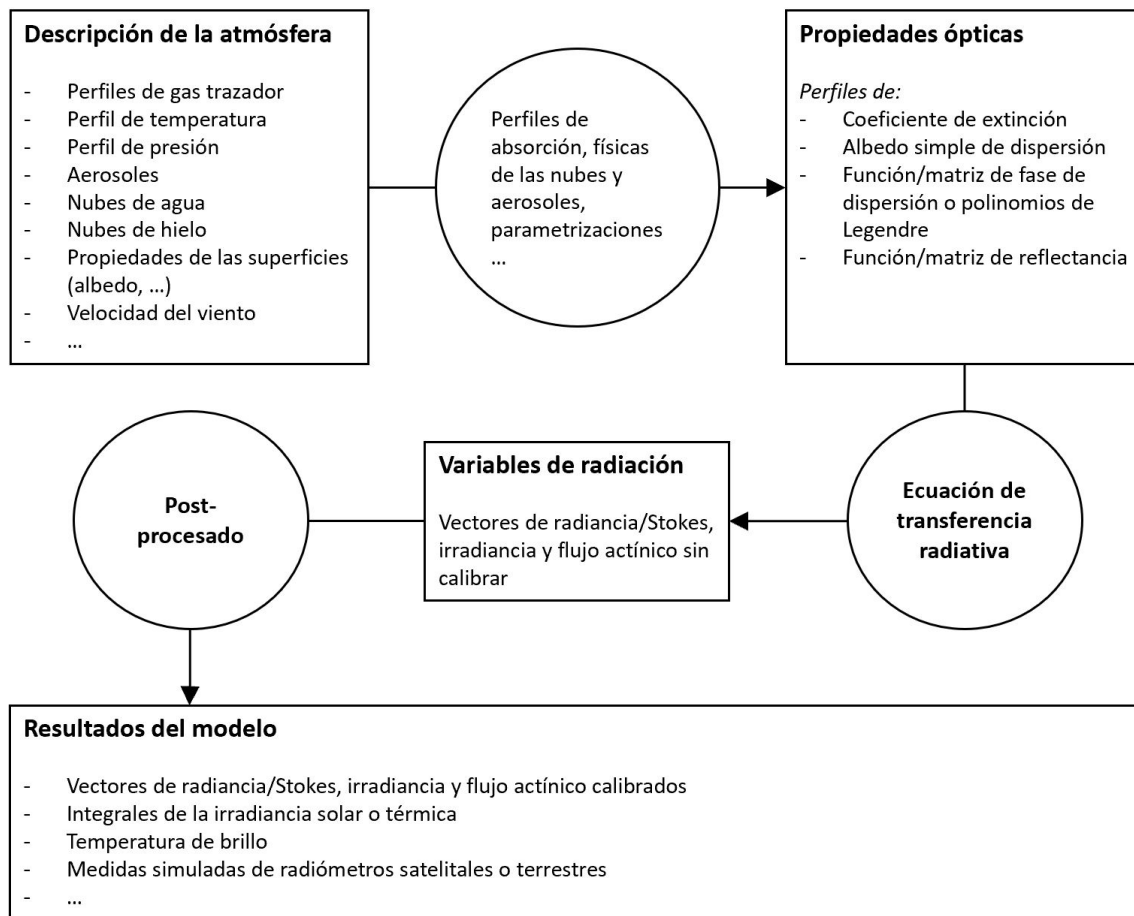


Figura 3.1: Diagrama de flujo de trabajo de “uvspec”.

A continuación, se describirá la generación de los códigos necesarios para hacer funcionar cada una de las partes, así como los parámetros que se permiten ajustar, las decisiones que se han tomado, y los comandos que se han usado con su sintaxis para este trabajo.

Aunque algunas de las propiedades que el programa necesita para poder funcionar deben ser escritas por el usuario, hay otra información, como pueden ser las propiedades de absorción y dispersión, que pueden ser obtenidas de una base de datos que tiene el propio programa por defecto.

Todos los parámetros que se explican a continuación han sido obtenidos de la guía oficial de “libRadtran”, y pueden consultarse sus descripciones completas en la misma

[18].

### 3.2.1. Fichero de entrada (input)

En el fichero "input" hay que detallar, como se ha mencionado con anterioridad, los componentes de la atmósfera: moléculas, aerosoles, perfiles de temperatura, gases, ... La guía de uso de "libRadtran" aconseja seguir una serie de pasos para crear un buen archivo de entrada, ya que, para la creación del mismo, es necesario detallar muchos parámetros.

La primera consideración que hay que hacer sobre el fichero es que el programa va a leerlo línea a línea, por lo tanto, debe redactarse de tal forma que cada entrada esté en una línea independiente. La estructura de estas líneas de parámetros está compuesta, en primer lugar, por el nombre de la opción o parámetro que se quiere introducir, un espacio en blanco, y después, los valores para dicho parámetro. En caso de que se quiera introducir algún comentario, el programa utiliza el símbolo #, que ignora cualquier cosa que se escriba detrás suyo hasta el final de la línea. En el caso de que hubiera alguna línea en blanco, será omitida.

El programa no necesita tampoco que los distintos parámetros que se van a introducir para la caracterización de la atmósfera sean introducidos en ningún orden en particular, ya que el orden de lectura de las líneas no es importante, incluso pudiéndose detallar antes las salidas que se quieren obtener que la propia atmósfera de entrada, pero en este caso, se ha construido el archivo de entrada de una forma intuitiva y progresiva.

Es importante señalar que el programa "libRadtran" tiene una configuración atmosférica por defecto (aerosoles, presión, gases, ...), y que al introducir los parámetros en el "input" no se están generando desde cero, sino que se están sobrescribiendo.

En la Figura 3.2 se muestra uno de los "input" utilizados como ejemplo de todas las prácticas descritas hasta el momento:

A continuación, se tratarán los parámetros principales que deben incluirse en un archivo "input", con consideraciones y explicaciones sobre las mismas.

#### 3.2.1.1. Resolución de la longitud de onda

El programa tiene tres cuadrículas de longitud de onda independientes: la cuadrícula de entrada (la cual introduce el usuario), la cuadrícula interna (la que escoge "uvspec" si no se define la anterior por el usuario), y la cuadrícula de salida (independiente de las anteriores y que viene definida en el fichero solar o térmico).

La cuadrícula de entrada tiene dos restricciones: el rango de longitud de onda tiene que cubrir todos los puntos de cuadrícula internos y esta debe suficientemente densa como para permitir una interpolación razonable.

La cuadrícula interna en el caso de cálculos en el espectro UV y visible se define con un ancho de paso de 0,5 nm por debajo de 350 nm, y 1 nm por encima de 350 nm. Esta es una opción conservadora que resuelve completamente las amplias bandas de absorción de ozono y las extinciones de Rayleigh, aerosoles y nubes, que varían suavemente. Resoluciones mayores aumentan el tiempo de computación.

## Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

```
input_20200108_1136.txt
1 atmosphere_file ../data/atmmod/afglms.dat
2 source solar ../data/solar_flux/NewGuey2003.dat #Loc. del espectro extraterrestre
3 latitude N 41 39 18.65 #Hemisferio, grados, minutos y segundos
4 longitude W 4 43 25.39 #Este u Oeste, grados, minutos y segundos
5 time 2020 01 08 11 36 42 # año, mes, día, hora, minuto, segundo
6 sza 64.666412
7 phi0 0
8 wavelength 1020.000000 1020.000000 #Rango de long. de onda en nm. Tiene que ser
9 más grande que el rango de spline
10 mol_modify O3 305.930321 DU #Set columna de ozono
11 mol_modify H2O 16.627810 mm #Set columna de vapor de agua
12 mol_modify NO2 0.182835 DU #Set columna de dióxido de nitrógeno
13 rte_solver disort #Tipo de resolución de la ecuación de transferencia radiativa
14 output_user lambda uu #long. de onda, ángulo solar cenital, directa, difusa hacia
15 abajo, global, radiancia?
16 disort_intcor moments
17 aerosol_default #configuración por defecto de los aerosoles
18 aerosol_set_tau_at_wvl 1020.000000 0.061054 #Es como dar el alpha y
19 beta:aerosol_angstrom 1.3990 0.0629 Alpha de angstrom y coeficiente de
20 turbiedad(beta)
21 aerosol_modify ssa set 0.898700 #Variable, set/scale, valor. En este caso, ALBEDO
22 DE DISPERSIÓN SIMPLE
23 aerosol_modify gg set 0.700327 #Parámetro de asimetría
24 aerosol_file moments
25 ../bin/Pruebas_Patri/TFM_avanzado/input/mom2020/input_mom1020_20200108_1136.dat
26 albedo 0.247140 #Albedo de la superficie
27 number_of_streams 16 #Haces que entran en el sistema para interactuar con nubes
28 y aerosoles y seguir su camino (absorciones, refracciones y demás)
29 umu -0.427888 #Porque mira al sol directamente así que el coseno es 1 y el signo
30 negativo indica que mira desde la tierra
31 phi 0.01 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 25.0
32 30.0 35.0 40.0 45.0 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0 120.0 140.0 160.0 180.0
33 quiet
```

Figura 3.2: Ejemplo de un fichero “input” utilizado en “libRadtran”.

La cuadrícula interna se define con los parámetros **wavelength\_grid\_file** o **mol\_tau\_file** **abs** y por ejemplo, para algunas aplicaciones, esta puede aumentarse hasta los 10 nm, lo que reduciría los tiempos computacionales hasta en un factor de 10.

La resolución de la cuadrícula de salida está definida por el fichero del espectro solar extraterrestre elegido, pero puede modificarse mediante el comando **spline**.

Se procede a definir los principales comandos que expresan la resolución de la longitud de onda junto a una breve explicación de cómo utilizar cada uno de ellos y la sintaxis que se debe seguir de forma general, seguido de un ejemplo.

- **wavelength** Selecciona el rango especificando la primera y la última longitud de onda escritas en nm. De forma genérica, la expresión del mismo es:

**wavelength**  $\lambda_1$   $\lambda_2$

Un ejemplo de uso sería:

**wavelength** 400 710

en el que se crea una rejilla desde 400 nm hasta 710 nm. Como no se ha especificado el paso que se desea dar, la precisión será de 1 nm, es decir, obtendríamos un resultado por cada longitud de onda.

Un caso particular es el monocromático. Se puede usar este mismo comando para obtener el resultado de una única longitud de onda, poniendo como extremos la misma longitud de onda que se quiere obtener.

```
wavelength 400 400
```

Poniendo este comando, obtendríamos las salidas que hayamos pedido mediante el input para la longitud de onda de 400. Este sería nuestro caso y puede verse en la línea 8 del “input” de ejemplo (Figura 3.2), donde se le ha solicitado un valor de 1020.

Otra manera de especificar las longitudes de onda sería mediante la introducción al programa de un fichero que contenga todas las longitudes de onda, utilizando el mismo parámetro de la siguiente forma:

```
wavelength fichero_de_entrada
```

donde estarán escritas las longitudes de onda, una en cada fila.

- **wavelength\_grid\_file**: Este comando aporta la ruta a un archivo que contiene en una única columna la precisión en función de la longitud de onda usada para los cálculos de la transmitancia. Este parámetro devuelve una media ponderada de la transferencia radiativa. La sintaxis que se tiene que seguir sería:

```
wavelength_grid_file ruta_del_fichero
```

Este comando reescribe la precisión que se usa por defecto, así que se recomienda no usarla salvo casos imprescindibles. Por ejemplo:

```
wavelength_grid_file ../examples/UVSPEC_LOWTRAN_THERMAL.TRANS
```

Este fichero, que se encuentra por defecto en los ejemplos incluidos en “libRadtran”, podría ir con una precisión de 5 nanómetros desde 250 nm hasta 400 nm, de 1 nanómetro desde 400 hasta 1200, y con 100 nanómetros hasta 2500 nm. Lo que podría verse dentro del fichero serían las longitudes de onda correspondiente a los diferentes intervalos seleccionados escritos en columna: 250, 255, 260, ..., 400, 401, 402, ..., 1200, 1300, 1400, ..., 2500.

- **wavelength\_index**: Ayuda a seleccionar las longitudes de onda que se usarán dentro de todo un rango. Normalmente se utiliza en conjunción con **wavelength\_grid\_file**, ya explicado; **mol\_tau\_file abs**, que selecciona el archivo de espesor óptico de absorción o de difusión; o **mol\_abs\_param**, que es un tipo que permite integrar la irradiancia de onda larga y de onda corta para simular medidas de instrumentos según los esquemas propuestos por distintos autores, y que el programa integra.

### 3.2.1.2. Fuente

Como puede verse en el “input” de la Figura 3.2, en la segunda línea del código se ha incluido el comando **source**. Este comando introduce un tipo de fuente de radiación, ya sea solar o térmica. Su sintaxis es la siguiente:

**source** *tipo\_de\_fuente fichero unidades*

Si se quiere especificar una fuente solar (espectro extraterrestre solar) o térmica en concreto, se le puede introducir un fichero que la contenga. No es obligatorio definir las unidades, pero en caso de que se omita este paso, las unidades solares por defecto serán  $W/(m^2 \cdot nm)$ , y las térmicas  $W/(m^2 \cdot cm^{-1})$ .

### 3.2.1.3. Geometría

En esta parte, vamos a definir todos los parámetros relacionados con la geometría, no sólo correspondientes al punto terrestre o extraterrestre donde se quiera obtener el “output”, si no también relativas al Sol. Cuanto más precisos y variables tengamos en nuestro “input”, mejor serán las simulaciones. Los principales parámetros son los siguientes:

- **altitude**: Establece la altura del punto donde se quiere obtener el “output” en kilómetros respecto del nivel del mar.

**altitude** *altitud\_km*

Pese a ser este el más normal, se puede añadir a continuación un segundo número. Este lo que hace es redistribuir las capas de la atmósfera para hacer los cálculos. En este caso, las capas que el “libradtran” ha hecho por defecto se modifican a tener el ancho de la longitud (en km) que el usuario aporta.

- **day\_of\_year**: Es el día del año expresado como número entero y sirve para para corregir la radiación calculada para la distancia Sol-Tierra para el día juliano especificado (1-365). Si no se especifica, la distancia Tierra-Sol es 1 UA (distancia equinoccio) y no se aplica ninguna corrección al archivo solar de origen de irradiación extraterrestre.

**day\_of\_year** *día\_juliano*

- **time**: Sirve para incluir el día y hora a la que se quiere simular para que el programa pueda hacer la corrección de la irradiancia extraterrestre que hay entre la Tierra y el Sol. La forma correcta de utilizar este comando es de la siguiente forma:

**time** *YYYY MM DD hh mm ss*

Donde *YYYY* es el año, *MM* el mes, *DD* el día, *hh* la hora, *mm* los minutos y *ss* los segundos. Todo usando la hora UTC.

Si además en el “input” se han incluido también los comandos **latitude** y **longitude**, el “libRadtran” puede calcular el SZA en caso de que éste no se haya incluido o seleccionar correctamente qué atmósfera es la más adecuada para importar como fichero.

- **earth\_radius**: Este comando es necesario para los “solvers” de geometría esférica. El valor predeterminado es 6370, pero en caso de que se quiera cambiar se tiene que escribir:

**earth\_radius** *valor*

- **latitude**: Sirve para especificar la latitud de la ubicación que se va a simular.

**latitude** *N/S deg [min] [sec]*

Esto es, se escribe el hemisferio en el que se quiere simular, ya sea norte (N) o sur (S), y a continuación, se introduce la coordenada en grados, minutos y segundos.

Para que funcione este comando hay que introducir también el parámetro **longitude**, que se explica a continuación.

- **longitude**: Especificar la longitud.

**longitude** *E/W deg [min] [sec]*

Funciona de la misma manera que **latitude**, cambiando en que aquí hay que especificar si se trabaja al este (E), u oeste (W) del meridiano de Greenwich.

- **phi**: Este comando ayuda a incluir los ángulos acimutales del cielo en los que se quiere simular la radiancia. Estos tienen que ir en orden creciente y el ángulo de partida depende de si el sensor está en el norte (ángulo de partida 0°), sur (180°), este (90°) u oeste (270°).

**phi** *valores\_de\_los\_ángulos*

Si se quieren incluir varios ángulos, estos tienen que ir separados mediante un espacio usando el punto como separador para decimales. Esto puede verse en la línea 23 del “input”.

- **phi0**: Incluye el ángulo acimutal del Sol (entre 0° y 360°). Igual que antes, este ángulo depende de dónde se sitúe el Sol, si está en el norte (180°), sur (0°), este (270°) u oeste (90°).

**phi0** *valor*

Puede verse un ejemplo de este comando en la línea 7 del input. Dependiendo del “solver” que se seleccione, habrá que fijarse cual es coger porque para algunos, el comando cambia; para todos los “solvers” 1D el acimut absoluto no importa, si no sólo el acimut relativo “phi-phi0”, por lo que es muy interesante incluir

## Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

en el input ambos valores, ya que la precisión aumenta y los errores que se comenten se reducen.

- **pseudospherical**: Incluye una geometría pseudoesférica en los “solvers” DI-SORT y TWOSTR, ya que para ambos, la geometría por defecto es plano-paralela. Este comando se incluye en el “input”, sin ningún tipo de parámetro.
- **sza**: Sirve para incluir el ángulo solar cenital en grados. En caso de que no se incluya el este parámetro ni el comando **time**, el valor de **sza** es 0. Pero si no se incluye el **sza** pero si el **time**, el propio programa calcula el valor del **sza**.

**sza** *valor\_del\_ángulo*

### 3.2.1.4. Atmósfera

La atmósfera para la simulación es seleccionada como un fichero mediante el comando **atmosphere\_file**, seguido de la ruta en la que se encuentra el propio fichero, como puede verse en la primera línea del código del “input”.

**atmosphere\_file** *ruta\_al\_fichero*

Si se sigue la ruta que aparece en el ejemplo hasta la última carpeta antes de seleccionar el fichero, se encuentra lo siguiente (Figura 3.3):

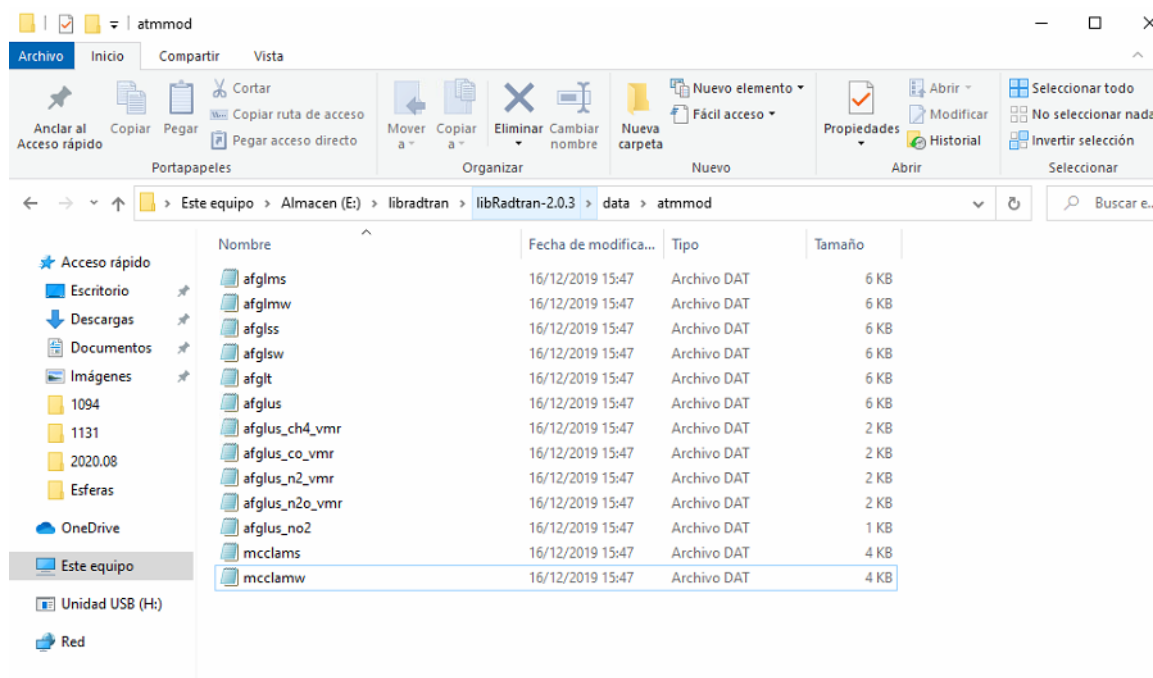


Figura 3.3: Atmósferas disponibles por defecto en “libRadtran”.

Cada uno de estos ficheros contiene distintas atmósferas que el programa “libRadtran” trae cargadas en su configuración. Un archivo de atmósfera contiene los perfiles de presión, temperatura, densidad de aire, concentraciones de diferentes gases, absorción molecular y “scattering” de Rayleigh, pero no contendrá ni nubes ni aerosoles.

Algunas de las atmósferas que el programa ofrece por defecto son, por ejemplo, "afglms", "afglmw", "afglss", "afglsw", "afgl" o "afglus", que corresponden, en el mismo orden, a una atmósfera de latitud media en verano, invierno, subártica en verano e invierno, tropical y la estándar US.

Estas atmósferas pueden ser utilizadas como base para los cálculos, porque introducen muchos de los parámetros relativos al clima de la ubicación en la que se quiere trabajar, pero el usuario tiene luego que profundizar más en ellas y conseguir la atmósfera más precisa deseada para su simulación.

Otra opción que permite el programa es que el propio usuario pueda crearse su propio fichero atmosférico. Este fichero debería contener al menos 3 columnas (pudiendo tener hasta 9) que contuvieran como mínimo la altitud, la presión y temperatura correspondiente a cada altitud.

El resto de los parámetros que el programa es capaz de interpretar, hasta completar las 9 columnas, son:

- 1 Altitud sobre el nivel del mar en km
- 2 Presión en hPa
- 3 Temperatura en K
- 4 Densidad de aire en  $\text{cm}^{-3}$
- 5 Densidad de ozono en  $\text{cm}^{-3}$
- 6 Densidad de oxígeno en  $\text{cm}^{-3}$
- 7 Densidad de vapor de agua en  $\text{cm}^{-3}$
- 8 Densidad de  $\text{CO}_2$  en  $\text{cm}^{-3}$
- 9 Densidad de  $\text{NO}_2$  en  $\text{cm}^{-3}$

Es necesario en este caso que dicho archivo siga el orden preciso en el que se escriben las columnas, que el "libRadtran" va a interpretarlas en este orden. En caso de que en una columna no se incluyeran datos, el programa asumiría que no existen, y por ejemplo, no habría absorciones producidas por dichos gases.

Para ello, "libRadtran" aconseja ir mirando lo que se quiere añadir a esta atmósfera separándolo en los siguientes bloques:

### ▪ **Gases atmosféricos**

- **mixing\_ratio**: Sirve para expresar la relación de mezcla en partes por millón (ppm) de las diferentes especies de gases atmosféricos.

**mixing\_ratio** *gas valor*

Las distintas especies de gases pueden ser  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ .

Estas especies se incluyen en el input con las abreviaturas escritas anteriormente, teniendo en cuenta que los subíndices se introducen como número normal (Es decir,  $\text{H}_2\text{O}$  sería  $\text{H2O}$ ).

- **mol\_file**: Especifica los perfiles de densidad de varios de los gases que se quieren añadir en el cálculo de la transferencia radiativa. Este comando es algo complejo, y ya que en este caso no se ha usado este comando, se muestra lo esencial.



## Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

---

**mol\_file** *especie\_de\_gas ruta\_del\_fichero unidades*

Se incluyen las mismas especies que antes, añadiendo O<sub>3</sub>, BRO, OCLO, HCHO, SO<sub>2</sub>, O<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>.

El fichero que en este lugar se espera es uno con dos columnas, en el que la primera es la altura en kilómetros respecto del nivel del mar y en la segunda, la densidad del gas presente en la unidad que corresponda.

- **mol\_modify**: Sirve para modificar la columna del perfil de densidad total. Esta columna se integra gracias a los datos que incluye el usuario, como el comando **altitude** y **toa** (top of atmosphere).

**mol\_modify** *especie\_de\_gas valor\_de\_columna unidades*

Los gases atmosféricos que se pueden introducir son los mencionados tanto en **mol\_file** como en **mixing\_ratio**. En segundo lugar, hay que introducir el valor de la columna total del gas que se corresponda, seguido de las unidades que se han utilizado, ya sean DU (dobsons), cm<sup>2</sup> (aunque habría que escribirlo como CM\_2) o mm (en el código como MM).

No hay límite de cuántos comandos **mol\_modify** se pueden incluir en un “input”, pero no podrá ser más de uno por especie.

- **mol\_tau\_file**: Muestra la localización de un documento que incluye el “scattering” molecular o la profundidad óptica de absorción.

**mol\_tau\_file** *sca/abs filename*

Para utilizar este comando, debe indicarse primero si se desea absorción o “scattering”, y posteriormente, la ruta del archivo. Debe utilizarse “sca” si se quiere especificar la profundidad óptica directamente y debe ser o monocromática o espectral. Por otro lado, “abs” sirve para especificar la profundidad óptica directa o para un cálculo línea a línea. Los formatos que se aceptan son monocromático o, en caso de espectral, o ASCII o netcdf.

- **no\_absorption**: elimina la absorción de gases. En este caso, habría que especificar de qué gas no se quisiera tener absorción:

**no\_absorption** *nombre*

donde “nombre” hace referencia a absorciones moleculares, aerosoles, nubes, nubes de hielo o cualquier otro perfil.

- **no\_scattering**: elimina el “scattering” para los perfiles unidimensionales. Debe utilizarse como el parámetro anterior, utilizando como nombre de referencia el tipo de “scattering” que se quiere eliminar, por ejemplo “mol”, “aer”, “wc”, “ic” (siendo estos, molecular, aerosoles, nubes de agua y nubes de hielo), respectivamente.

### ▪ **Aerosoles**

- **aerosol\_angstrom**: Sirve para escalar la profundidad óptica de aerosoles usando la fórmula de Ångström (ecuación 2.1). Para ello es necesario incluir el parámetro de turbiedad y el alpha de Ångström de la siguiente forma:

**aerosol\_angstrom** *alpha beta*

Esta columna se integra gracias a los datos que incluye el usuario, como el comando **altitude** y **toa**.

- **aerosol\_default**: Configura el aerosol por defecto, teniendo las siguientes características: aerosol de tipo rural en la capa límite, aerosol de fondo por encima de 2 km, con condiciones primavera-verano y una visibilidad de 50 km. Esta configuración por defecto se modifica con los parámetros **aerosol\_haze**, **aerosol\_vulcan**, **aerosol\_season** y **aerosol\_visibility**.
- **aerosol\_haze**: Especifica el tipo de aerosol en los 2 km inferiores de la atmósfera.

**aerosol\_haze** *type*

Donde el tipo de aerosol es alguno de los siguientes (teniendo que poner el número correspondiente al tipo de aerosol):

- 1 Aerosol de tipo rural.
- 4 Aerosol de tipo marítimo.
- 5 Aerosol de tipo urbano.
- 6 Aerosol de tipo troposférico.

- **aerosol\_modify**: Modifica las propiedades ópticas del aerosol.

**aerosol\_modify** *variable scale/set valor*

Para poderlo escribir se pone la variable que se quiera modificar, se escala o fija y luego se incluye el valor. Las posibles variables son:

- Parámetro de asimetría  $g$  (gg): donde "set" es un valor entre -1,0 y 1,0. Sin embargo, "scale" tiene que ser un valor entre 0,0 y 1,0.
  - Albedo de dispersión simple (ssa): En este caso "set" y "scale" serán ambos valores entre 0,0 y 1,0.
  - Espesor óptico (tau): "set" será constante y estará definido aquí como la integral desde la superficie a la altitud definida por el usuario hasta **toa**. Por otro lado, "scale" será un valor entre 0,0 y 1000000,0.
- **aerosol\_season**: Especifica un perfil de aerosoles apropiado a la estación que corresponda:

**aerosol\_season** *estación*

## Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

---

Donde la estación será 1 en caso de que hablemos de primavera-verano y 2 en el caso de otoño-invierno.

- **aerosol\_set\_tau\_at\_wvl**: Ajusta el espesor óptico de aerosoles a una longitud de onda expresada en nm. El resto de las longitudes de onda se escalan en consecuencia. Para que este comando funcione bien, es necesario que la longitud de onda que se seleccione pertenezca al rango de longitudes de onda que se seleccionaron con **wavelength**.

**aerosol\_set\_tau\_at\_wvl** *lambda tau*

- **aerosol\_visibility**: Visibilidad horizontal en km.

**aerosol\_visibility** *valor*

- **aerosol\_vulcan**: Aerosoles por encima de los 2 kilómetros.

**aerosol\_vulcan** *valor*

Donde el valor es uno de los siguientes:

- 1 Aerosoles de fondo.
- 2 Aerosoles volcánicos moderados.
- 3 Aerosoles volcánicos altos.
- 4 Aerosoles volcánicos extremos.

- **aerosol\_file**: Sirve para encontrar un documento que defina una serie de propiedades ópticas.

**aerosol\_file** *tipo ruta\_al\_documento*

Los posibles tipos son: “gg” (parámetro de asimetría  $g$ ), “ssa” (albedo de dispersión simple) y “tau”, donde el documento en la primera columna debe contener la altura expresada en km y en la segunda columna el valor correspondiente a cada tipo. Existen otros dos tipos, “explicit” y “moments”, los cuales son algo más complicados y de los cuales únicamente se ha utilizado “moments”, como puede verse en la Figura 3.2 en la línea 19.

“moments” establece los momentos de la función de fase del aerosol en los valores especificados en el archivo de momentos del aerosol. En nuestro caso, en la primera columna están los ángulos a los que se desea obtener los momentos de la función de fase y en la segunda, esta función de fase incluyendo los momentos, como puede verse en la Figura 3.4.

```

0.000100 21.282630
1.710000 20.931780
3.930000 19.638540
6.160000 17.605330
8.390000 15.264060
.....
..
..
62.050000 0.676260
64.290000 0.610010
66.520000 0.551460
68.760000 0.499640
70.990000 0.453720
.....
..
..
171.610000 0.202560
173.840000 0.211370
176.070000 0.230540
178.290000 0.248330
180.000000 0.253850

```

Figura 3.4: Fragmentos de un ejemplo del fichero de momentos.

La función de fase viene definida por la siguiente expresión:

$$p(\mu) = \sum_{m=0}^{\infty} (2m + 1) \cdot k_m \cdot P_m(\mu) \quad (3.3)$$

donde  $k_m$  es el  $m$ -ésimo momento y  $P_m(\mu)$  es el  $m$ -ésimo polinomio de Legendre. Sólo se puede utilizar junto con el solver “disort” o “fdisor2” en combinación con la opción “disort\_intcor momentos”.

#### ■ Propiedades de superficie

Hace referencia a cómo se comporta el suelo. En este aspecto únicamente tenemos 3 comandos que hagan referencia a esta parte. Cuando hablamos de la reflectancia del suelo, se está haciendo referencia al albedo. Por defecto este es 0, indicando que la superficie absorbe toda la radiación.

- **albedo:**

**albedo** *valor*

Donde el valor del albedo debe ser un número comprendido entre 0,0 y 1,0, y constante para cualquier longitud de onda.

- **albedo\_file:**

**albedo\_file** *ruta\_al\_fichero*

Este comando funciona igual que los otros comandos que contienen la opción file. En este caso, se utiliza para superficies en las que varía la reflectancia del suelo en función de la longitud de onda. Estos documentos deben tener en la primera columna, la longitud de onda y en la segunda, el correspondiente albedo.

- **albedo\_library:**

Este comando carga una serie de librerías y que, para poder seleccionarlas, hay que hacer referencia a otros comandos que en este trabajo no tienen importancia, por lo que se omitirán.

Por último, en este apartado, para terminar de definir la atmósfera, se podría definir un conjunto de nubes, junto con sus correspondientes características. Puesto que en este trabajo no se han incluido, no se harán referencia a las definiciones de los comandos correspondientes. Para conocer más sobre ellos, se redirige al lector a la guía de este programa.

### 3.2.2. Elección del solucionador de la ecuación de transferencia radiativa

El solucionador o “solver” es el motor interno de cualquier código de transferencia radiativa. Escoger el tipo de “solver” que se va a utilizar no es algo trivial, ya que cada uno tiene unas aproximaciones o errores asumidos, y por eso, cuál usar dependerá de lo que se quiera obtener y lo que convenga al usuario.

Por defecto, el “solver” de “libRadtran” es DISORT, pero se puede cambiar por alguno de los que vienen con el programa.

La sintaxis que se usa con cualquier “solver” es:

**rte\_solver** *solver*

A continuación se explican los diferentes tipos de solvers que hay:

- **Solucionador de transferencia radiativa de ordenadas discretas (DIScrete ORDinate Radiative Transfer solvers, DISORT):** Recomendado por “libRadtran” y solucionador más usado, ya que es el que más se ha probado y es el más versátil. Resuelve la ecuación de transferencia radiativa plano-paralela unidimensional y permite cálculos precisos de radiancia, irradiancia y flujo actínico. Existen 3 versiones de “disort” que se pueden utilizar:
  - **fdisort1:** versión 1.3 de DISORT en fortran77.
  - **fdisort2:** versión 2.0 de DISORT con importantes mejoras también en fortran77.
  - **disort:** Versión en C de fdisort2, que también puede ser usada en el modo pseudo-esférico. El hecho de que se use más este solver que fdisort2 es debido a que está escrito en C, y esto supone menos inestabilidades y es más rápida.

Los principales cambios entre las versiones 1.3 y 2.0 son un tratamiento mejorado de las funciones de fase máxima y un manejo realista de la función de reflectancia bidireccional.

Existen dos variantes al “solver” DISORT para casos especiales:

**disort pseudo-esférico:** Se usa en caso de que haya efectos esféricos. Este “solver” incluye perfiles de densidad bidimensionales de gases atmosféricos y es

relevante para el cálculo de masas de aire. Dentro de esta opción tenemos dos posibles “solvers”: “sdisort”, que no es completamente esférico (no es fiable en los extremos) y “spsdisort”, más preciso que “sdisort”, pero debido a la cantidad de cálculos que realiza, no es recomendable para procesadores inferiores a 64 bits, ya que aparecen inestabilidades numéricas.

**Solver de dos flujos:** Este “solver” está optimizado para hacer cálculos de dos flujos. Dentro de este tipo de “solvers” están: “twostr”, que proporciona soluciones de dos flujos no puede calcular radiancias (también habría que hacer pruebas de sensibilidad junto con otros “solvers”), y “rodents”, donde la radiación térmica se implementa en analogía con la radiación solar.

- **Polarización (polradtran):** Resuelve la ecuación de transferencia radiativa de forma plano-paralela unidimensional, pero añadiendo polarización. Un inconveniente es que este solver no es preciso para funciones de fase con picos fuertes, como la de la dispersión del agua o de las nubes de hielo en el espectro de onda corta.
- **Dispersión térmica cero (tzs):** Es un “solver” rápido para calcular los resplandores térmicos en la parte superior de la atmósfera para una atmósfera no dispersante. Como desventaja, es menos preciso que el resto.
- **sslidar:** Devuelve la solución de la ecuación LIDAR y de la razón LIDAR.
- **Mystic:** Se basa en el método de Monte Carlo para calcular la transferencia radiativa en 3D. Se usa como cálculo de radiancias e irradiancias hacia delante en atmósferas plano-paralelas. Posteriormente se implementó a geometrías totalmente esféricas y un trazado hacia atrás.

### 3.2.3. Salidas del programa

Por defecto, “uvspec” da como salida la irradiancia solar horizontal directa, difusa hacia abajo, difusa hacia arriba y el flujo actínico en la superficie. Además de estas, pueden obtenerse todos los resultados que se desee, siempre y cuando se incluyan en el “input”. Para escribir estos parámetros, debe utilizarse el siguiente comando, detallando a continuación de este las salidas que se quieran obtener en una única fila:

```
output_user resultados_con_espacio
```

Como puede verse en el ejemplo de la Figura 3.2, en la línea 13 se solicitó como salida la longitud de onda en primer lugar, y las radiancias correspondientes a los ángulos acimutales escritos en la línea 23. En total se obtuvieron 32 columnas de datos, siendo la primera la longitud de onda seleccionada, y el resto, las radiancias de los ángulos descritos.

Como se puede ver en el comentario, existen muchas otras salidas que se pueden obtener. A continuación, se escribirán las principales, aunque no se hayan utilizado todas:

- **lambda:** longitud de onda expresada en nanómetros.

- **sza**: ángulo solar cenital.
- **zout**: Altura en kilómetros.
- **edir**: Irradiancia horizontal directa.
- **eglo**: Irradiancia horizontal global.
- **edn**: Irradiancia horizontal difusa hacia abajo.
- **eup**: Irradiancia horizontal difusa hacia arriba.
- **enet**: Irradiancia neta. Esta se obtiene mediante la resta de la global menos la difusa hacia arriba.
- **esum**: Irradiancia compuesta por la suma de la global más la difusa hacia arriba.
- **uu**: Radiancia.
- **fdir**: Flujo actínico directo.
- **fglo**: Flujo actínico global.
- **fdn**: Flujo actínico difuso hacia abajo.
- **fup**: Flujo actínico difusa hacia arriba.
- **f**: Flujo actínico total.
- **uavg**: Intensidad difusa promedio total. La intensidad difusa promedio se calcula como el flujo actínico dividido entre  $4\pi$ .
- **uavgdir**: Intensidad difusa promedio directa
- **uavgglo**: Intensidad difusa promedio global.
- **uavgdn**: Intensidad difusa promedio difusa hacia abajo.
- **uavgup**: Intensidad difusa promedio difusa hacia arriba.
- **albedo**: Albedo.
- **heat**: Ritmo de calentamiento en kelvin/día.
- **p**: Presión en hPa.
- **T\_sur**: Temperatura de superficie.
- **theta**: Temperatura potencial en kelvin.
- **rh**: Humedad relativa de agua.
- **rh\_ice**: Humedad relativa de hielo.

### 3.3. Redacción de los “input”

A la hora de plantearse cómo realizar la simulación para todos los días descargados de los que se habían obtenido sus medidas reales, y teniendo en cuenta la gran cantidad de fechas de las que se quería realizar la simulación, y que cada fecha

### 3.3. Redacción de los “input”

distinta iba a necesitar de la redacción de un archivo “input” distinto, se vio poco viable la posibilidad de realizar esta tarea manualmente.

Además, debía tenerse en cuenta, que en cada uno de esos archivos “input”, si queríamos que representaran fielmente la realidad del día en que se habían registrado, debían introducirse en ellos los datos de las variables que de cada uno se habían descargado también de AERONET. Por todo esto, se diseñó para la generación de los archivos “input” una rutina en MATLAB que agilizara ese proceso.

MATLAB es un lenguaje de programación que permite trabajar fácilmente con sets que datos que agrupa en forma de matrices. Se trata de un programa que permite realizar algoritmos con facilidad y que, en este caso, se ocupó de la clasificación, operación y generación de todos los archivos de “input” que se utilizaron.

La rutina de MATLAB que se creó tenía las siguientes operaciones: en primer lugar, el programa importa los ficheros de las variables descargados y filtra y extrae todos los datos correspondientes a las longitudes de ondas de los archivos de radiancia que se han descargado. En este caso, el programa extrae de los ficheros de AOD, Albedo de Dispersión Simple y Parámetro de Asimetría los datos correspondientes a las longitudes de onda 440, 675, 870 y 1020 nm, que son las que ofrecía AERONET, todas ellas medidas en nanómetros.

Se contó en este paso con la ventaja de que las medidas que se disponían en todos estos archivos tenían el mismo número de datos en los mismos intervalos, por lo que la localización fue directa. Sin embargo, los archivos de referencia de radiancias medidas en almucántar y estas variables no poseían la misma disposición, ya que el almucántar tiene menos medidas a horas distintas, por lo que fue necesario un filtrado para escoger únicamente los datos que tuviéramos de ambas.

Dentro de la rutina de MATLAB, se compararon las fechas y horas de los datos de estos ficheros con los del fichero de radiancias del almucántar, haciendo una criba y guardando en archivos independientes únicamente los datos que cumplían la condición de que la diferencia horaria entre los datos tomados del fichero almucántar y el resto fuera de 15 minutos o menos. El resto de datos se ignoraron ya que eran útiles a la hora de compararlos, por no tener parejas de datos de referencia.

Simultáneamente, se anotaron los ángulos de “scattering” para crear unos ficheros que permitieran incluir la función de fase al “input”. Estos ficheros contenían en la primera columna el ángulo de “scattering”, y en otra columna, el valor de la función de fase para dicho valor de ángulo de “scattering”. Estos ficheros, se guardaron en una carpeta independiente para ejecutarse posteriormente por “libRadtran”.

La última parte de la rutina de MATLAB se encarga de la creación de todos los archivos de “input” que se van a simular, tomando una parte común para todos los archivos, e incorporando dentro de los mismos, los datos que va necesitando de los archivos de las variables de la atmósfera y de los ángulos de “scattering”. Ahora, se comentarán los mismos.

En la Figura 3.5, se muestra uno de los “input” utilizados para la realización de este trabajo, aunque, para su más sencilla comprensión, se han reorganizado las líneas del código. Como ya se ha explicado, el orden del código no es definitorio para la obtención del resultado, ya que el programa lee línea a línea modificando la atmósfera usada por defecto en “libRadtran”, pero en este caso, y dado que el archivo original



## Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”

ha sido modificado sucesivamente con ajustes sucesivos a lo largo del desarrollo del trabajo, y no se ha llevado a cabo una estructura predefinida, se ha decidido mostrar uno ordenado bajo ciertos criterios de legibilidad. En este caso, se han diferenciado mediante un código de colores, cuales son los valores fijos para todos los “input”, y cuales son especificados por la rutina de MATLAB.

```
input_20200108_1136.txt
1 atmosphere_file ../data/atmmod/afglms.dat
2 source solar ../data/solar_flux/NewGuey2003.dat #Loc. del espectro extraterrestre
3 latitude N 41 39 18.65 #Hemisferio, grados, minutos y segundos
4 longitude W 4 43 25.39 #Este u Oeste, grados, minutos y segundos
5 time 2020 01 08 11 36 42 # año, mes, día, hora, minuto, segundo
6 sza 64.666412
7 umu -0.427888 #Porque mira al sol directamente así que el coseno es 1 y el signo
negativo indica que mira desde la tierra
8 phi0 0
9 albedo 0.247140 #Albedo de la superficie
10 wavelength 1020.000000 1020.000000 #Rango de long. de onda en nm. Tiene que ser
más grande que el rango de spline
11 rte_solver disort #Tipo de resolución de la ecuación de transferencia radiativa
12 output_user lambda uu #long. de onda, ángulo solar cenital, directa, difusa hacia
abajo, global, radiancia?
13 phi 0.01 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 25.0
30.0 35.0 40.0 45.0 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0 120.0 140.0 160.0 180.0
14 number_of_streams 16 #Haces que entran en el sistema para interactuar con nubes
y aerosoles y seguir su camino (absorciones, refracciones y demás)
15 mol_modify O3 305.930321 DU #Set columna de ozono
16 mol_modify H2O 16.627810 mm #Set columna de vapor de agua
17 mol_modify NO2 0.182835 DU #Set columna de dióxido de nitrógeno
18 aerosol_default #configuración por defecto de los aerosoles
19 aerosol_set_tau_at_wvl 1020.000000 0.061054 #Es como dar el alpha y
beta:aerosol_angstrom 1.3990 0.0629 Alpha de angstrom y coeficiente de
turbiedad(beta)
20 aerosol_modify ssa set 0.898700 #Variable, set/scale, valor. En este caso, ALBEDO
DE DISPERSIÓN SIMPLE
21 aerosol_modify gg set 0.700327 #Parámetro de asimetría
22 disort_intcor moments
23 aerosol_file moments
  ../bin/Pruebas_Patri/TFM_avanzado/input/mom2020/input_mom1020_20200108_1136.dat
24 quiet
```

Figura 3.5: Ejemplo de un fichero “input” utilizado en “libRadtran”.

Como puede apreciarse, este archivo “input” posee prácticamente en todas las líneas un comentario, el cuál comienza con el símbolo #, explicando a grandes rasgos el comando usado en esa línea de código, buscando un mejor entendimiento.

Las líneas 1 y la 2 tienen como función incluir los ficheros relacionados con la atmósfera y la fuente solar. En este caso se ha escogido una atmósfera “afglms”, correspondiente a latitudes medias en las estaciones de primavera-verano. Las líneas 3 y 4, por otra parte, localizan el punto en la geometría terrestre donde se desea realizar la simulación. En este caso, el punto de referencia es Valladolid, situado en las coordenadas 41° 39’ 18,65” Norte y 4° 43’ 25,39” al oeste del meridiano de Greenwich.

La línea 5 establece la hora a la que esta simulación se parece y sirve para cargar los datos de posición del Sol para dicha fecha. Este dato lo carga el programa MATLAB al generar el archivo de “input”. Las líneas 6 y 7 sirven para poner en referencia el Sol en dicho momento; establecen el ángulo solar azimutal del mismo, mediante el parámetro **phi0**, indican que el propio origen de coordenadas de este ángulo está en

el Sol, y que la medida se realiza desde la Tierra hacia fuera con el parámetro **umu**.

Por último, se carga el albedo, como puede verse en la línea 9.

La línea 10 es cargada por MATLAB y establece para cada input, la longitud de onda que se va a simular, de las 4 escogidas teniendo en cuenta las que ofrece AERONET. En este caso, es de 1020 nanómetros. En la línea 11, se selecciona el “solver” escogido para resolver la ecuación de transferencia radiativa. Analizando el resultado que se deseaba obtener, se ha visto que el “solver” más apropiado para este caso sería DISORT.

En la línea 12 se definen los elementos que se quieren obtener como salidas del programa. Se han escogido que de esta simulación se obtengan la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la radiancia (uu). Como no se desea un valor único ponderado de la radiancia en cada una de las simulaciones, en la línea 13, y utilizando el parámetro **phi**, se han definido 31 ángulos para los cuales obtener su valor de radiancia. La razón de haber escogido dichos ángulos es que se trata de los mismos ángulos que AERONET utiliza para sus medidas, y se quiere obtener simulaciones fáciles de comparar. De esta forma, el archivo de salida de este programa es una matriz compuesta por una primera columna indicando la longitud de onda para la que se ha realizado la simulación, y 31 columnas conteniendo la radiancia correspondiente a cada ángulo establecido anteriormente.

De cara a mejorar la calidad de la simulación, la fila 14 se encarga de establecer el número de flujos radiativos que se quieren usar para resolver la ecuación de transferencia radiativa con DISORT. Estos flujos o haces pueden asemejarse al número de rayos de Sol que se introducen en la atmósfera y que sufrirán las mismas interacciones que tendrían estos al atravesarla, con todas sus difracciones, reflexiones y demás. En este caso se han seleccionado 16, por ofrecer un buen balance entre calidad de la simulación y rendimiento y tiempo de cálculo.

Las líneas 15 a 17 son cargadas por MATLAB y hacen referencia al ajuste fino que se hace del espesor óptico de aerosoles de los gases que principalmente afectan a esta medida de la atmósfera, según los datos obtenidos en los archivos independientes de AERONET.

La línea 18 carga el archivo por defecto de aerosoles de “libRadtran”, para que posteriormente, en las líneas 19 a 21, sea alterado con los datos obtenidos por AERONET.

Por último, la línea 22 activa con este parámetro **disort\_incert\_moments** el método de corrección de la intensidad basado en los momentos de Legendre correspondientes a cada función de fase. Es en esta línea y en la posterior cuando son añadidos a la simulación los archivos que se habían generado y guardado anteriormente.

Por último, en la línea 24, la simulación termina.

Para llevar a cabo las simulaciones, intentando simplificar el número de ejecuciones del programa “libRadtran” ya que esto es algo costoso (debido al gran número de datos y ficheros), se ha creado un fichero de órdenes de tal forma que se puede ejecutar automáticamente seleccionando el día y la fecha que se desea simular, y el programa ejecuta la simulación, guardando el archivo de resultados en un directorio diferente. Como ya se ha comentado, este archivo de resultados está formado por una primera columna identificativa seguido de 31 columnas con datos de radiancias, y al final de

## **Modelo de transferencia radiativa: “libRadtran”**

---

todo el trabajo, se ha conseguido generar uno para cada uno de los días y horas, y cada una de las longitudes de onda que se habían querido simular.

Debido al alto número de ficheros que se generan, el proceso de comparación con los archivos de radiancia originales de AERONET no ha sido llevado a cabo de manera manual, sino que se ha construido una segunda rutina de MATLAB para poder comparar los datos descargados de AERONET y los obtenidos tras la simulación de “libRadtran”.

Este programa se ocupa de importar todos los datos del fichero de AERONET y a continuación incluir todas las radiancias obtenidas en las simulaciones. Ya que las unidades de “libRadtran” y AERONET son distintas, el primer paso que realiza es igualarlas.

A continuación, realiza una comparación de los datos, con fechas cercanas y posteriormente, se crean dos conjuntos de datos, uno correspondiente al almcántar medido y recogido por AERONET, y otro con los valores de los almcántares simulados. Estos se representan en función del ángulo de “scattering”.

Son estos datos los que se mostrarán en el capítulo siguiente, y con los que se a realizado el estudio de la precisión y la exactitud del modelo mediante un análisis estadístico.



## Capítulo 4

# Resultados y discusión

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de las simulaciones y se hará una discusión acerca de los aspectos más relevantes.

### 4.1. Muestreo de las simulaciones

El número total de simulaciones realizadas para este trabajo ha sido de 170. No todos los días han tenido los mismos datos debido a condiciones técnicas y climatológicas, por lo que no todos los días se han podido realizar el mismo número de simulaciones. Algunos ni siquiera han tenido simulaciones, según los criterios de similitud que se definieron para MATLAB. En el mes de enero casi no existen días con datos, ya sea por la cantidad de nubes en el cielo o por las condiciones meteorológicas, como por ejemplo la lluvia. Sin embargo, en el resto de meses la cantidad de datos aumenta, encontrándose en algunos días hasta 10 mediciones.

En la Figura 4.1, se muestra un resumen de los días para los que se han realizado simulaciones, desde el primer día del año, hasta el 31 de marzo, así como el número de simulaciones que hay de ese día. Esta primera imagen ya nos permite observar que a lo largo de los meses del estudio, no todos los días se tuvieron las condiciones óptimas de medición.

### 4.2. Representación de almucantares simulados

A continuación, se muestra como ejemplo el formato de los archivos obtenidos por las simulaciones de "libRadtran". Como puede verse en la Figura 4.2, y tal y como se explicó en el capítulo anterior, cada uno de estos archivos consta de una primera columna que hace referencia a la longitud de onda a la que se ha simulado, seguida por 31 columnas de radiancia.



## Resultados y discusión

caso del almucantar, se muestran las gráficas obtenidas de cada conjunto de datos con día y hora determinados. Sin embargo, para el estudio estadístico, se analizan todos los datos disponibles de forma global.

Las gráficas que se han obtenido mediante el programa realizado para este trabajo son muy numerosas, por ello, se han seleccionado unas pocas figuras que tienen interés de cara al AOD que presentan.

Como primer ejemplo, la Figura 4.3 muestra los resultados obtenidos, separados por longitudes de onda, tanto de los datos de la simulación como los medidos, para el día 5 de febrero. Este día presentó baja turbiedad, y con ello, un  $AOD_{500nm} = 0,034$ , siendo el día con el mínimo AOD de todos los que se han estudiado para este trabajo. El hecho de que haya poca turbiedad en la atmósfera, implica que hay menos aerosoles, y con ello, menor número de partículas con las que la luz pueda interactuar y dispersarse. Recordemos que el almucantar se trata de una medida de la radiancia del cielo, por lo que la toma de datos comienza después de una medida directa al sol, y luego el fotómetro comienza a girar con la misma inclinación del ángulo solar cenital  $180^\circ$ , tanto a la derecha como a la izquierda. A medida que se aleja del sol, la cantidad de cuentas digitales que detecta el instrumento disminuye, y más cuando se trata de un día despejado y con poco AOD. En esta figura es fácil ver la verdadera forma de un almucantar, y por tanto, los resultados obtenidos entre el modelo y los datos, son parecidos. Además, debido a las condiciones proporcionadas por el AOD, las medidas correspondiente a cada longitud de onda están algo separadas.

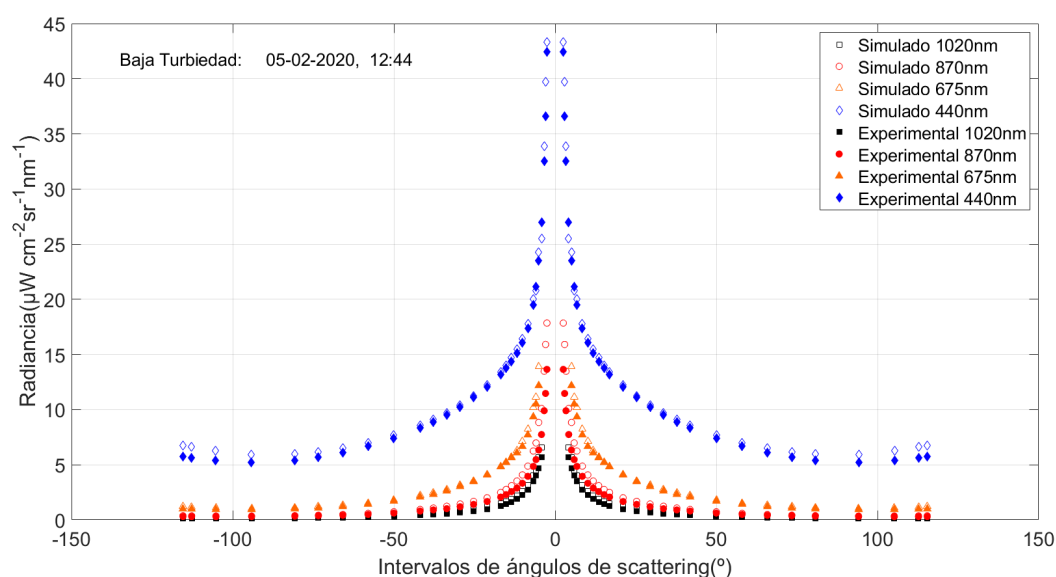


Figura 4.3: Almucantar en condiciones sin nubes, evento con poca turbiedad. Fecha del evento: 05-02-2020

La forma inversamente proporcional de las gráficas de un almucantar surge de su propia concepción y la forma de medida de los ángulos que utiliza. Los valores cercanos a 0 indican que el fotómetro se encuentra apuntando cerca del Sol (en la aureola solar) y los valores de radiancia son mayores, ya que la cantidad de cuentas digitales que capta el instrumento son mayores.

Idealmente, esta curva debería ser simétrica, sin embargo, la presencia de nubes y

## 4.2. Representación de almucantares simulados

la propia anisotropía de la atmósfera, ocasionan que a lo largo del proceso de medida, los valores en posiciones simétricas no tengan exactamente el mismo valor, y la simetría de la gráfica no sea exacta. Para este trabajo se ha decidido obviar estas pequeñas diferencias entre ambos brazos de la gráfica, y los resultados de ambas mitades se han promediado, y son los que se muestran. Además aquellas medidas de radiancia simétricas cuya diferencia ha sido mayor del 20 % han sido descartados por considerarse contaminados por nubes.

Analizando cada una de las longitudes de onda por separado, se puede apreciar que el almucántar simulado da más radiancia que el medido de verdad. Esto indica que el modelo “libRadtran”, en este caso en concreto, al dar un valor mayor que el real está sobrevalorando la radiancia.

Analizando la diferencia entre las ramas de los valores simulados y los medidos, se ve que a ángulos menores, la diferencia es mayor y que, a medida que nos alejamos del tramo central, los valores se van juntando hasta llegar en torno a los  $45^\circ$ , en los que comienzan a coincidir. Estas diferencias son más notorias en la longitud de 675 nm, que no llegan a coincidir hasta casi los  $50^\circ$ , mientras en el canal de 870 nm se juntan en torno a los  $25^\circ$ . En este caso el valor máximo que alcanza la radiancia no es muy alto, por eso al llegar a los  $100^\circ$  las ramas tienden a combarse hacia arriba. Esto es debido a que la resolución de la gráfica es menor al tener menos intensidad. Cuando la radiancia es mayor, por ejemplo en la Figura 4.4, correspondiente al 7 de febrero, al llegar a tener radiancias cercanas a  $250 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ , esa curva no se aprecia.

La misma forma se puede apreciar en el segundo ejemplo, en el que se tomará la Figura 4.4, con fecha del 7 de febrero, pero en este caso, se midió un  $\text{AOD}_{500\text{nm}} = 0,26$ , encontrándose un AOD de tipo mezcla entre partículas gruesas (es decir, con un radio efectivo mayor a  $1 \mu\text{m}$ ) y partículas finas (con radio efectivo menor de  $1 \mu\text{m}$ ). En este caso concreto es interesante, ya que se trata de un evento de mezcla con una proporción aproximadamente igual de las partículas finas y las gruesas. Es decir, no hay predominancia de ninguna de las dos. Prácticamente todo lo comentado anteriormente se mantiene para esta figura, notando que la cantidad de radiancia que ha recibido el instrumento es mayor. Por otro lado, obviando la diferencia de la escala entre estas figuras, es posible notar que la separación de los canales en este caso es mayor que en la Figura 4.3, pudiendo ser debido al aumento de AOD en la atmósfera.

Como tercer y último ejemplo, se presenta uno de los eventos con más importancia en Castilla y León: la presencia de aerosol desértico. Esto es así ya que al encontrarse en una localización relativamente cercana a los desiertos de África, las intrusiones de polvo proveniente de este continente son bastante comunes [19]. A continuación, en la Figura 4.5 se muestran dos ejemplos:

En la Figura 4.5.a), se tiene un evento desértico que tuvo lugar el 23 de enero. En el se encontró un  $\text{AOD}_{500\text{nm}} = 0,33$  diario con un  $\alpha = 0,29$ . En la Figura 4.5.b), se muestra el almucántar del evento de mayor turbiedad que se ha tenido durante todo el periodo de medición, el cual se encontró el día 21 de marzo, con un  $\text{AOD}_{500\text{nm}} = 0,51$  diario y  $\alpha = 0,21$ . Esto implica que al tener suspendidas en la atmósfera partículas gruesas, con radios efectivos mayores y con mayor AOD, la dispersión de la luz será menos dependiente de la longitud de onda y además será mayor. Al haber más aerosoles suspendidos en la atmósfera, la dispersión de la radiación es mayor, y por lo tanto el Cimel recoge más cuentas digitales en todas las direcciones. Como puede también



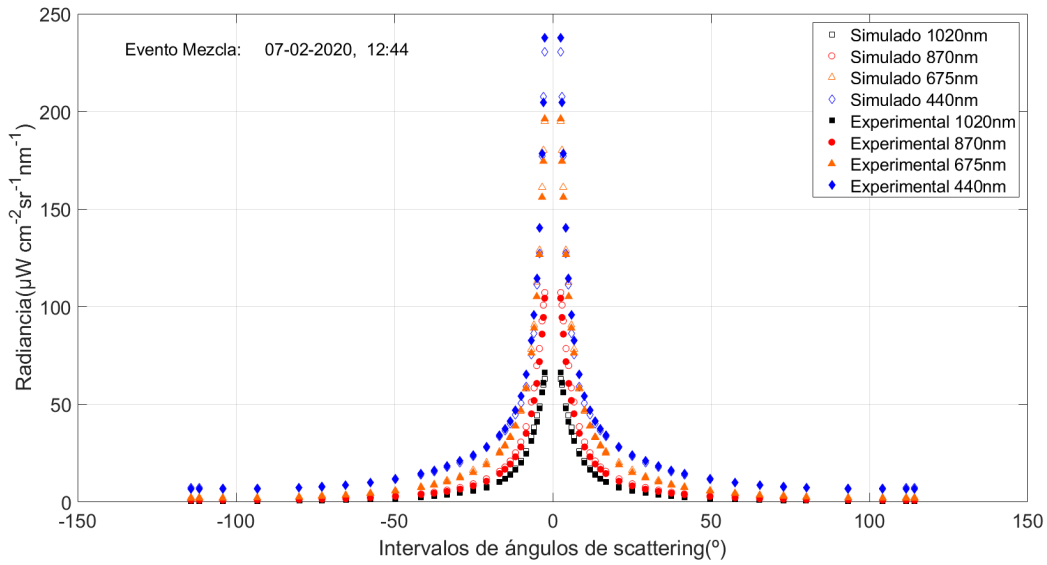


Figura 4.4: Almucantar en condiciones sin nubes, evento mezcla (fino y grueso en proporciones similares). Fecha del evento: 07-02-2020

verse, en estas situaciones, el modelo no es tan preciso a la hora de simular los resultados.

### 4.3. Parámetros estadísticos comparativos entre simulación y mediciones de radiancia

Para llevar a cabo el análisis estadístico y poder estudiar la precisión y exactitud de las simulaciones (E) y los datos medidos de AERONET (R), se han calculado distintos índices estadísticos:

- MBE (Mean Bias Error): calcula la diferencia promedio entre los valores que arrojan las simulaciones (E) y los datos medidos (R). Este índice da cuenta de la exactitud de las simulaciones. Las fórmulas que permiten calcular dichos parámetros, definidos tanto en valor absoluto, como relativo (tanto por ciento), son las siguientes:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - R_i)}{N} \quad (4.1)$$

$$MBE(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{E_i - R_i}{R_i} \right) \quad (4.2)$$

- RMSE (Root Mean Square Error): calcula la raíz cuadrada del cociente del cuadrado de las diferencias entre el modelo (E) y las medidas tomadas (R). Es una medida de la desviación. Sus fórmulas absolutas y relativas son:

### 4.3. Parámetros estadísticos comparativos entre simulación y mediciones de radiancia

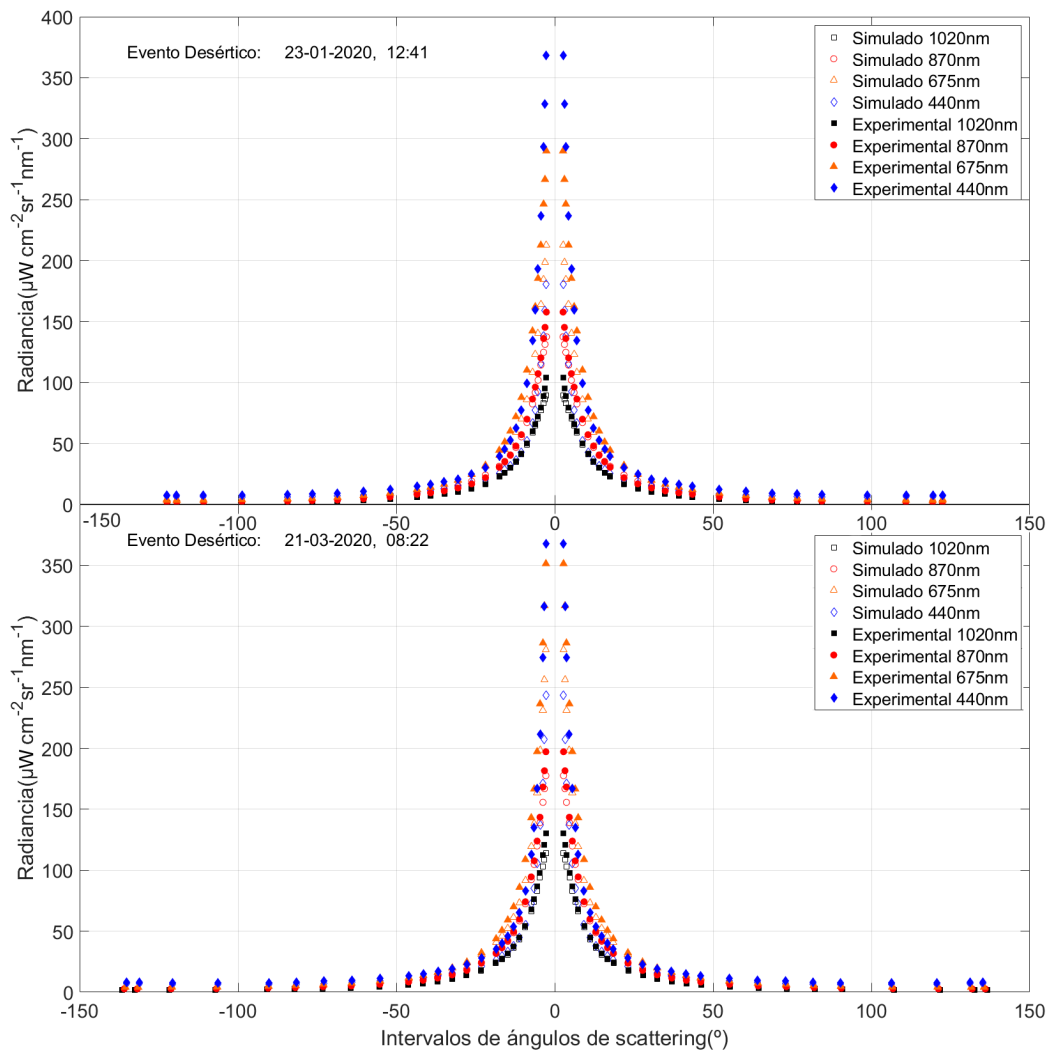


Figura 4.5: Almacantar en condiciones sin nubes. Eventos desérticos

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - R_i)^2}{N}} \quad (4.3)$$

$$RMSE(\%) = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - R_i}{R_i}\right)^2} \quad (4.4)$$

- **Desviación estándar:** es una medida de la dispersión de las diferencias entre las simulaciones y las medidas, lo que indica la precisión de las simulaciones. Se ha calculado con la diferencia entre el modelo (E) y las mediciones (R) a través de la configuración interna de MATLAB. Esta expresión se calcula tanto en valor absoluto como en relativo.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - M)^2} \quad (4.5)$$

donde M es la media de los valores y  $\Delta$  es la variación de las medidas, dada por la expresión  $E_i - R_i$  ó  $100 \cdot \frac{E_i - R_i}{E_i}$

La importancia de ambos valores, absoluto y relativo, estriba en que únicamente no es necesario conocer las variaciones absolutas que se producen en las diferentes longitudes de onda, según se analizan estos parámetros, sino que es necesario valorar el peso real que dichos cambios tienen en el conjunto global. Un cambio absoluto aparentemente grande puede tener un peso menor a otro, dependiendo de con lo que se lo compare. Por todo esto se analizarán los distintos parámetros estadísticos de ambas formas, no solo para conocer su valor absoluto, sino también el peso real que tienen.

Todas estas operaciones fueron llevadas a cabo por la segunda rutina de MATLAB, y sus resultados pueden observarse desde la Figura 4.6 hasta 4.9.

### **MBE**

El MBE nos habla de la exactitud, por eso al analizar los datos hablaremos de cómo de exacto es dependiendo tanto de la longitud de onda como en cada uno de los rangos de ángulos que se han seleccionado. Valores de MBE cercanos a cero indican que la discrepancia entre las medidas es menor, y por lo tanto el modelo es más exacto.

### 4.3. Parámetros estadísticos comparativos entre simulación y mediciones de radiancia

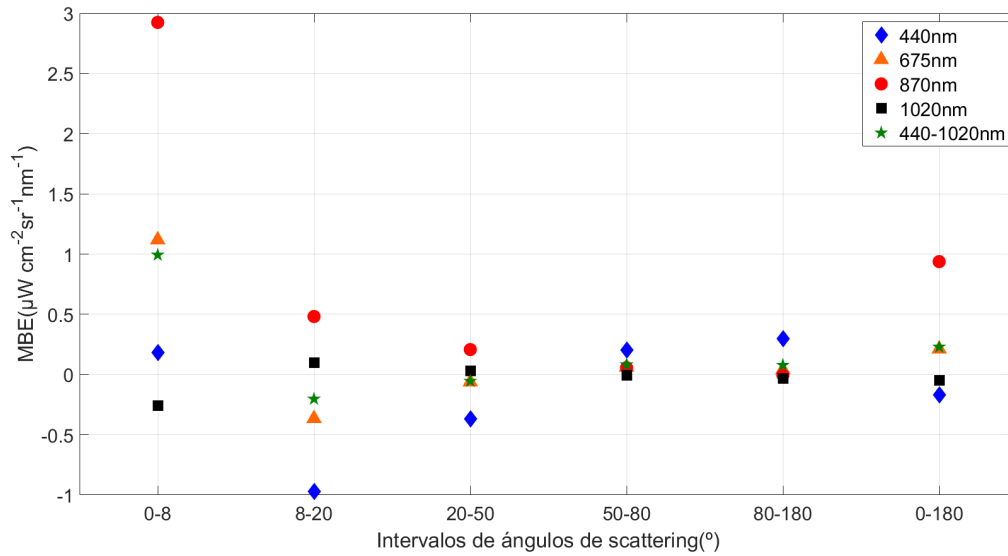


Figura 4.6: MBE (Mean Bias Error) en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

Como puede verse en la Figura 4.6, en una primera impresión, parece que el modelo ha sobrevalorado casi todos los datos, algunos incluso, con bastante diferencia. Sin embargo, un análisis más detallado arroja otros detalles:

En el canal de 440 nm aparecen dos valores negativos, los cuales infravaloran la simulación respecto a los datos, y tres positivos, que la sobrevaloran. Además, los valores negativos son mayores en valor absoluto en comparación a los positivos, pudiendo decir que, en 440 nm, el modelo es menos exacto en el rango de ángulos desde 8° a 50°.

En el caso de 675 nm, hay un mayor valor en el primer rango de ángulos (8°-20°), sin embargo, para el resto de ángulos, los valores son bastante cercanos a 0. Lo mismo ocurre con el canal de 870 nm, pero en este caso se puede apreciar que en el último rango de ángulos es mucho más exacto.

Por último, en el canal de 1020 nm, prácticamente todos los canales tienen los mismos valores, sin que ninguno se desvíe con valores notoriamente superiores al resto, pudiendo afirmar que es el más exacto de todos. En general, el que más desviaciones de todos los ángulos ofrece es el de 0°-8°, siendo prácticamente 0 entre 20° y 180°.

Si observamos ahora la Figura 4.7, observamos que el mayor MBE porcentual se observa en el rango de los 870 nm (casi un 20%). Todos los valores de los promedios (considerando todos los ángulos, 0°-180°) son positivos, y los porcentajes son inferiores al 15%. Siendo el valor de 440nm el que tiene un MBE más cercano al 0%.

## Resultados y discusión

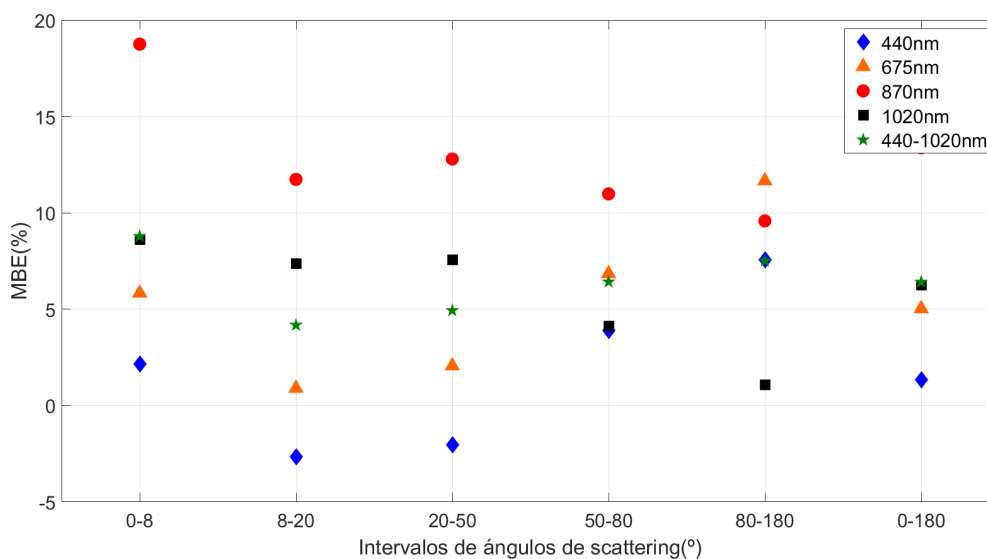


Figura 4.7: MBE (Mean Bias Error) relativo, en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

## RMSE

El RMSE se relaciona con los residuos (diferencia entre el valor previsto y lo obtenido). Como se ve en la Figura 4.8, el canal de 440 nm es el que ofrece mayores errores, en el primer rango de ángulos de ‘scattering’. Sin embargo, para el resto de ángulos, los 4 canales muestran valores inferiores al  $4 \mu\text{W cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ . Los menores errores son obtenidos para la longitud de onda de 870 nm. Considerando todos los ángulos de scattering  $0^\circ$ - $180^\circ$ , los menores errores están en el canal de 870nm con un error menor al  $6 \mu\text{W cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ .

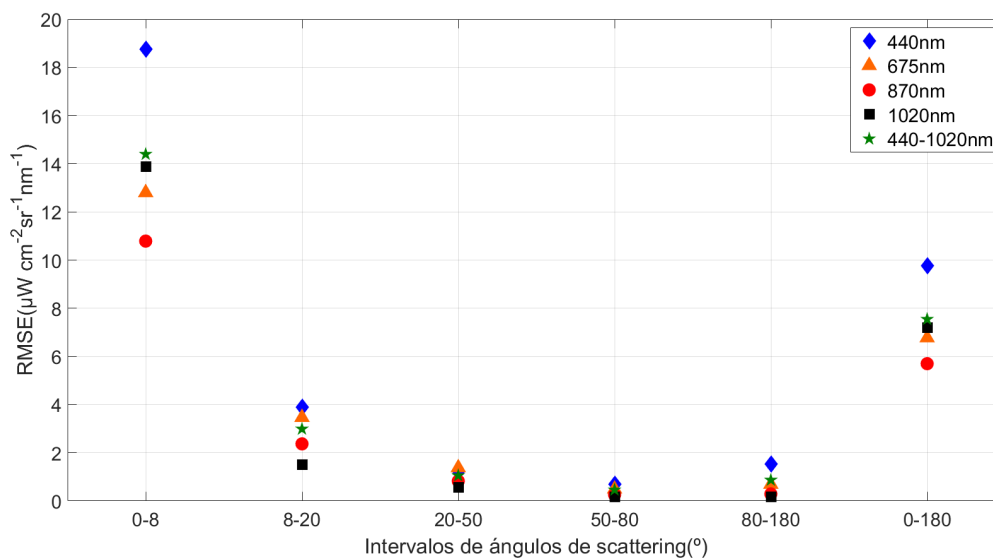


Figura 4.8: RMSE (Root Mean Square Error) en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

En la Figura 4.9, se muestra el RMSE en valor porcentual. Se puede apreciar una

### 4.3. Parámetros estadísticos comparativos entre simulación y mediciones de radiancia

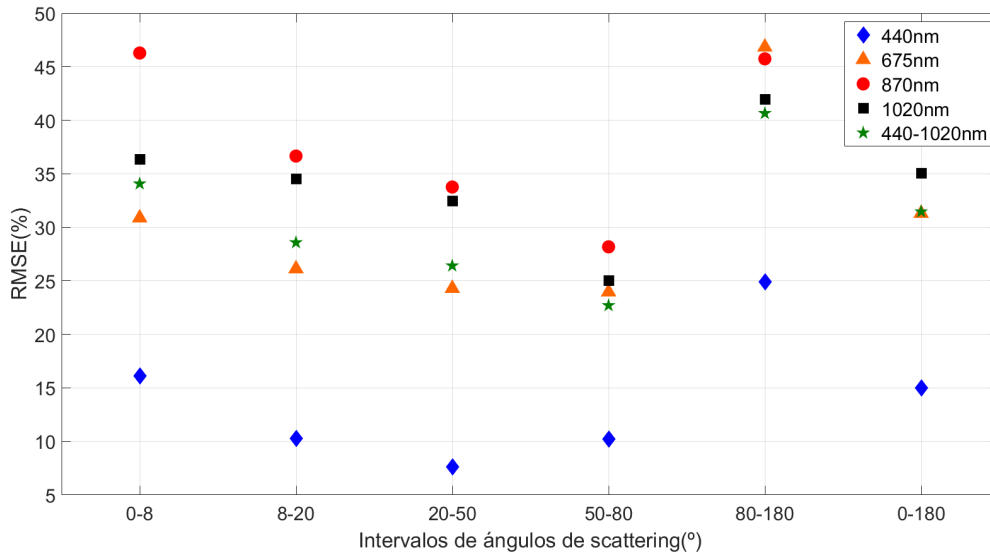


Figura 4.9: RMSE (Root Mean Square Error) relativo, en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

clara separación entre los 4 canales. Los valores más bajos de RMSE porcentuales se observan a 440 nm, oscilando entre el 7 y 25%, obteniéndose un valor medio para todos los ángulos de scattering del 15%. En general, el canal 870 nm es el que muestra mayores valores de RMSE, oscilando entre el 30%-45%. Utilizando todas las longitudes de onda (440-1020 nm), se alcanza un RMSE del 30% cuando se consideran todos los ángulos de scattering. En el rango de 50°-80° las diferencias entre los 4 canales se ven reducidas.

### Desviación estándar

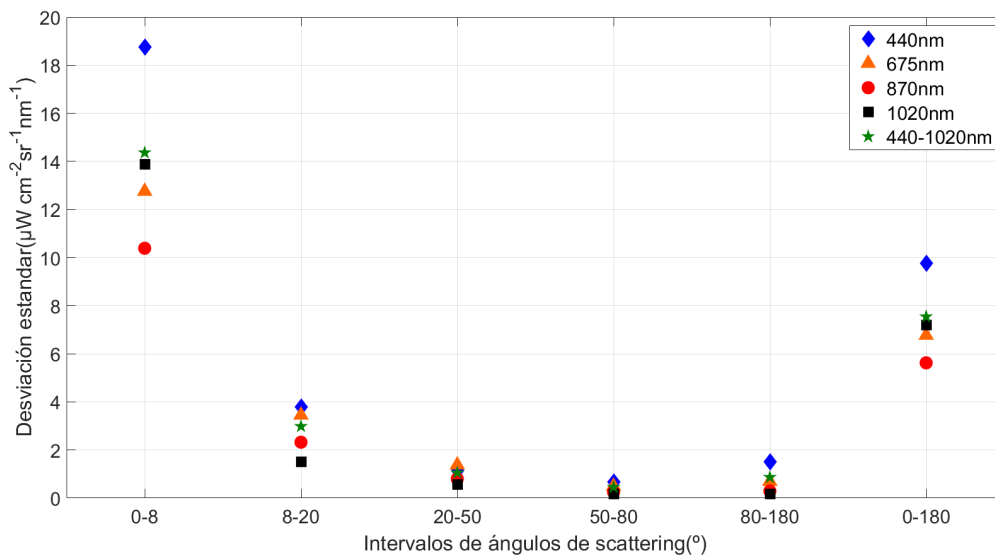


Figura 4.10: Desviación estándar en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

## Resultados y discusión

Cuando se habla de la desviación estándar de un modelo frente a unos datos obtenidos de mediciones se refiere a la precisión del modelo. Como se puede apreciar, las Figuras 4.10 y 4.11 que se obtienen son bastante parecidas a los obtenidas para el RSME, por lo que las conclusiones que se sacan son similares. En este caso, como se ve en la Figura 4.10, las desviaciones estándar son muy cercanas al cero, indicando poca desviación entre los datos, y por lo tanto, una mayor precisión. La mayor de las desviaciones se encuentran en el rango de ángulos de  $0^{\circ}$ - $8^{\circ}$ , y la menor de estas, en el rango entre  $50^{\circ}$ - $80^{\circ}$ .

Si analizamos las longitudes de onda por separado, la mayor variación aparece en el canal de 440 nm. Sin embargo, los canales de 870 y 1020 nm presentan los menores valores de desviación estandar para todos los ángulos de scattering. Utilizando todas las longitudes de onda y todas los ángulos de scattering se calcula una desviación estándar de  $8\mu\text{Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ .

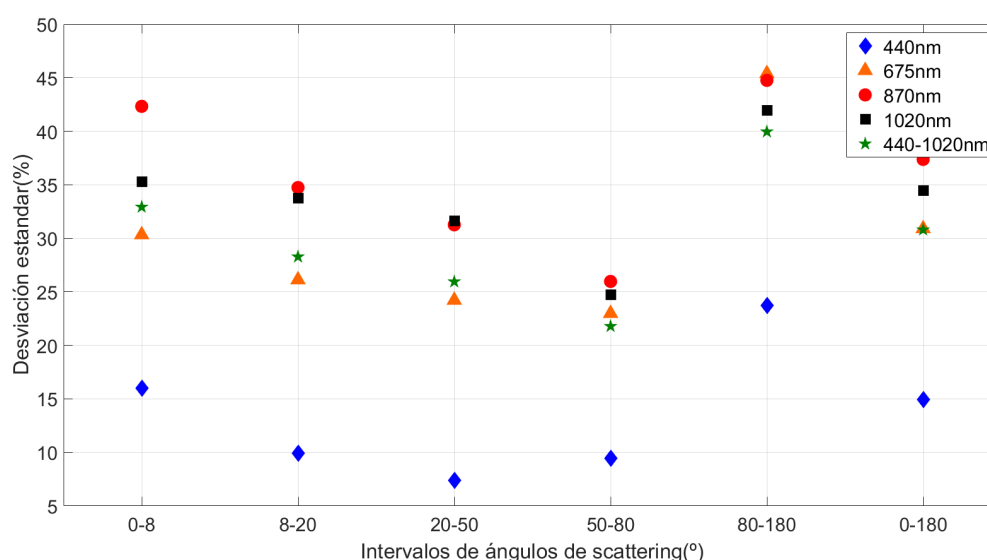


Figura 4.11: Desviación estándar relativa, en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

Analizando ahora los valores relativos de la desviación estándar (Figura 4.11), es el canal de 870 nm es el que tiene mayores variaciones de hasta 25%-45%, mientras que el que menos tiene es el de 440 nm, quedándose en el 7-25%. Utilizando todos los ángulos de scattering la desviación estandar oscila entre 15% a 440 nm y el 37% a 870 nm. Lo que se puede ver comparando los porcentajes y las medidas absolutas, es que, aunque supuestamente en el canal de 440 nm las medidas absolutas denotaban que este canal era el que tenía la mayor desviación, su estudio en porcentajes relativos arroja que en realidad es el menor de todos.

### Tabla resumen

Como conclusión a este capítulo, la tabla 4.1 presenta un resumen de los valores estadísticos estudiados hasta el momento. Además, se incluyen como anexo a este trabajo, los resultados numéricos asociados a las figuras de este capítulo.

### 4.3. Parámetros estadísticos comparativos entre simulación y mediciones de radiancia

Tabla 4.1: MBE (Mean Bias Error), desviación estándar y RSME (Root Mean Square Error), en función de las longitudes de onda y para todos los ángulos de “scattering” ( $0^\circ - 180^\circ$ ).

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
MBE	-0,169	0,212	0,937	-0,048	0,229
MBE (%)	1,33	5,03	13,4	6,24	6,42
Desviación estándar	9,77	6,77	5,70	7,20	7,54
Desviación estándar (%)	15,0	31,3	39,7	35,0	31,5
RMSE	9,77	6,77	5,62	7,20	7,54
RMSE(%)	14,9	30,9	37,4	34,5	30,8

Como ya se ha comentado con anterioridad, 440 nm consiguen los resultados más precisos y exactos ya que se han obtenido los valores más bajos de los parámetros estadísticos a estudio.

De forma general, se obtienen unos valores medios del MBE del 6%, desviación estándar 31% y RMSE 31%.

Por rangos de “scattering” se ha encontrado que el intervalo que presenta mayor error a la hora de simular es la zona más cercana al sol, correspondiente al rango  $0^\circ-8^\circ$ , hecho que concuerda con estudios anteriores [20]. El MBE obtenido en este estudio es ligeramente inferior al presentado en un estudio anterior realizado con cámaras de cielo y un fotómetro Cimel [20], lo que pone de manifiesto la elección adecuada tanto del “solver” de la ecuación de transferencia radiativa como la caracterización atmosférica seleccionada para este trabajo de fin de máster.



## Capítulo 5

# Conclusiones

En este trabajo, se ha intentado evaluar la precisión y exactitud de “libRadtran” como modelo de transferencia radiativa a la hora de reproducir medidas de radiancia. El modelo se ha alimentado de datos experimentales de la red AERONET, y comparando las simulaciones con datos reales medidos con un fotómetro Cimel en Valladolid. Este proceso se ha llevado a cabo durante varios meses en los que las condiciones climatológicas han permitido medidas de calidad y se han tratado para posteriormente realizarles un análisis estadístico.

En primer lugar, se ha de remarcar el bajo error que este modelo de simulación ha producido, una vez que este se encuentra configurado correctamente. Se trata de un programa con multitud de parámetros que se pueden ajustar finamente, y que nos permiten definir al detalle los distintos aspectos de la atmósfera que se quiere simular, por lo que la similitud con la atmósfera real que se puede conseguir es muy elevada. Por suerte, “libRadtran” es un programa suficientemente amigable para ofrecernos estas posibilidades y el trabajo se puede realizar de manera muy sencilla con él.

A pesar de que los errores que se obtienen al comparar las simulaciones con las medidas reales son bajos, es necesario remarcar que este programa es más exacto que preciso. Los resultados que se obtienen para ángulos de “scattering” comprendidos entre  $50^\circ$  y  $80^\circ$  son mejores, y se acercan más a los resultados reales, que para otros ángulos más extremos. Sin embargo, es también remarcable que pese a todo, la simulación muestra desviaciones de precisión homogéneas en la mayoría de los rangos de estudio. En general, los resultados finales que se obtienen analizando las distintas longitudes de onda no son muy distintos, y las diferencias entre ellas son pequeñas. Teniendo en cuenta todas las longitudes de onda y los ángulos de “scattering”, se concluye que la desviación estándar promedio (precisión) es del 31 %, y el error promedio (exactitud) es del 6 %.

Una ventaja más de este sistema es que, una vez configurado, permite ser trasladado fácilmente a otras ubicaciones, y poder probarlo con configuraciones distintas, no sólo de ubicación, sino también en intervalos de tiempo distintos. Bastaría únicamente con cargar los datos meteorológicos de otras estaciones de las que se quisieran obtener los resultados, ya que el resto de las rutinas funcionarían sin otros problemas. Se trata por tanto de un programa versátil y replicable.

Todas estas características que se mencionan ahora son también extensibles a las

---

rutinas de trabajo que se han creado en MATLAB, que ha demostrado ser un lenguaje de programación, si bien no tan amigable como el lenguaje de “libRadtran”, una herramienta muy potente para la creación de algoritmos.

Por último, aunque este trabajo sólo haya explorado las posibilidades de este sistema para llevar a cabo simulaciones y comprobaciones de radiancia en modelos unidimensionales, es necesario indicar que el objeto inicial del mismo en su concepción fue llevar a cabo estos procesos para un modelo tridimensional y en presencia variable de nubes. Lamentablemente, la circunstancia acaecida durante la segunda mitad de este curso 2019-2020 debida a la pandemia de COVID-19, y la imposibilidad de realizar más trabajo experimental, vio truncada esta idea inicial. Sin embargo, una vez conocidas las limitaciones y la versatilidad de “libRadtran”, el siguiente paso podría ser cambiar el “solver” de la ecuación de transferencia radiativa por “mystic” para dotar al programa de la capacidad para realizar dichas operaciones más avanzadas, aunque con él, cambiarían también otros parámetros que sería necesario reajustar.

# Bibliografía

- [1] Allen, J. S.: The Classification of Stellar Spectra. *UCL Department of Physics and Astronomy, Astrophysics Group*
- [2] de la Casinière, A. C., Cachorro, V. E.: La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera, *Ciencias (Universidad de Valladolid)*, 2008.
- [3] Román, R.: Reconstrucción y análisis de la radiación ultravioleta eritemática en la Península Ibérica desde 1950, tesis doctoral, *Universidad de Valladolid*, 2014.
- [4] Iqbal, M.: An introduction to solar radiation, *Academic Press*, 1983.
- [5] Wenham, S.R.: Applied Photovoltaics, *Earthscan publications*, 2013.
- [6] Román, R., Antón, M., Valenzuela, A., Gil, J. E., Lyamani, H., de Miguel, A., Olmo, F. J., Bilbao, J., Alados-Arboledas, L.: Evaluation of the desert dust effects on global, direct and diffuse spectral ultraviolet irradiance, *Tellus B*, 65, 19578, 2013.
- [7] Bodhaine, B. A., Wood, N. B., Dutton, E. F., Slusser, J. R.: On Rayleigh optical depth calculations. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 16, 1999.
- [8] Practical Stull, R.: Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science, *Dept. of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, University of British Columbia*, 2017.
- [9] Toledano, C.: 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*, 2005.
- [10] B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, A. Smirnov, AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sensing of Environment*, Volume 66, Issue 1, 1998.
- [11] Fuertes, D.: Desarrollo de nuevos métodos y herramientas para la caracterización avanzada de aerosoles atmosféricos a partir de medidas de teledetección, tesis doctoral, *Universidad de Valladolid*, 2018.
- [12] Dubovik, O., King, M. D.: A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 105, 20673–20696, 2000.
- [13] Dubovik, O., Sinyuk, A., Lapyonok, T., Holben, B. N., Mishchenko, M., Yang, P., Eck, T., Volten, H., Muñoz, O., Veihelmann, B., Van Der Zande, W. J., Leon, J.,

- Sorokin, M., Slutsker, I.: Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111, D11208, 2006.
- [14] Dubovik, O., Lapyonok, T., Litvinov, P., Herman, M., Fuertes, D., Ducos, F., Lopatin, A., Chaikovsky, A., Torres, B., Derimian, Y., Huang, X., Aspetsberger, M., Federspiel, C.: GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere. *SPIE Newsroom*, 2014.
- [15] Mayer, B. and Kylling, A.: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1855–1877, 2005.
- [16] Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L.: The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1), *Geosci. Model Dev.*, 9, 1647–1672, 2016.
- [17] Dahlback, A. and Stamnes, K.: A new spherical model for computing the radiation field available for photolysis and heating at twilight, *Planet. Space Sci.*, 39, 671–683, 1991.
- [18] Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., and Richter B.: libRadtran user's guide (version 2.0.3), 2019.
- [19] Cachorro, V.E., Burgos, M.A., Mateos, D., Toledano, C., Bennouna, Y., Torres, B., de Frutos, Á.M., Herguedas, Á.: Inventory of African desert dust events in the north-central Iberian Peninsula in 2003-2014 based on sun-photometerAERONET nad particulate-mass-EMEP data, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8227-8248, 2016.
- [20] Román, R., Antón, M., Cazorla, A., de Miguel, A., Olmo, F.J., Bilbao, J., Alados-Arboledas, L.: Calibration of an all-sky camera for obtaining sky radiance at three wavelenghts, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2013-2020, 2012.

# Anexo

## Anexo 1: Resultados numéricos del análisis estadístico

A continuación se muestran las tablas con los valores numéricos correspondientes a las figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11 del capítulo 4.

### MBE (Mean Bias Error)

Tabla 1: MBE (Mean Bias Error) ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ), en función del rango de los ángulos de scattering y las longitudes de onda.

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	0,181	1,118	2,924	-0,259	0,993
8°-20°	-0,969	-0,365	0,481	0,101	-0,203
20°-50°	-0,370	-0,062	0,207	0,028	-0,055
50°-80°	0,205	0,061	0,057	-0,008	0,082
80°-180°	0,295	0,041	-0,005	-0,035	0,078
0°-180°	-0,169	0,212	0,937	-0,048	0,229

Tabla 2: MBE (Mean Bias Error) relativo (%), en función del rango de los ángulos de "scattering" y las longitudes de onda.

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	2,152	5,837	18,758	8,599	8,786
8°-20°	-2,665	0,897	11,738	7,366	4,178
20°-50°	-2,048	2,066	12,795	7,559	4,936
50°-80°	3,900	6,845	10,987	4,121	6,420
80°-180°	7,559	11,668	9,586	1,081	7,510
0°-180°	1,334	5,033	13,384	6,239	6,415

**Desviación estándar***Tabla 3:* Desviación Estándar de la radiancia ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ), en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	18,748	12,800	10,788	13,885	14,395
8°-20°	3,895	3,468	2,371	1,503	2,988
20°-50°	1,209	1,380	0,825	0,561	1,054
50°-80°	0,687	0,494	0,257	0,181	0,459
80°-180°	1,522	0,692	0,292	0,172	0,868
0°-180°	9,772	6,772	5,700	7,200	7,544

*Tabla 4:* Desviación Estándar relativa (%), en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	16,117	30,878	46,280	36,319	34,071
8°-20°	10,287	26,126	36,656	34,512	28,577
20°-50°	7,637	24,294	33,763	32,475	26,408
50°-80°	10,205	23,962	28,177	25,048	22,703
80°-180°	24,879	46,838	45,738	41,949	40,646
0°-180°	14,996	31,306	39,689	35,028	31,457

**RMSE (Root Mean Square Error)***Tabla 5:* RMSE (Root Square Mean Error) ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ), en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	18,755	12,757	10,388	13,888	14,363
8°-20°	3,77	3,450	2,322	1,501	2,982
20°-50°	1,151	1,379	0,799	0,561	1,052
50°-80°	0,656	0,491	0,251	0,181	0,452
80°-180°	1,494	0,691	0,292	0,168	0,864
0°-180°	9,772	6,769	5,623	7,201	7,541

*Tabla 6:* RMSE (Root Square Mean Error) relativo (%), en función del rango de los ángulos de “scattering” y las longitudes de onda.

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	15,979	30,335	42,327	35,301	32,922
8°-20°	9,940	26,124	34,744	33,735	28,274
20°-50°	7,361	24,218	31,261	31,599	25,946
50°-80°	9,433	22,985	25,972	24,730	21,781
80°-180°	23,717	45,390	44,752	41,963	39,953
0°-180°	14,938	30,902	37,369	34,472	30,797

**Otros parámetros estadísticos**

Tabla 7: Pendiente del ajuste de mínimos cuadrados

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	0,835	0,944	1,057	0,694	0,907
8°-20°	0,744	0,913	1,030	1,002	0,915
20°-50°	0,831	0,914	1,014	0,963	0,942
50°-80°	0,659	0,846	0,943	0,893	0,999
80°-180°	0,198	0,455	0,685	0,738	0,986
0°-180°	0,899	0,972	1,076	0,782	0,944

Tabla 8: Ordenada en el origen del ajuste de mínimos cuadrados ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ )

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	8,546	3,436	1,564	4,944	4,102
8°-20°	4,951	0,862	0,243	0,092	0,883
20°-50°	1,827	0,424	0,170	0,091	0,288
50°-80°	2,702	0,404	0,112	0,052	0,084
80°-180°	5,695	0,978	0,215	0,065	0,112
0°-180°	2,167	0,657	0,255	1,301	0,998

Tabla 9:  $R^2$  - coeficiente de determinación

	440 nm	675 nm	870 nm	1020 nm	440-1020 nm
0°-8°	0,790	0,907	0,881	0,614	0,849
8°-20°	0,825	0,920	0,937	0,950	0,934
20°-50°	0,890	0,867	0,922	0,930	0,963
50°-80°	0,737	0,824	0,908	0,913	0,977
80°-180°	0,055	0,233	0,589	0,737	0,906
0°-180°	0,873	0,939	0,919	0,724	0,897