



Facultad de ciencias

Trabajo de Fin de Grado

Obtención de parámetros atmosféricos mediante un ceilómetro

Autor: Marcos Herreras Giralda

Tutor: Carlos Toledano Olmeda

14 de julio de 2016

Resumen

El objetivo de este trabajo ha sido comprender todos los procesos físicos que hay detrás de los ceilómetros, así como, entender su funcionamiento interno, además de desarrollar distintos software en lenguaje de programación C, para la obtención y representación de diferentes productos atmosféricos y su posterior tratamiento para su inclusión en la base de datos CÆLIS y en algoritmos de inversión como GRASP. Para ello en primer lugar se explican los fundamentos físicos básicos sobre los que se sustentan este tipo de aparatos, como es la 'Teoría de la dispersión'. Posteriormente se ha hecho una descripción del tipo de aparatos más importantes dentro de esta ciencia, los LIDAR, para luego particularizar al caso concreto de los ceilómetros y más concretamente al ceilómetro sobre el cual se han realizado los diferentes programas, el Jenoptik CHM15k Nimbus. Por último se muestran los resultados de las codificaciones desarrolladas y la filosofía general que se ha seguido para obtenerlas.

Abstract

The main objective of this project was to understand all the physical processes involved in the ceilometer measurement technique, as well as its internal performance. Furthermore, several programs based on 'C' language have been developed for acquiring and representing atmospheric products, enabling its later treatment by its inclusion in the CÆLIS database and the GRASP inversion algorithm. The general structure of this project can be divided in a first part in which an overview of the basic Physics is provided, the widely known 'Scattering Theory'. The next step was making a description of the most important device of this type , the LIDAR. Later a particularization to the ceilometers was made with a special focus on the device whose measurements guided the software that has been developed, the Jenoptik CHM15k Nimbus. Finally, the results of the different programs are shown with an explanation of the general processes followed to achieve them.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Teoría general de la Dispersión | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Partículas o Moléculas | 2 |
| 1.3. Soluciones a la ecuación de ondas | 2 |
| 1.4. Campos incidentes y dispersados | 4 |
| 1.5. Secciones eficaces de dispersión y extinción | 6 |
| 1.6. Aproximación electrostática | 6 |
| 1.7. Dispersión Rayleigh | 7 |
| 2. LIDAR | 9 |
| 2.1. Funcionamiento | 9 |
| 2.1.1. Telescopio | 11 |
| 2.1.2. Policromador | 11 |
| 2.1.3. Detectores PMT y APD | 12 |
| 2.2. Ecuación Lidar | 14 |
| 2.2.1. Método de Klett-Fernald-Sasano | 15 |
| 2.2.2. Método de trabajo. Aproximaciones | 17 |
| 2.3. Tipos de Lidar | 19 |
| 3. Ceilómetro | 21 |
| 3.1. ¿Por qué ceilómetros y no LIDAR? | 21 |
| 3.2. Rango de medida. | 22 |
| 3.2.1. Límite inferior | 22 |
| 3.2.2. Límite superior | 24 |
| 3.3. Ecuación Lidar aplicada al ceilómetro. Coeficientes de retrodispersión. | 25 |
| 3.4. Absorción por vapor de agua. | 27 |
| 3.5. Extinción y retrodispersión bajo distintas condiciones atmosféricas. | 28 |
| 3.6. Altura de la base de las nubes | 29 |
| 4. Jenoptik CHM15K Nimbus | 31 |
| 4.1. Descripción técnica del aparato | 31 |
| 4.1.1. Condiciones ambientales de Operabilidad y Mantenimiento | 32 |
| 4.2. Productos | 33 |
| 4.2.1. NetCDF | 33 |
| 4.2.2. Descripción | 35 |
| 4.3. Código desarrollado en este trabajo | 53 |
| 4.3.1. CÆLIS | 53 |
| 4.3.2. GRASP | 53 |
| 4.3.3. Procesamiento | 53 |
| Conclusiones | 59 |

| | |
|-------------------------|-----------|
| Lista de figuras | 62 |
| Lista de tablas | 65 |

Capítulo 1

Teoría general de la Dispersión

En esta sección trataremos los aspectos teóricos de la Física concerniente al aparato de medida sobre el que trata este trabajo. Podemos dividir la dispersión en dos grandes grupos, los procesos en los que la longitud de onda de la radiación incidente se conserva y los que no. Al segundo grupo pertenece la conocida como dispersión Raman, que siendo de gran importancia y con mucha presencia en la comunidad científica, dejaremos más en segundo plano aquí. Nos centraremos en los procesos de dispersión elástica, siendo la más general de las teorías la Mie y particularizaremos para el caso de la dispersión Rayleigh. En esta sección se hará un desarrollo formal y matemático de los campos electromagnéticos involucrados para dispersiones totalmente generales. En capítulos posteriores veremos la aplicación de este formalismo a la ciencia atmosférica en general y a los ceilómetros en particular.

1.1. Introducción

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo se hace un estudio teórico de los diferentes procesos de interacción radiación-materia principalmente centrado en partículas de forma esférica. Se basa en el estudio del comportamiento de los diferentes campos emergentes en la interacción de un haz de luz contra una partícula material, una parte de la energía incidente provocará emisión de radiación secundaria conocida como scattering y otra se verá extinguida en procesos de absorción propios de cada partícula.

De tal manera que junto con las ecuaciones de Maxwell y cálculo numérico por ordenador, la forma de los diferentes campos de scattering obtenidos nos permiten estudiar factores como el efecto de la geometría de la partícula, el índice de refracción de ella respecto al medio o la dependencia angular con el haz incidente.

Pese a que la teoría Mie se basa en los mismos principios que la teoría más común, la de Rayleigh, aquella resulta mucho más compleja porque aborda el problema desde una perspectiva mucho más general. El mayor tamaño de las partículas, sobre las que se suele aplicar esta teoría, propicia la aparición de patrones de interferencia entre las ondas parciales emitidas por los multipolos de la partícula (mientras que en teoría Rayleigh únicamente se considera una aproximación dipolar; posteriormente trataremos esto más en detalle), debido a las diferencias de fase que poseen. Este tipo de análisis se lleva a cabo de forma matemática a través de desarrollos en serie infinitos de armónicos esféricos.

Las principales diferencias entre la teoría Mie y el punto de vista de la de Rayleigh son la mayor complejidad a nivel angular de las soluciones, la menor dependencia con la longitud de onda (irá disminuyendo según aumenta el tamaño de las partículas) y el aumento de la dispersión hacia adelante en comparación con la otra teoría.

1.2. Partículas o Moléculas

Como ya estamos viendo el tamaño de las partículas sobre las que se van a producir los procesos de dispersión va a tener una influencia decisiva en el tipo de dispersión que producen. Si estas tienen un tamaño relativamente pequeño respecto a la longitud de radiación incidente, entonces tenderán a dispersar la misma cantidad de energía tanto hacia adelante como hacia atrás. Sin embargo si el tamaño es de una magnitud similar o superior a la longitud de onda incidente, la dispersión se producirá mayoritariamente en la dirección en la que se propaga la radiación incidente.

Para poder abordar este tipo de procesos desde el punto de vista de la teoría electromagnética definimos el *parámetro de tamaño*:

$$\chi = \frac{2\pi a N_m}{\lambda} \quad (1.1)$$

Donde 'a' es el radio de las partículas, que supondremos esféricas en este análisis, 'λ' es la longitud de onda de la radiación incidente y 'N_m' es el índice de refracción del medio en el que ocurre el proceso.

Una vez que tenemos hechas estas definiciones estamos en condiciones de hacer una clasificación entre partículas y moléculas:

- "Moléculas" se referirá a aquellas partículas cuyo parámetro de tamaño sea $\chi \ll 1$, esto es, más pequeñas que la longitud de onda incidente. En este caso estarán sujetas a dispersión Rayleigh, donde la solución a las ecuaciones de Maxwell presenta una forma particularmente simple.

- "Partículas" será utilizado aquí para referirse a aquellas que cumplen $\chi \geq 1$, y estarán sometidas a la dispersión Mie.

Veremos cómo la realidad es que la teoría Mie es la que podríamos considerar como teoría general de la dispersión para procesos que conservan la longitud de onda, mientras que el conocido caso de la dispersión Rayleigh es simplemente una particularización para un caso concreto.

1.3. Soluciones a la ecuación de ondas

En esta sección vamos a resolver la ecuaciones de Maxwell bajo las condiciones de contorno propias de estos procesos. Partiendo de la bien conocida forma de la ecuación de ondas para el campo electromagnético en condiciones de linealidad, isotropía y homogeneidad:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (1.3)$$

Donde $k^2 = w^2 \epsilon \mu$ y donde w es la frecuencia del campo incidente, y tenemos las correspondientes permitividades eléctricas y magnéticas del medio.

Como la densidad de carga es cero, los campos eléctricos y magnéticos tienen una divergencia nula:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (1.5)$$

Además considerando la armonicidad respecto del tiempo de los campos, la ley de Faraday y la de Ampere tienen la forma:

$$\nabla \times \vec{E} = iw\mu\vec{H} \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -iw\epsilon\vec{E} \quad (1.7)$$

La solución a la ecuación inicialmente planteada (la ecuación de onda), no tiene una solución inmediata, por lo que vamos a necesitar definir una nueva función vectorial de la forma:

$$\vec{M} = \nabla \times (\vec{c}\psi) \quad (1.8)$$

Donde de momento y hasta que empecemos a aplicar la física del proceso \vec{c} es un vector constante y ψ es una función escalar. La propia definición de \vec{M} nos garantiza que es de divergencia cero, ya que la divergencia o el rotacional de cualquier vector constante es cero, así que tenemos que:

$$\nabla \vec{M} = 0 \quad (1.9)$$

Aquí aplicaremos el operador que aparecía en nuestra función de onda $\nabla^2 + k^2$ de tal manera que si lo aplicamos sobre \vec{M} llegamos al siguiente resultado:

$$\nabla^2 \vec{M} + k^2 \vec{M} = \nabla \times [\vec{c}(\nabla^2 \psi + k^2 \psi)] \quad (1.10)$$

Una vez más comparándola con la ecuación de que planteábamos originalmente vemos que \vec{M} la verificará si la función escalar cumple que:

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (1.11)$$

Se obtiene por comparación directa de los términos de cada lado de la igualdad. Cuando estas dos últimas condiciones que hemos planteado se satisfacen, podemos identificar perfectamente la función vectorial \vec{M} como equivalente al campo eléctrico o al magnético. Y correspondientemente para generar el otro necesitamos definir otra función de divergencia nula (de manera totalmente análoga para el caso hecho con M):

$$\vec{N} = \frac{\nabla \times \vec{M}}{k} \quad (1.12)$$

O de manera equivalente lo podemos expresar como:

$$\nabla \times \vec{N} = k \vec{M} \quad (1.13)$$

Además debemos recordar que todo esto sólo es cierto si la función escalar que hemos definido cumple: $\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0$. Así que ahora hemos reducido nuestro problema a resolver la ecuación de ondas escalar para ψ que es usualmente conocida como la función generadora y el vector \vec{c} que es el vector guía. Es de gran importancia poner atención en el hecho de que todo este aparato matemático que hemos planteado aquí solo tiene sentido si ambas funciones de campo eléctrico y magnético son de divergencia nula, ya que si esto no fuera así, todas estas condiciones introducidas en las funciones \vec{N} y \vec{M} podrían haber sido incluidas de una forma mucho mas natural a través de condiciones de contorno usuales para los campos.

Para poder resolver esta ecuación escalar vamos a usar coordenadas esféricas, ya que serán las más convenientes para nuestro problema. Recordemos que la situación física que estamos tratando aquí es el de una partícula esférica aislada del resto. A pesar de que la elección del vector guía definido anteriormente es arbitraria, una elección que nos facilitará enormemente la resolución del problema es elegir $\vec{c} = \vec{r}$. En coordenadas esféricas por lo tanto la función de onda escalar es de la forma:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} + k^2 \psi = 0 \quad (1.14)$$

Para resolver esta ecuación vamos a recurrir a la técnica de separación de variables, suponiendo una forma para la función escalar:

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi) \quad (1.15)$$

Introduciéndola en la ecuación obtenemos tres ecuaciones de variables separadas, teniendo en cuenta que las soluciones de cada una de estas ecuaciones deben de ser independientes y que deben

de ser univaluadas. La solución final de la función escalar, después de resolver las ecuaciones bajo las condiciones impuestas, la podemos dividir en su parte par y en su parte impar:

•Parte par:

$$\psi_{emn}(r, \theta, \phi) = \cos m \phi P_n^m(\cos \theta) z_n(kr) \quad (1.16)$$

•Parte impar:

$$\psi_{omn}(r, \theta, \phi) = \sin m \phi P_n^m(\cos \theta) z_n(kr) \quad (1.17)$$

Donde P_n^m son las funciones de Legendre de primera clase de grado n y orden m y z_n representa cualquiera de las cuatro funciones esféricas de Bessel: $j_n, y_n, h_n^{(1)}$ y $h_n^{(2)}$. Cualquier solución de la ecuación escalar puede ser expresada como un desarrollo infinito de estos dos últimos términos.

Las funciones N y M anteriormente definidas también se pueden separar por tanto en su parte par e impar:

$$\begin{aligned} \vec{M}_{emn} &= \nabla \times (\vec{r} \psi_{emn}) \\ \vec{M}_{omn} &= \nabla \times (\vec{r} \psi_{omn}) \\ \vec{N}_{emn} &= \frac{\nabla \times (\vec{r} \psi_{emn})}{k} \\ \vec{N}_{omn} &= \frac{\nabla \times (\vec{r} \psi_{omn})}{k} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Llegados a este punto hemos demostrado que cualquier solución a la ecuación de onda puede ser expresado como un desarrollo en serie infinito de las funciones vectoriales N y M .

1.4. Campos incidentes y dispersados

Para el análisis de ahora en adelante consideraremos que el campo incidente es una onda plana linealmente polarizada con el eje x y que se propaga en la dirección del eje z , en coordenadas esféricas lo podemos escribir como:

$$\vec{E}_i = E_0 e^{ikr \cos \theta} \vec{e}_x \quad (1.19)$$

Donde E_0 es la amplitud del campo eléctrico k es el número de ondas y podemos expresar en coordenadas esféricas el vector \vec{e}_x :

$$\vec{e}_x = \sin \theta \cos \phi \vec{e}_r + \cos \theta \cos \phi \vec{e}_\theta - \sin \theta \vec{e}_\phi \quad (1.20)$$

De esta expresión mediante el rotacional podemos obtener directamente el campo magnético, como hemos demostrado en el apartado anterior estos campos pueden ser expresados en una serie de infinitos términos de armónicos esféricos de la forma:

$$\vec{E}_i = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (B_{emn} \vec{M}_{emn} + B_{omn} \vec{M}_{omn} + A_{emn} \vec{N}_{emn} + A_{omn} \vec{N}_{omn}) \quad (1.21)$$

Junto con las relaciones de ortogonalidad de los armónicos esféricos y y tomando únicamente la parte radial de las funciones de Bessel la expresión anterior queda reducida a:

$$\vec{E}_i = \sum_{n=1}^{\infty} (B_{oln} \vec{M}_{oln}^{(1)} + A_{eln} \vec{N}_{eln}^{(1)}) \quad (1.22)$$

Los coeficientes de expansión, que son característicos de cada haz particular, se derivan del siguiente cálculo:

$$A_{eln} = \int \vec{M}_{eln}^{*(1)} \vec{E}_i d\Omega \quad (1.23)$$

y

$$B_{oln} = \int \vec{N}_{oln}^{*(1)} \vec{E}_i d\Omega \quad (1.24)$$

Podemos llegar a que la forma de los coeficientes de la expansión es:

$$B_{oln} = i^n E_0 \frac{2n+1}{n(n+1)} \quad (1.25)$$

y

$$A_{eln} = -i^{n+1} E_0 \frac{2n+1}{n(n+1)} \quad (1.26)$$

De manera totalmente análoga obtendríamos el resto de coeficientes A y B pares e impares. Por lo tanto sustituyendo en la expresión general tenemos que:

$$\vec{E}_i = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{oln}^{(1)} - i\vec{N}_{eln}^{(1)}) \quad (1.27)$$

Y correspondientemente podemos calcular el campo magnético incidente, obteniéndose:

$$\vec{H}_i = \frac{-k}{w\mu} \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{oln}^{(1)} + i\vec{N}_{eln}^{(1)}) \quad (1.28)$$

De ahora en adelante para simplificar la notación vamos a llamar $E_n = E_0 i^n \frac{2n+1}{n(n+1)}$. Llegados a este punto estamos en condiciones de obtener los campos eléctrico y magnético tanto de dispersión como los que se forman dentro de la partícula a través de las condiciones de contorno entre la esfera y el medio, tienen la forma:

$$(\vec{E}_i + \vec{E}_s - \vec{E}_l) \times \vec{e}_r = (\vec{H}_i + \vec{H}_s - \vec{H}_l) \times \vec{e}_r = 0 \quad (1.29)$$

Donde los indicados con 'i' corresponden a los campos incidentes, los que tienen 's' a los de scattering y los de 'l' a los que se generan en el interior la partícula.

Donde los campos de scattering vienen dados por:

$$\vec{E}_s = \sum_{n=1}^{\infty} E_n (ia_n \vec{N}_{eln}^{(3)} - b_n \vec{M}_{oln}^{(3)}) \quad (1.30)$$

y

$$\vec{H}_s = \sum_{n=1}^{\infty} E_n (ib_n \vec{N}_{oln}^{(3)} + a_n \vec{M}_{eln}^{(3)}) \quad (1.31)$$

donde hay que prestar atención al subíndice de las matrices N y M que nos dice su carácter par o impar y que en este caso de manera análoga al anterior el superíndice (3) se debe a que sólo estamos utilizando la dependencia radial que nos da la función de esférica de Hankel, a la que nos habíamos referido anteriormente como $h_n^{(1)}$. Los coeficientes que ahí vemos representados por a_n y b_n son los llamados coeficientes de Mie para el campo de scattering, que aplicando las mismas condiciones de contorno que en el caso anterior podemos calcular:

$$a_n = \frac{\mu m^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_l j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_l h_n^{(1)}(x) [mx j_n(mx)]'} \quad (1.32)$$

y

$$b_n = \frac{\mu_l j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{\mu_l j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu h_n^{(1)}(x) [mx j_n(mx)]'} \quad (1.33)$$

Donde μ_l y μ son las permeabilidades magnéticas de la esfera y el medio correspondientemente. Además apreciamos la presencia del parámetro de forma 'x' y la variable m que corresponde a $m = \frac{n}{nl}$, cociente de los índices de refracción. En el factor de forma es donde estará contenida toda la información relativa a la longitud de onda incidente y el radio de la esfera.

1.5. Secciones eficaces de dispersión y extinción

En esta sección vamos a calcular los coeficientes de dispersión y extinción que nos dan una relación de la proporción de energía que se emplea en cada tipo de proceso. Estas secciones eficaces usualmente tienen unidades de metros cuadrados y las definimos así:

$$C_{sca} = \frac{W_{sca}}{I_i} \quad (1.34)$$

y

$$C_{ext} = \frac{W_{ext}}{I_i} \quad (1.35)$$

Donde I_i representa la intensidad del campo incidente sobre la superficie de la partícula y las W representan las energías de extinción y dispersión correspondientemente. Para calcular la energía que atraviesa la partícula en cada caso vamos a recurrir al teorema de Poynting y las expresiones para cada uno de los campos que hemos calculado anteriormente, a través del cual llegamos a las siguientes expresiones:

$$W_{sca} = \frac{1}{2} Re \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (E_{sca} \times H_{sca}^*) r^2 \sin\theta d\theta d\phi = \quad (1.36)$$

y

$$W_{ext} = \frac{1}{2} Re \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (E_{inc} \times H_{sca}^*) r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (1.37)$$

De estas expresiones es muy fácil ver que podemos deducir la energía absorbida como $W_{abs} = W_{ext} - W_{sca}$, sustituyendo estas energías calculadas en la expresión general de los coeficientes de tal manera que si sustituimos la forma ya calculada de los campos y resolvemos las integrales llegamos a las expresiones siguientes, que ya están simplificadas previamente para el caso que nos ocupa de una onda incidente plana:

$$C_{sca} = \frac{2\pi}{k_m^2} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) (|a_l|^2 + |b_l|^2) \quad (1.38)$$

y

$$C_{ext} = \frac{2\pi}{k_m^2} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) Re(a_l + b_l) \quad (1.39)$$

Y exactamente igual a como habíamos razonado anteriormente:

$$C_{abs} = C_{ext} - C_{sca} \quad (1.40)$$

1.6. Aproximación electrostática

Como ya hemos comentado anteriormente la dispersión Mie tiene en cuenta la dependencia con todos los posibles valores de 'l' de la interacción con todos los multipolos de las partículas. En cambio en la aproximación dentro de la que se trabaja cuando hablamos de dispersión Rayleigh sólo vamos a considerar momento dipolar, es decir, que veremos a la partícula como un dipolo que al entrar en contacto con la radiación se pondrá a oscilar emitiendo la correspondiente energía y campo electromagnético. En esta sección vamos a calcular desde un punto de vista electrostático la forma que tendría dicho dipolo.

Consideraremos una esfera homogénea, isotrópica y paralelamente iluminada, la forma del campo eléctrico será exactamente igual a la definida anteriormente. Debido a la discontinuidad entre la permitividad del medio y de la esfera, el campo eléctrico incidente se verá alterado. Los campos que aparecerán tanto dentro como fuera de la esfera los definimos como:

$$\vec{E}_s = -\nabla V_s \rightarrow (r < a) \quad (1.41)$$

y

$$\vec{E}_m = -\nabla V_m \rightarrow (r < a) \quad (1.42)$$

Podemos definirlos así ya que estamos dentro de la aproximación electroestática. Por lo tanto en la frontera donde $r = a$ los potenciales deben satisfacer que:

$$\vec{V}_s = \vec{V}_m \quad (1.43)$$

y

$$\epsilon \frac{\partial \vec{V}_s}{\partial r} = \epsilon_m \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial r} \quad (1.44)$$

Además si estamos suponiendo grandes distancias de la fuente, tenemos que:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \vec{V}_m = -E_0 r \cos \theta = E_0 z \quad (1.45)$$

Si resolvemos las condiciones de contorno que son las que nos ofrecen las ecuaciones para obtener la forma de los campos que queremos, llegamos a:

$$\vec{E}_s = \frac{3\epsilon_m}{\epsilon + 2\epsilon_m} E_0 r \cos \theta \quad (1.46)$$

y

$$\vec{E}_m = -E_0 r \cos \theta + a^3 E_0 \frac{(N^2 - 1) \cos \theta}{(N^2 + 2)r^2} \quad (1.47)$$

Donde N es la relación entre los índices de refracción de la esfera y el medio. Es interesante ver que el campo fuera de la esfera \vec{E}_m está compuesto de dos factores: primero el campo incidente aplicado sobre la partícula $-E_0 r \cos \theta$, y el segundo término tiene la forma de un dipolo inducido, por lo que podremos decir que el momento dipolar de dicho dipolo corresponde a la siguiente expresión:

$$\vec{p} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_m a^3 \frac{N^2 - 1}{N^2 + 2} \vec{E}_0 \quad (1.48)$$

Normalmente lo vamos a ver escrito de la forma:

$$\vec{p} = \epsilon_0\epsilon_m \alpha \vec{E}_0 \quad (1.49)$$

Donde claramente podemos ver dónde está el origen de la magnitud llamada polarizabilidad de un material. Aquí la hemos llamado α , y es la relación entre el campo eléctrico aplicado y el momento dipolar que éste induce dentro del material.

1.7. Dispersión Rayleigh

Utilizando la descripción electromagnética clásica, y las mismas condiciones del campo incidente que en apartados anteriores, procedemos ahora a calcular la intensidad de la dispersión Rayleigh, puesto que es la que se produce mayoritariamente en la atmósfera. Evidentemente los componentes mayoritarios de la misma son la mezcla de los diferentes gases que la componen, que como hemos visto por ser moléculas pueden ser recogidas dentro de la aproximación Rayleigh y sólo una pequeña parte estará dentro de la teoría Mie. Este tipo de partículas son las conocidas como aerosoles.

Partiendo de la conocida expresión para los campos emitidos por un dipolo eléctrico oscilante y las expresiones aquí calculadas con anterioridad para el momento dipolar en función de la polarizabilidad, se obtiene un campo de dispersión en la dirección radial a la partícula de la forma:

$$E_r = \left[\frac{\alpha \vec{E}_0 4\pi^2 \text{sen} \phi}{r \lambda^2} \right] \cos 2\pi \nu \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (1.50)$$

El término entre corchetes representa la amplitud de la onda dispersada. Ya sólo nos queda calcular la intensidad de dicha radiación, la cual vamos a obtener en función del ángulo de observación,

que depende del cuadrado de la amplitud de nuestro campo. La magnitud interesante aquí es la intensidad relativa de dispersión respecto a la incidente. Después de todos los cálculos necesarios obtenemos un valor de:

$$\frac{i}{I_0} = \frac{16\pi^4\alpha^2\text{sen}^2\phi}{r^2\lambda^4} \quad (1.51)$$

Pero aún nos falta un último paso ya que la luz solar no está polarizada, por lo que tendremos que sumar las intensidades correspondientes a los dos posibles planos de polarización. Según nuestro convenio tendremos que sumar los de los planos xz y xy , lo que nos lleva a un valor de:

$$\frac{i}{I_0} = \frac{1}{2}i_{xz} + \frac{1}{2}i_{xy} = \frac{8\pi^4\alpha^2(\text{sen}^2\theta_z + \text{sen}^2\theta_y)}{r^2\lambda^4} \quad (1.52)$$

Que reagrupando términos y tomando relaciones trigonométricas tenemos

$$\frac{i}{I_0} = \frac{8\pi^4\alpha^2(1 + \cos^2\theta)}{r^2\lambda^4} \quad (1.53)$$

Ya tenemos descritos perfectamente todos los procesos radiativos necesarios para explicar el funcionamiento de la Física de nuestro ceilómetro. Es posible que resulte un poco árido matemáticamente pero en los capítulos posteriores nos será más sencillo entender el origen de las expresiones que allí aparecen y los motivos de la elección de unos métodos de trabajo o variables concretos frente a otros.

Capítulo 2

LIDAR

La palabra Lidar hace referencia al acrónimo del inglés *light detection and ranging*. Se trata de un sistema de medida activo que consiste en la emisión de un haz láser (cuyas características discutiremos después) hacia la atmósfera, donde sufrirá distintos procesos de absorción y dispersión, de tal manera que mediante la medida de la retrodispersión del láser seamos capaces de extraer información de carácter vertical y temporal de la atmósfera, como pueden ser propiedades del tipo geométrico, óptico o microfísico.

Es una técnica que lleva en funcionamiento más de 40 años. Sus principales ventajas frente a otro tipo de aparatos de medición atmosférica como pueden ser los fotómetros, es la posibilidad de obtener datos tanto durante el día como durante la noche, la resolución vertical de las medidas y el hecho de que no conlleva la perturbación del medio observado.

2.1. Funcionamiento

En primer lugar desarrollaremos un breve resumen sobre el funcionamiento de la óptica interna general de este tipo de dispositivos. En general el esquema interno de los Lidar es el siguiente:

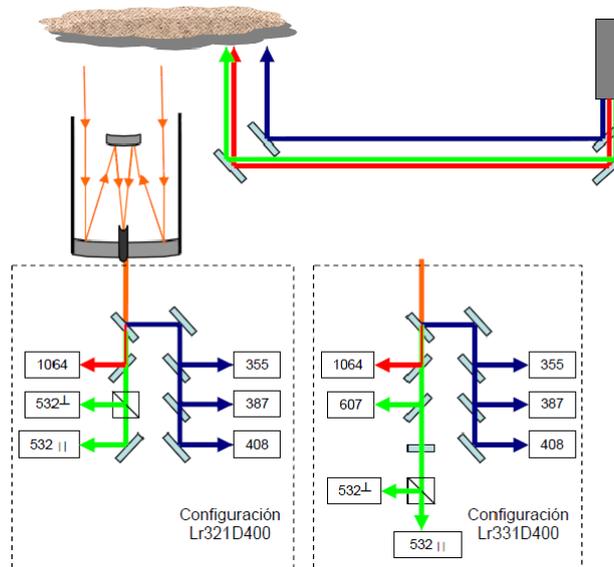


Figura 2.1: Esquema general Lidar, la parte óptica corresponde concretamente a un Lidar Raman

Donde se observa el recorrido general del láser y la señal recorrida. Pero analicemos más detenidamente cada uno de los elementos que podemos encontrar aquí, están descritos en la figura (2.2):

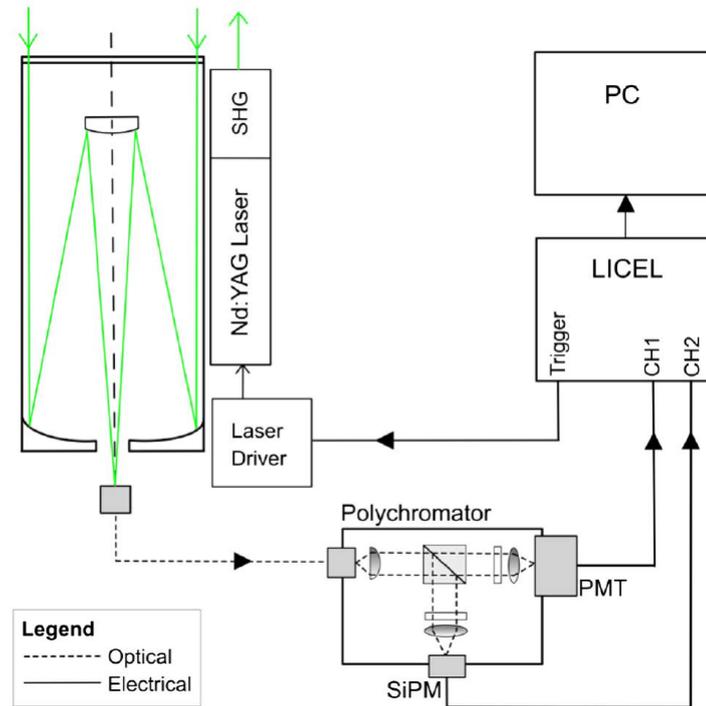


Figura 2.2: Montaje experimental para un sistema Lidar

En la figura (2.2) nos encontramos marcado con trazo discontinuo la señal de carácter óptico, mientras que cuando el trazo es continuo estamos trabajando ya con una señal de carácter eléctrico. Encontraremos un láser pulsado de Nd:YAG. La peculiaridad de este tipo de aparatos es que este haz láser esta compuesto de varias longitudes de onda. Las más comunes son 1064, 532 y 355 nm (las podemos ver en la Figura (2.1)). Por otro lado, valores típicos de anchura del haz son unos 4 mm, cuentan con un rango normal de emisión del pulso de entre 10-100 HZ y una longitud de pulso de entre los 8 y 40 ns.

2.1.1. Telescopio

El telescopio es el elemento más sencillo que encontramos dentro de toda la óptica de nuestro dispositivo Lidar. Es el encargado de recoger la señal después de dispersar contra la atmósfera. Consiste en un dispositivo tipo telescopio (normalmente newtoniano) que colima el haz hacia su focal donde pasará al resto de elementos de la óptica.

La geometría del conjunto láser-telescopio es como observamos en la figura (2.3):

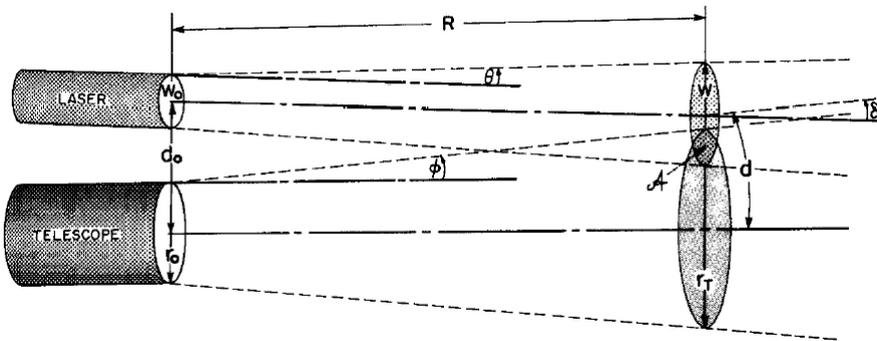


Figura 2.3: Funcionamiento del Telescopio dentro del Lidar

En esta configuración es posible que entre el área (campo de vista) del telescopio y el haz láser se produzcan tres posibles situaciones de solapamiento (ver figura 2.4), las cuales serán tenidas en cuenta en la ecuación Lidar.

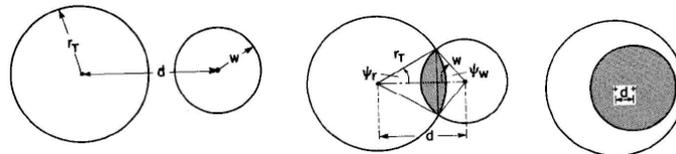


Figura 2.4: Posibles solapamientos del haz láser y el telescopio

2.1.2. Policromador

A continuación la señal todavía óptica llega a un policromador. Un policromador es un dispositivo utilizado para la dispersión de la luz basado en un sistema de filtros dicróicos, situados en distintas direcciones, con el objetivo de aislar las partes del espectro deseadas, en nuestro caso la longitud de onda que emita el dispositivo Lidar (es utilizado tanto en Lidar elásticos como en Raman). A diferencia de un monocromador, nos encontramos con varios haces correspondientes a distintas longitudes de onda simultáneamente, de tal manera que colocaremos un detector a la salida de cada rendija de cada longitud de onda.

La siguiente figura nos describe de manera esquemática todo el proceso que sufre la radiación incidente dentro del sistema:

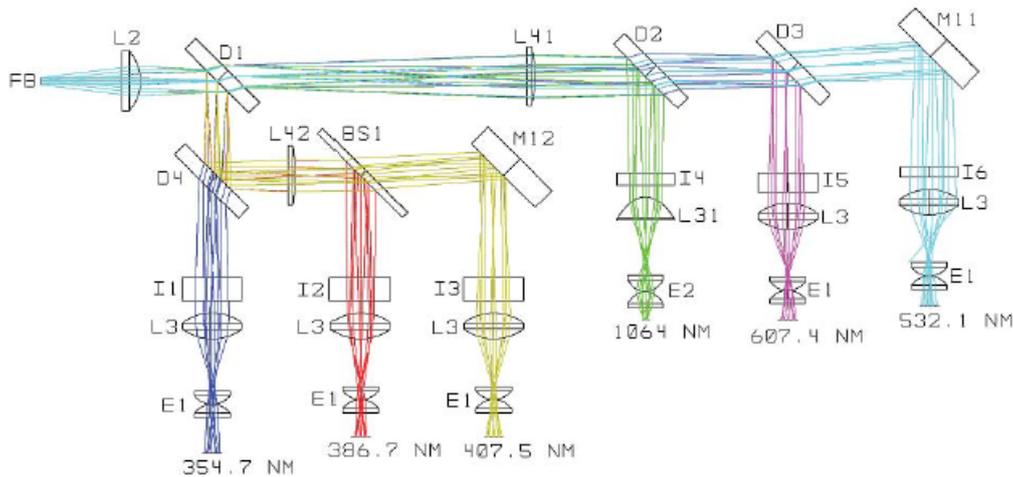


Figura 2.5: Sistema de funcionamiento de un Policromador

En la figura 2.5 encontramos los siguientes elementos:

- Filtros dicróicos (D1-D4).
- Lentes (L2-L4).
- Dispersor del haz (BS1).
- Espejos (M11, M12).
- Filtros interferenciales (I1-I6).
- Colimadores del detector (E1, E2).

En primer lugar D1 es un filtro de onda larga que separa la radiación del rango ultravioleta del resto. Por otro lado el resto de filtros (D2, D3 y D4) separan las correspondientes longitudes de onda. Por último los espejos son utilizados para redirigir el haz hacia los detectores correspondientes. No es posible encontrar un filtro dicróico aceptable para separar las dos últimas longitudes de onda, por eso en su lugar se utiliza un dispersor de haz (BS1).

Las lentes intermedias L2 y L4 son utilizadas para colimar el haz y corregir las posibles divergencias.

Los distintos colimadores que podemos encontrar (E1, E2), se deben a que el tamaño efectivo del detector dependerá del tipo que sea (serán descritos a continuación).

2.1.3. Detectores PMT y APD

El mayor problema que tienen los Lidar atmosféricos es que la potencia con la que la señal óptica es recibida desde grandes distancias es muy pequeña. Además tenemos que añadir el gran rango de actuación que tienen estos instrumentos, desde 200 a 15000 metros, es decir, que para cortas distancias tendremos un exceso de señal que también debe ser tratado. Cumpliendo estas características la lista de posibles detectores válidos para utilizar después de nuestro policromador es bastante reducida. Los más utilizados son los tubos fotomultiplicadores (PMT) y los fotodiodos de avalancha (APD). Sin embargo están siendo desarrollados con gran éxito los fotomultiplicadores de silicio (SiPM).

Los fotomultiplicadores deben de estar seleccionados de tal manera que tengan un funcionamiento óptico espectral en las longitudes de onda más bajas del láser emisor, en este caso por ejemplo podría tener un rango de 355-607nm.

Por otro lado el APD está diseñado para recoger la señal para las longitudes de onda más largas, es decir, de 900 nm en adelante.

Con estos dispositivos ya podemos convertir nuestra señal óptica en eléctrica.

PMT

PMT es el acrónimo de tubo fotomultiplicador. Los PMT son tubos de vacío extremadamente sensibles para luz dentro del rango ultravioleta, visible, e infrarrojo cercano (por eso son seleccionados para medir esas longitudes de onda Lidar). Son capaces de producir amplificaciones de hasta 100 millones de veces. Esto los hace perfectos para la medida de radiación muy débil como puede ser el backscatter proveniente de los rangos mas altos del Lidar.

Las principales ventajas de este tipo de dispositivos son la alta ganancia, el bajo ruido, la alta velocidad de respuesta y el gran área de recolección.

El funcionamiento general está descrito en la figura (2.6):

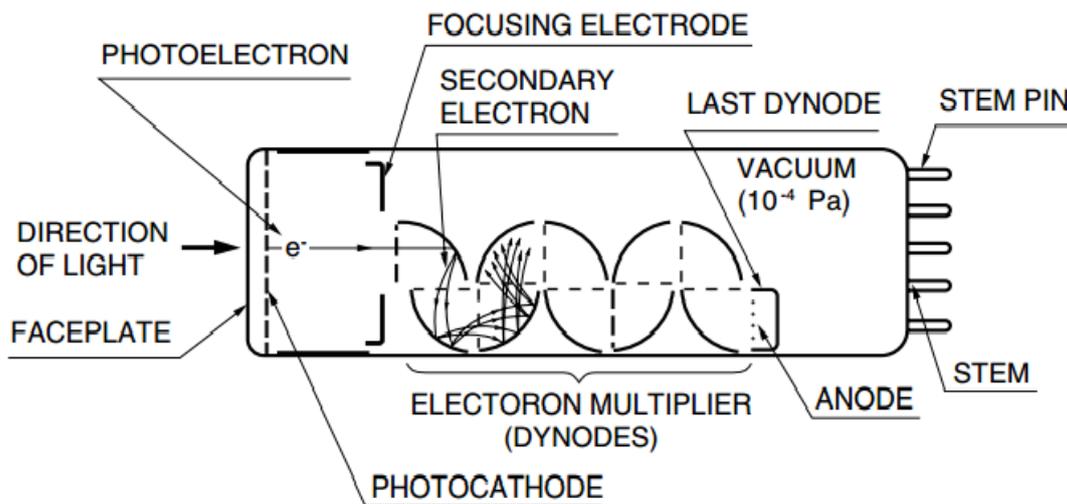


Figura 2.6: Sistema de funcionamiento de un tubo fotomultiplicador

Los fotones llegan al primer fotocátodo de tal manera que por efecto fotoeléctrico se consigue arrancar un electrón. La gran sensibilidad de este tipo de dispositivos reside en elegir estos materiales con una función trabajo muy baja. Después del primer fotocátodo nos movemos siempre en vacío dentro del tubo. Estos electrones arrancados por efecto fotoeléctrico son dirigidos hacia el *electromultiplicador*. Esta parte consiste en un conjunto de electrodos llamados *dínodos*, de tal manera que al llegar un electrón a su superficie se produce una multiplicación del mismo por *emisión secundaria*. La geometría en la que están dispuestos los consecutivos dínodos produce un efecto *avalancha* que multiplica la cantidad de electrones. En último lugar el haz de electrones llega al ánodo produciéndose una corriente eléctrica proporcional al fotón incidente pero muy amplificada.

Materiales típicos de estos fotocátodos son GaAs, GaAsP o InP.

APD

Las siglas APD corresponden a fotodiodo de avalancha (*avalanche photodiode*). A diferencia del fotodetector anterior, este se basa en el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en corriente eléctrica.

Los fotones incidentes generan pares electrón-hueco que son acelerados mediante un campo eléctrico externo (Región A de la figura 2.7). Estos llegan a la zona M donde el campo eléctrico es aún mayor y a través de la ionización por impacto muchos más electrones son introducidos en la banda de conducción correspondiente del ánodo, produciéndose la amplificación de la corriente deseada.

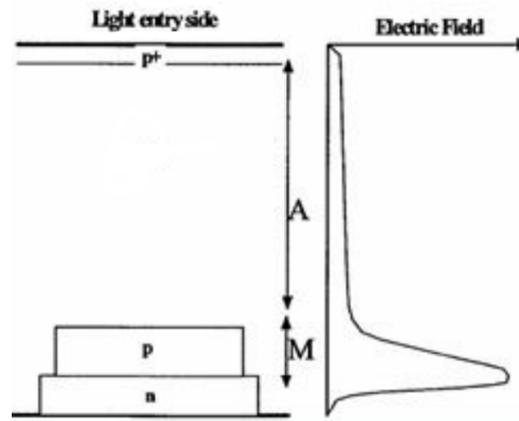


Figura 2.7: Sistema de funcionamiento de un APD

2.2. Ecuación Lidar

Con el objetivo de entender la influencia de las propias partículas en los procesos de intercambio de energía como es el scattering, se han descrito múltiples modelos basados en propiedades de las partículas atmosféricas (aerosoles) como pueden ser densidad, tamaño, distribución y composición. Para ello necesitamos la ecuación Lidar:

$$P(Z) = EC_1AZ^{-2}[\beta_1(Z) + \beta_2(Z)]T_1^2(Z)T_2^2(Z) \quad (2.1)$$

De manera esquemática podemos ver en la figura 2.8 cómo funciona la ecuación, mediante un resumen de todos los procesos que son tenidos en cuenta en ella:

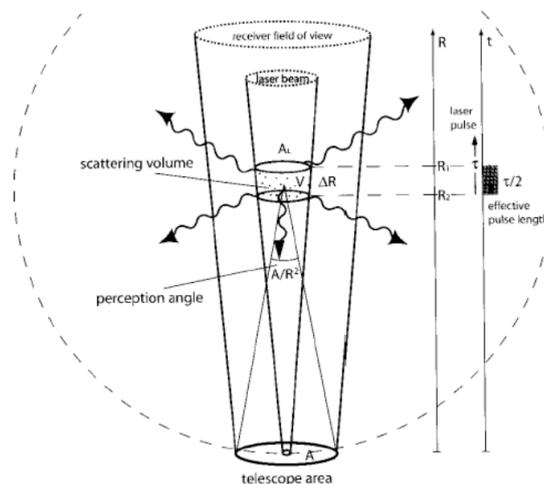


Figura 2.8: Esquema de los procesos recogidos en la ecuación Lidar

Lo que veremos aquí es la ecuación aproximada a *single scattering*, es decir, supondremos que los fotones de nuestro haz láser solo dispersan una única vez antes de volver al detector. Sólo nos servirá para Lidar del tipo *monostatic backscatter*, es decir, aquellos aparatos que se encuentran en el mismo sitio cuando emitieron la señal y cuando esta fue recibida.

Otra de las asunciones que tomamos aquí es la de scattering independiente, es decir, las partículas están adecuadamente separadas, de tal manera que no tienen ninguna relación de fase entre ellas. Esto nos permite expresar la intensidad total de dispersión como la suma de las contribuciones

individuales de cada partícula.

A pesar de que nos estamos moviendo en una aproximación de *single scattering*, a través del cálculo numérico se ha demostrado que los procesos de *multiple scattering* pueden ser perfectamente despreciados sin que lleve a una gran fuente de error en la mayoría de mediciones terrestres; sin embargo el *multiple scattering* sí que debe ser tenido en cuenta en los casos de observaciones lidar desde satélite.

En esta ecuación se plantean dos incógnitas, los coeficientes de extinción y los coeficientes de retrodispersión o backscatter. Vamos a realizar un análisis de cada uno de los elementos que encontramos en ella:

- $P(Z)$: señal de vuelta proporcional a la energía recibida después de los distintos procesos de retrodispersión.
- E : energía de salida del pulso láser.
- AZ^{-2} : A es el área del telescopio utilizado para recoger la señal, el término como conjunto expresa la probabilidad de que los fotones dispersados alcancen de nuevo el aparato.
- C_l : constante de calibración del aparato que no depende de la altura. Aquí están incluidas tanto las pérdidas por emisión y recepción de la óptica interna del instrumento, como del propio receptor. También se tiene en consideración la longitud del intervalo de muestreo o el número de fotones emitidos por pulso. Una expresión general que podemos dar de ella es:

$$C_l = c\tau_d\xi(\lambda)/2 \quad (2.2)$$

Donde c es la velocidad de la luz, τ_d es la resolución temporal del sistema de adquisición empleado y $\xi(\lambda)$ la eficiencia de recepción a la longitud de onda λ .

A continuación vienen una serie de variables que dan cuenta de multitud de procesos ajenos al aparato, como pueden ser las condiciones atmosféricas, la eficiencia del backscattering de las partículas del aire y por supuesto, la probabilidad de que los fotones emitidos alcancen la altura z y vuelvan de nuevo al receptor sin ser absorbidos en direcciones arbitrarias de por medio:

- $\beta_1(Z)$: sección eficaz de retrodispersión para aerosoles (partículas).
- $\beta_2(Z)$: sección eficaz de retrodispersión para moléculas.
- T_1^2 : transmitancia del aerosol¹(partículas), podemos calcularla como: $\exp[-\int_0^Z \sigma_1 dz]$.
- T_2^2 : transmitancia molecular, podemos calcularla como: $\exp[-\int_0^Z \sigma_2 dz]$.

Donde σ_1 y σ_2 son respectivamente las secciones eficaces de extinción del aerosol y las moléculas descritas en el capítulo anterior.

2.2.1. Método de Klett-Fernald-Sasano

El método de Klett-Fernald-Sasano resuelve parte del problema de la inversión² de la ecuación Lidar, puesto que esta ecuación plantea un problema a la hora de realizar inversión al encontrarnos con dos incógnitas dentro de la misma ecuación: las secciones eficaces de retrodispersión y de extinción. En total serían cuatro incógnitas si consideramos la separación para aerosoles y moléculas (atmósfera bicomponente). El objetivo final de este método es reducir el número de incógnitas a una exclusivamente, para lo cual se asumirá la relación entre retrodispersión y extinción, que es lo que se conoce como razón lidar o *Lidar ratio*.

¹Aerosol: definimos aerosol como toda partícula en estado sólido o líquido que permanece en la atmósfera el tiempo suficiente para ser medida. Podemos encontrar aerosoles de orígenes muy diversos como antropogénicos, desérticos, marítimos o polares.

²Inversión: podemos definir inversión como el conjunto de procedimientos que mediante el conocimiento del resultado final pretenden ofrecer un modelo que describa adecuadamente la realidad física detrás del resultado obtenido en primer lugar.

Lidar Ratio

El siguiente paso dentro de nuestra teoría es la introducción de la **Razón Lidar** (*Lidar ratio*). La razón Lidar recoge la relación lineal de los coeficientes de retrodispersión y extinción totales (molecular más partículas). La podemos definir como:

$$S(z) = \frac{\sigma(z)}{\beta(z)} \quad (2.3)$$

Esta magnitud relaciona dos propiedades ópticas que dependen de la longitud de onda de la radiación incidente, y además es sensible a la distribución de tamaños de las partículas así como al índice de refracción, por lo que su comportamiento no es trivial y está fuertemente ligado al tipo de aerosol.

El valor de esta razón Lidar para algunos tipos claves de aerosol es perfectamente conocido, como pueden ser el urbano, marino, polvo desértico y procedente de incendios. En la atmósfera real sin embargo, el aerosol es una mezcla de diferentes componentes, cada uno de ellos con una distribución de tamaños distinta y un índice de refracción distinto, lo que proporciona una gran variedad de razones Lidar posibles. A todo esto debemos añadir que las propiedades del aerosol atmosférico pueden cambiar debido a variaciones en la humedad relativa. También se pueden medir cambios en las propiedades químicas, físicas y ópticas del aerosol con la altura. Podemos ver aquí una pequeña muestra de la gran complejidad que implican este tipo de procesos.

Tendremos una función de razón Lidar para moléculas y otra para aerosoles, pero gracias a la teoría Rayleigh descrita en el apartado anterior el valor de la razón Lidar para moléculas tiene el siguiente valor constante:

$$S_{mol}(z) = \frac{8\pi}{3} [sr] \quad (2.4)$$

Procedimiento Matemático

El cálculo matemático de este método se apoya en dos asunciones:

- Sólo se dispone de una única señal retrodispersada elásticamente, la cual corresponde exactamente al caso que se nos presenta en el ceilómetro, que es objetivo de estudio en este trabajo.
- A la hora de realizar cada inversión de la señal Lidar, esta se calibrará en una altura de referencia, lo que nos evitará la necesidad de realizar una calibración absoluta del aparato. Esto nos permite eliminar otra incógnita de nuestra ecuación como es C_I .

Como hemos visto la razón Lidar nos permite expresar el coeficiente de extinción en función del de retrodispersión eliminando así una de los dos incógnitas:

$$\sigma(z) = S_{aerosol}(z)\beta_{aerosol} + S_{mol}(z)\beta_{mol} \quad (2.5)$$

La cual podemos expresar en función del coeficiente de retrodispersión total y el molecular, puesto que uno es el más fácilmente medible mediante la técnica Lidar y el otro como hemos visto es perfectamente conocido:

$$\sigma(z) = S_{aerosol}(z)\beta_{total} + (S_{mol}(z) - S_{aerosol}(z))\beta_{mol} \quad (2.6)$$

Ahora estamos en condiciones de empezar a trabajar con la 'Range corrected signal' que no es más que la señal medida en nuestro sistema Lidar multiplicada por el valor del rango al cuadrado donde fue dispersada, donde además introducimos ya los valores de los coeficientes con la razón Lidar. Gracias a la expresión proporcionada por la ecuación Lidar llegamos a la siguiente expresión:

$$X(z) = P(z)z^2 = P_0 C_l \beta(z)_{total} \exp\left(-2 \int_0^z S_{aerosol}(z') \beta(z')_{total} + (S_{mol}(z') - S_{aerosol}(z')) \beta(z')_{mol} dz'\right) \quad (2.7)$$

El proceso matemático a partir de ahora (que no se ha creído conveniente incluir aquí), consiste en tomar logaritmos en cada uno de los términos y analizar la derivadas respecto al rango, de esta manera se llega a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d\beta(z)_{total}}{dz} - \beta(z)_{total} \frac{d}{dz} \ln[X(z)] = 2S(z)_{aerosol} \beta(z)_{total} \quad (2.8)$$

La cual es una ecuación diferencial de tipo Bernoulli, cuya solución es conocida:

$$\beta(z)_{total} = \frac{\beta(z_{ref})_{total} X(z)}{X(z) - 2\beta(z_{ref})_{total} \int_{z_{ref}}^z S(z)_{aerosol} X(z) dz} \quad (2.9)$$

Por lo que el problema de la inversión queda totalmente resuelto sin mas que conocer los coeficientes de retrodispersión a la altura de referencia anteriormente mencionada y las razones Lidar correspondientes. Es así como este método nos permite utilizar la ecuación Lidar de una manera útil con los datos aportados por un aparato convencional mono-canal.

2.2.2. Método de trabajo. Aproximaciones

En este apartado comentaremos el método de cálculo de las magnitudes que aparecen en la ecuación Lidar, algunas definiciones alternativas de las mismas a partir de procedimientos experimentales y algunas aproximaciones que facilitan el trabajo matemático bajo condiciones muy concretas.

Análisis numérico

Con el objetivo de realizar a posteriori un análisis numérico, el método utilizado consiste en dividir la atmósfera en diferentes capas independientes las cuales serán de un espesor diferencial en comparación con el rango máximo de altura en el que nos estamos moviendo, dentro de las cuales la distribución y composición del aerosol se pueden considerar constantes con la altura y que por lo tanto la razón Lidar también lo será. Esto implica que dentro de estas capas 'imaginarias' que hemos creado los cambios en el scattering se deben únicamente a cambios en la densidad del aerosol. Puede parecer un modelo sencillo pero no es excesivamente restrictivo y la posterior integración de todas las capas en el cálculo numérico ofrece resultados más que aceptables.

Por otro lado el análisis numérico lleva también a considerables simplificaciones en cuanto a las condiciones atmosféricas de la medición:

- En atmósferas de alta turbiedad los aerosoles dominan el backscattering por lo que podemos ignorar los términos moleculares, normalmente en zonas de baja troposfera.
- En atmósferas limpias, tanto el coeficiente de extinción del aerosol como el la sección eficaz del mismo dependen casi en exclusiva de la razón Lidar.
- Para los casos intermedios entre estos dos el criterio dependerá fuertemente de los valores específicos de cada coeficiente y será de gran importancia la correcta calibración del aparato Lidar.

La definición de cada uno de estos tipos de atmósfera depende en gran medida de los diferentes sistemas Lidar, la longitud de onda y el intervalo de muestreo. La gran cantidad de posibles modelos para la descripción del aerosol hacen que gran parte de la precisión de los resultados de nuestra

ecuación reside en la exactitud con la que estos se identifican con los verdaderos aerosoles encontrados en la atmósfera. Además debido a la gran variedad de partículas encontradas en la troposfera, pocas medidas para definir los procesos radiativos de los aerosoles han sido realizadas, siendo las medidas de las propiedades ópticas, por encima de las físicas, las más concluyentes. La experiencia ha determinado que los métodos de medida remota son los más útiles, quedando patente la gran importancia del Lidar en la ciencia atmosférica.

Coefficientes de retrodispersión β_x

Analicemos los coeficientes de retrodispersión (β_x) para cada partícula, que de manera experimental definimos como:

$$\beta(\lambda, \lambda_L, z) = \sum_i \left[\frac{d\sigma_i(\lambda_L)}{d\Omega} n_i(z) p_i(\lambda) \right] \quad (2.10)$$

Donde λ_L corresponde a la longitud de onda del Lidar y λ es cualquier longitud de onda. Si estamos tratando con Lidar elásticos siempre se va a cumplir que $\lambda = \lambda_L$. Esta diferencia solo será apreciables en los Lidar Raman.

Tenemos que $\frac{d\sigma_i(\lambda_L)}{d\Omega}$ es la sección diferencial de scattering para una sola partícula, n_i es la densidad de scattering y $p_i(\lambda)$ es la probabilidad de que los fotones dispersados tengan longitud de onda λ , mientras que para los Lidar elásticos $p_i(\lambda) = 1$, en los Lidar Raman dependiendo del tipo de proceso la longitud de onda final puede tener distintos valores por lo que $p_i(\lambda) \leq 1$.

Es decir, que este coeficiente nos da la probabilidad por unidad de distancia de que un fotón sufra un proceso de scattering con una longitud de onda λ en un ángulo sólido $\theta = \pi$.

Coefficientes de extinción σ_x

Como vemos en las expresiones descritas arriba los coeficientes de extinción σ_x^3 , cobran gran importancia en el cálculo de los coeficientes de transmitancia de la ecuación Lidar. Podemos calcularla directamente de la señal que nos devuelve el aparato de la siguiente manera: no tenemos más que obtener la pendiente del logaritmo de la señal Lidar (en función del rango) frente al ángulo cenital desde el que se ha tomado, es decir:

$$\log[V(z, \theta) \sec^2(\theta)/E] \leftrightarrow -2 \sec(\theta) \quad (2.11)$$

Pese a la simplicidad del cálculo bien es cierto que es de utilidad limitada, puesto que solo es válida estrictamente cuando nos encontramos ante scattering horizontalmente homogéneo. En la práctica la inhomogeneidad en el backscatter es fuente común de errores.

El cálculo de la constante de calibración del Lidar que aquí hemos llamado C_L , está muy sujeto al uso concreto que se la vaya a dar al aparato: podemos encontrar procedimientos basados en el funcionamiento interno de la óptica del emisor y receptor de forma general, o calibraciones más específicas centradas en la medición de componentes concretos de la atmósfera como pueden ser la cantidad de vapor de agua, aerosol, cirros... En ese caso el procedimiento se basa en la comparación de datos experimentales tomados en atmósferas bien definidas.

³no confundir con la sección eficaz de dispersión que también hemos nombrado como σ_i .

2.3. Tipos de Lidar

●Lidar elástico (*Backscatter lidar*):

Es el más sencillo a nivel físico, pues se basa únicamente en las dispersiones Rayleigh para moléculas y la Mie para pequeñas partículas. No se aprecia ningún tipo de desplazamiento en la frecuencia de la luz dispersada ya que solo se tienen en cuenta procesos de tipo elástico.

Están centrados en la medición de dispersión elástica de las moléculas del aire, aerosoles y nubes. Se utilizan sobre todo en la medición de densidades y temperaturas en la estratosfera y en la mesosfera, así como la geometría y el espesor del aerosol.

●Lidar Raman (*Raman lidar*):

Los sistemas Lidar Raman, además de poder medir la retrodispersión elástica, son capaces de detectar diferentes longitudes de onda. Estas señales son debidas a que las moléculas que sufren los procesos de scattering absorben parte de la energía del fotón incidente, o le añaden cierta cantidad de energía, produciéndose scattering inelástico. Este tipo de procesos ponen en juego otro tipo de estados de la partícula como pueden ser los rotacionales o vibracionales. Este cambio de energía produce un desplazamiento en la frecuencia respecto a la radiación incidente, el gran atractivo de este tipo de procesos es que ese desplazamiento de las frecuencias es característico de cada molécula.

Las secciones eficaces de scattering de los procesos Raman, son varios ordenes de magnitud inferiores a los obtenidos en procesos elásticos. Por lo tanto, los Lidar Raman trabajan con una intensidad del pulso laser mucho mayor, telescopios más grandes y detectores más eficientes que los utilizados por ejemplo en los lidar elásticos.

Como la población de energía esta sujeta a una distribución de Boltzmann, la distribución de intensidades dentro de las distintas bandas de Raman contiene información sobre la temperatura contenida en el volumen de dispersión, lo que hace posible la elaboración de perfiles de temperatura atmosféricos.

El cambio en los estados variacionales de las moléculas nos lleva a incrementos en la longitud de onda considerables, que como ya se ha comentado anteriormente son únicos de cada molécula, lo que nos permite medir las distintas componentes de las capas atmosféricas. Sin embargo, en la práctica, la pequeñísima sección eficaz de este tipo de dispersiones nos limita su aplicación a gases, por lo que normalmente son utilizados en las medidas de vapor de agua atmosférico.

●Lidar de alta resolución espectral (*High spectral resolution lidar (HSRL)*):

Los HSRL son utilizados para el cálculo de los coeficientes de extinción y backscatter de las partículas y moléculas de la atmósfera. Mientras que se fundamenta teóricamente en conceptos muy similares a los de los lidar Raman, la principal ventaja que ofrecen es que utilizan métodos de cálculo distintos para cada uno de los dos parámetros, mientras que en los sistemas vistos hasta ahora se hacía de manera conjunta. Esto produce una significativa reducción de errores debido a asunciones incorrectas hechas al considerar ambas juntas.

Los canales de los HSRL separan la luz dispersada elásticamente en la proveniente de partículas y moléculas. El método empleado se basa en que el desplazamiento Doppler que se produce en las moléculas es considerablemente mayor que para el dispersado por las partículas, debido a que la velocidad de las moléculas en la atmósfera es mucho mayor que la de las partículas.

●Lidar Doppler:

El principio general sobre el que se basan este tipo de sistemas Lidar, es en obtener la velocidad radial del viento a partir de la señal devuelta por partículas en suspensión de la atmósfera que actuarán como trazadores.

Las aplicaciones de este tipo de sistemas engloban desde la meteorología y la ciencia ambiental hasta en aeropuertos.

Mediante sistemas coherentes e incoherentes se busca medir el desplazamiento Doppler del haz:

$$f_d = -\frac{2v_f}{\lambda} \quad (2.12)$$

Donde v_f es la velocidad de las partículas dispersoras (típicamente aerosol), λ es la longitud de onda y f_d el desplazamiento Doppler correspondiente.

La detección coherente implica que la mezcla de señal láser recibida de la atmósfera con la del propio emisor estén a la misma frecuencia (homodina). Por otro lado es posible que la señal recogida esté desplazada cierto rango de tal manera que la final se encuentre en un punto intermedia (heterodina). Esta última nos facilita información sobre el sentido de la velocidad radial.

Este tipo de sistema tienen desventajas frente a otros que trabajan a frecuencias por debajo de las ópticas, como los radares de medida de viento de microondas, puesto que no es posible medir la variación de fase entre pulsos recibidos, sino que es necesario determinar la información en cada pulso individual del láser. Se debe a que la coherencia temporal, tiempo que tardan las partículas de la atmósfera en reorganizarse a partir de un estado de fase definida cuando fueron excitadas por la onda incidente, es muy baja.

• Lidar de absorción diferencial (*Differential absorption Lidar*):

Son sistemas basados en la comparación de dos longitudes de onda muy próximas, de tal manera que una es absorbida por el aerosol (o especie química a detectar) y la otra no. La principal ventaja que ofrecen este tipo de instrumentos frente a los Raman (están basados en principios muy similares) por ejemplo, es la gran sensibilidad que presentan, normalmente nos encontramos con 10^4 o 10^5 veces mayor que para el caso Raman, y sobre todo que el procedimiento experimental tiende a cancelar errores instrumentales.

• Lidar aerotransportado:

El movimiento que realiza el láser combinado con la trayectoria del avión, recoge un barrido del terreno. La resolución tanto espacial como temporal del Lidar permite elaborar mapas 3D de la zona geográfica recorrida.

Estos sistemas tienen tres componentes principales, el sistema láser Lidar, un sistema INS, el cual calcula la orientación del avión para registrar las orientaciones de la aeronave durante el proceso de medida y corregir los datos, que deberán estar siempre referidos a un plano horizontal constante. Además deben contar con un sistema GPS que permita conocer la orientación espacial del sensor en cada momento de la medición.

Capítulo 3

Ceilómetro

Podemos definir al ceilómetro como un Lidar elástico de una única longitud de onda, que se encontrará cerca del infrarrojo cercano entre los 900 y 1100 nm. Esto tiene el objetivo de evitar la fuerte dispersión Rayleigh dentro de las medidas. Nos encontramos con una longitud del pulso láser que no supera los pocos kilohercios y una energía de pulso suficientemente baja para que sea segura al ojo humano a la hora de operar con el aparato.

Los rangos de actuación de este tipo de aparatos van desde una resolución temporal de unos pocos segundos hasta algunos minutos, y una resolución en rango de 10-15 metros con un máximo de 15 kilómetros. La gran ventaja de la medición a través de este sistema es que los ceilómetros operan de manera totalmente automática, continua y sin apenas necesidad de mantenimiento.

3.1. ¿Por qué ceilómetros y no LIDAR?

Las partículas de aerosol en la atmósfera presentan gran influencia en los procesos radiativos atmosféricos mediante (como hemos visto en el capítulo anterior) sus coeficientes de extinción e indirectamente a través de la modificación en las propiedades de las nubes. El interés en el conocimiento de este tipo de partículas y su comportamiento no sólo es de carácter científico, puesto que por ejemplo los aerosoles influyen también en el ciclo hidrológico o la calidad del aire. Encontramos gran interés económico en situaciones como las erupciones volcánicas que emiten masivas cantidades de aerosol a la atmósfera con la correspondiente clausura del espacio aéreo. Otro ejemplo muy representativo son los episodios extremos de emisión de aerosol antropogénico en grandes ciudades como Pekín, México DF, etc.

Como consecuencia de la mejora de las técnicas de medida y de los modelos de transporte, esta técnica ha adquirido un gran importancia hoy en día. Mientras que la investigación científica es totalmente imprescindible para poder comprender los procesos de interacción de la radiación con las partículas(aerosoles), la medida de las mismas a través de infraestructuras que permitan la monitorización del aerosol con gran rango espacial y temporal, además de en tiempo real, son totalmente necesarias.

Es aquí donde los ceilómetros empiezan a tomar ventaja a los aparatos Lidar, pese a la superior capacidad técnica de los LIDAR, mejor precisión y mayor rango de observación. Las desventajas como la complejidad de los sistemas, su elevado coste o que normalmente sólo son utilizados por equipos científicos durante campañas dedicadas, hacen que los Lidar no sean la mejor opción para el seguimiento continuo del aerosol.

Originalmente los ceilómetros fueron diseñados únicamente para determinar la altura de la base de las nubes (necesaria para los aeropuertos, donde les denominan 'pinchanubes'), pero gracias a los avances tecnológicos en hardware y a través de muchos estudios, se ha conseguido extraer también información del aerosol. El gran número de estos aparatos cubre perfectamente las carencias que tenían las escasas y esparcidas estaciones Lidar que había hasta el momento, permitiendo ahora sí hacer un seguimiento de las concentraciones de aerosol de una manera continuada, barata, de fácil mantenimiento y con una densidad de información aceptable para un posterior tratamiento de datos,

inversión, asimilación en tiempo real para validar modelos, etc.

Es interesante realizar una comparativa entre el número de celiómetros y de Lidars que podemos encontrar en Europa:

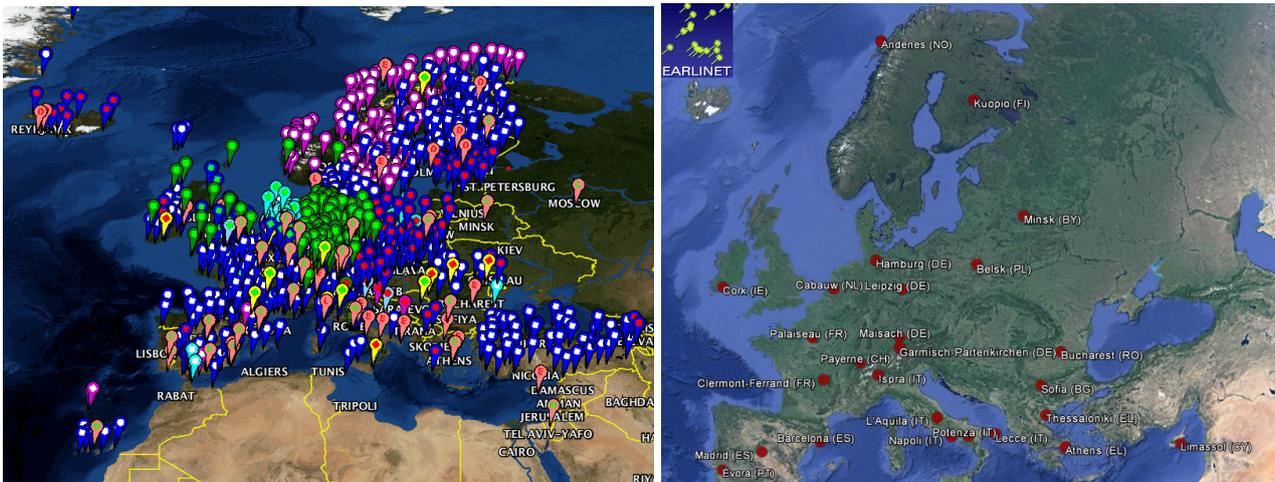


Figura 3.1: Comparación entre la cantidad de estaciones Lidar y ceilómetros en Europa

La figura de arriba representa por un lado, en imagen de la izquierda, la cantidad de ceilómetros dentro de la región europea, imagen obtenida de la página web del servicio meteorológico alemán (DWD), y por otro lado la imagen de la derecha muestra el número de estaciones Lidar pertenecientes a la red más importante de estos aparatos en Europa, la red EARLINET (European Aerosol Lidar Network).

A la vista de la dramática diferencia en el número de estaciones, queda palpable la emergente importancia que los ceilómetros están empezando a adquirir dentro de la comunidad científica. Además de ofrecer una idea de cómo a partir del uso de estos instrumentos, es posible un seguimiento de las concentraciones de aerosol a través de grandes regiones gracias a la gran densidad espacial de las medidas.

3.2. Rango de medida.

Conocer la validez física de los datos obtenidos en este tipo de aparatos es totalmente determinante a la hora de una posterior interpretación correcta de los datos. El rango de medida de los ceilómetros está especialmente diseñado para cubrir los siguientes objetivos:

- La medida de las capas más bajas de la troposfera, ya que son las que presentan mayor interés para el estudio de aerosol. Esto es debido a que la mayor concentración de aerosol está localizada en esta zona, en general por debajo de los 5km de altura, y preferentemente dentro de lo que se denomina capa límite atmosférica, que suele estar por debajo de 2km. Además con el objetivo de que la inversión sea realizada de una manera correcta, la medida debe comenzar lo más bajo posible.
- Por otro lado, una correcta medida de la troposfera libre ha de ser realizada para poder realizar la calibración Rayleigh, necesaria para obtener el perfil de retrodispersión.

Por ello debe alcanzarse un compromiso que evite que la señal de la troposfera libre sea muy ruidosa, pero que la señal no sature en los niveles más bajos.

3.2.1. Límite inferior

El límite inferior de medida de estos aparatos está demostrado ser de crucial importancia para su posterior aplicación, influyendo también en las aproximaciones tomadas anteriormente y por lo tanto en la precisión del Lidar ratio definido en el capítulo anterior.

Los valores típicos para los ceilómetros más utilizados en la actualidad son de entre 200 y 1000 metros, por debajo de los cuales no se puede asegurar una precisión rigurosa de la medida. Existe la necesidad de ampliar este rango hacia alturas lo más cercanas que se pueda al suelo. Para lograrlo se introducen las llamadas funciones de corrección por solapamiento (*overlap function*).

Estas funciones de solapamiento, o bien vienen dadas por el propio fabricante del aparato o bien deben de ser determinadas por el usuario. Por ejemplo, la ofrecida por la empresa Jenoptik (a la cual pertenece el ceilómetro sobre el que está referido este trabajo) ofrece su propia función de solapamiento que permite ampliar el rango hasta los 150 metros. El gran problema aquí es que este tipo de funciones permanecen desconocidas para el usuario, por lo que suele ser recomendable internar determinarlas experimentalmente.

Para calcular estas funciones que de tanta utilidad resultan, nos encontramos con dos métodos: mediante medida horizontal o por comparación con otros Lidar o ceilómetros de igual longitud de onda y características de solapamiento similares.

La primera de las opciones tiene unos requisitos bastante restrictivos y no siempre es posible su realización. Requiere de unas condiciones de homogeneidad atmosférica horizontal en lo que a los coeficientes de absorción y retrodispersión del aerosol se refiere, es decir que no haya fuentes locales de aerosol, no haya sistemas dinámicos asilados y que no se encuentren estructuras orográficas. Por supuesto también es necesario que el ceilómetro en cuestión se encuentre habilitado para operar en posición horizontal. Si estas condiciones se cumplen, caso que no suele ser muy común, entonces la obtención de la función de solapamiento no presenta muchas complicaciones matemáticas, esto es:

Podemos obtener el coeficiente de extinción de aerosol a partir de la señal corregida en rango (*Range Corrected*) de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dz} \ln(P(z)z^2) = -2\alpha_0 \quad (3.1)$$

Entonces la función de solapamiento $O(z)$ la definiremos como:

$$O(z) = \frac{P(z)}{P_{equ}(z)\alpha_0} \quad (3.2)$$

Es el ratio entre la señal medida por el aparato y la señal teórica predicha por la ecuación Lidar ($P_{equ}(z)$) descrita en el capítulo anterior y el coeficiente de extinción que acabamos de calcular.

La segunda opción propuesta sin embargo requiere de un sistema de referencia de la misma longitud de onda, incluso entre aparatos de iguales características como el Jenoptik y el Vaisala¹ la comparación es de dudosa efectividad puesto que el primero suele operar a 1064 nanómetros y el segundo sobre los 905 nanómetros (por ejemplo no tendrán las mismas relaciones de absorción en vapor de agua o incluso en condiciones secas los coeficientes de extinción y retrodispersión tienen una dependencia con la longitud de onda, siendo en el caso de β_p un 30% mayor para la longitud de onda menor). Vemos aquí que los complejos sistemas Lidar tienen gran importancia puesto que la flexibilidad sobre la longitud de onda a la que operan les permite utilizarlos para calcular la función de solapamiento a través de la relación de la señal medida por el ceilómetro y el instrumento de referencia. Aunque también pueden ser utilizados ceilómetros cuya función de solapamiento es bien conocida.

A la hora de poner en práctica estos procedimientos, comparando datos obtenidos de distintos ceilómetros se observó que entre los 0,5 y los 1,7 kilómetros todos los instrumentos se comportaban de manera similar a la hora de localizar la Planetary Boundry Layer (PBL) o capa de mezcla. ésta es también independiente de la función de correlación de cada ceilómetro, conclusión que puede ser derivada también en el análisis horizontal.

De ambos métodos podemos extraer que por debajo de los 0,2 kilómetros la señal de ceilómetro no debe de ser tenida en cuenta en ningún caso, así como que por encima de la capa de mezcla la señal está principalmente definida por la dependencia con la longitud de onda de los coeficientes de retrodispersión y del hecho de que la troposfera libre no contiene aerosol. Por estos motivos, señales

¹ Jenoptik y Vaisala son dos ceilómetros de distintos fabricantes, que si bien poseen características muy similares, operan a distinta longitud de onda por lo que la calibración entre ellos en la mayoría de los casos no puede ser llevada a cabo.

comparadas por encima de la capa de mezcla no pueden ser utilizadas para obtener funciones de correlación pues dominan las propiedades del aerosol sobre la óptica del aparato.

El mínimo de actuación dependerá del aparato concreto y de la función de solapamiento aplicada en cada caso.

3.2.2. Límite superior

La determinación del rango máximo de un ceilómetro es una cuestión que implica tratar cada aparato individualmente, siendo difícil extraer consecuencias generales. Normalmente la forma más sencilla de extraer conclusiones sobre cuál es el límite superior es una comparación cuantitativa de β_p obtenido por el ceilómetro y un Lidar midiendo de manera simultánea y en el mismo lugar.

El máximo rango aceptable de cada ceilómetro está fuertemente dominado por la longitud de onda a la que trabaja. Cuanto mayor es el nivel de absorción por el vapor de agua más obstaculiza las medidas a grandes alturas, fenómeno que se tiene cuando la longitud de onda es menor, aunque se obtienen imágenes más precisas para alturas menores.

Al contrario, si la longitud de onda es mayor, la absorción por vapor de agua será menor, lo que permite una mayor altura pero no tanta precisión cerca del suelo. La absorción de la señal de los ceilómetros por parte del vapor de agua será tratado en una sección posterior.

Por poner ejemplos concretos los límites de trabajo de un ceilómetro Jenoptik (1064nm) están en los 12 kilómetros aproximadamente mientras que los ofrecidos por un ceilómetro de 905 nm de longitud de onda suele estar situado en los 8 kilómetros. Por encima de esas alturas, la señal recibida es excesivamente ruidosa para permitir extraer información sobre los aerosoles.

Una comparación gráfica la encontramos en la siguiente figura:

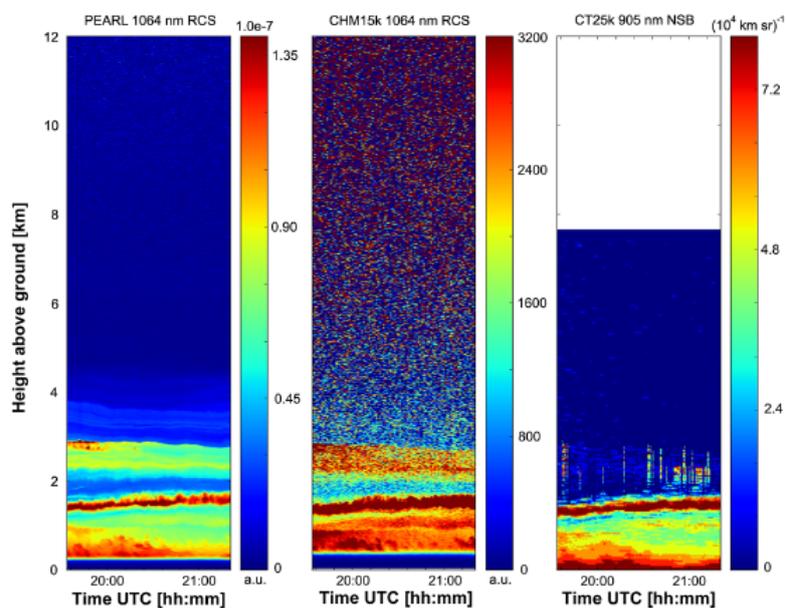


Figura 3.2: Comparación entre resultados basados en técnica Lidar.

En la figura de arriba observamos la misma medida realizada por un Lidar(izquierda), un ceilómetro de 1064nm(central) y uno de 905nm(derecha).

Podemos apreciar en la figura todos los comentarios hechos hasta ahora. Mientras que el ceilómetro de mayor longitud de onda presenta mejores resultados si se compara con la señal Lidar en la capa de aerosol situada sobre los 3 kilómetros aproximadamente y un rango de medida superior al de menor longitud de onda, el de 905nm tiene una mayor coherencia con la señal obtenida en el Lidar en las alturas más cercanas al suelo.

3.3. Ecuación Lidar aplicada al ceilómetro. Coeficientes de retrodispersión.

Como era esperable la ecuación Lidar que rige un ceilómetro no diverge mucho del caso general que exponíamos en el capítulo anterior. La ecuación de la que partiremos para obtener las propiedades ópticas deseadas del aerosol es la siguiente:

$$P(z) = C_L \frac{\beta(z)}{z^2} \exp \left\{ -2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right\} \quad (3.3)$$

Al igual que comentamos en su momento, las características del aparato están incluidas en la constante de calibración C_L , de igual manera podemos separar los coeficientes de retrodispersión y de extinción en su componente molecular y la que hace referencia a las partículas.

Consideraremos retrodispersión elástica y aproximación de dispersión simple (*single scattering*). Bajo unas condiciones normales de trabajo la mayor precisión estará en el cálculo de β_p , en particular si estamos trabajando en condiciones de baja concentración de aerosol y longitudes de onda largas, β_p será mucho menos sensible a los posibles errores tanto en la medición experimental como en las asunciones en el Lidar ratio S_p que los coeficientes de extinción.

Los mayores problemas encontrados residen en que las componentes moleculares de ambas magnitudes (extinción y retrodispersión), deben de ser calculados con perfiles de densidad, mediante el uso de radio sondas por ejemplo, y que el Lidar ratio dependa de la altura y no sea una constante (como habíamos supuesto hasta ahora), sobre todo si se encuentran aerosoles de distintas fuentes o tipos. Esto nos impide hacer estimaciones con una precisión aceptable.

De estas pinceladas generales podemos extraer que la única propiedad óptica que puede ser extraída de los ceilómetros es β_p . En general con un ceilómetro no se podrán medir los coeficientes de extinción, simplemente porque los canales necesarios para ello no están presentes en este tipo de aparatos (son necesarios canales Raman y de depolarización). La obtención propiedades microfísicas como la distribución de tamaños tampoco es posible, puesto que sería necesario tener información de múltiples longitudes de onda.

Todo esto se pone de manifiesto reordenando la ecuación Lidar de nuestro ceilómetro, en la que definimos el coeficiente de retrodispersión atenuado como:

$$\beta^* = \frac{P(z)z^2}{C_L} = \beta(z) \exp \left\{ -2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right\} \quad (3.4)$$

Discutamos la utilidad de la expresión anterior. El término de transmisión (la exponencial) está muy cercano a la unidad y el único cambio que se observa es gradual con la altura. Esto nos permite asociar cualquier cambio en β^* directamente a β . Además la parte molecular β_m está muy ligada a la densidad del aire lo que significa que cualquier cambio significativo de las medidas puede ser atribuido una vez más a β_p . De esta manera se hace evidente que la detección de capas de aerosol es posible desde tanto aparatos calibrados de los cuales conocemos C_L como de los no calibrados, puesto que todas las variaciones pueden asociarse sin fuentes de error significativas a β_p .

En consecuencia la más inmediata utilidad de los ceilómetros es la obtención de la altura de la capa de mezcla conocida como PBL. Se deriva únicamente de la 'forma' de la señal, es decir, no se trata de una propiedad óptica de las partículas.

Cálculo analítico de β_p

Nos centraremos ahora en el cálculo analítico de nuestros coeficientes β_p . La solución a nuestra ecuación presenta la siguiente forma:

$$\beta_p = \frac{Z(z)}{N(z)} - \beta_m(z) \quad (3.5)$$

donde encontramos:

$$Z(z) = z^2 P(z) \exp \left\{ -2 \int_0^z [S_p(z') - S_m] \beta_m(z') dz' \right\} \quad (3.6)$$

y

$$N(z) = C_L - 2 \int_0^z S_p(z') Z(z') dz' \quad (3.7)$$

Donde S_m es la razón Lidar o Lidar ratio para moléculas. Surgen dos posibles soluciones para terminar el problema, comúnmente conocidas como procedimiento hacia adelante (*forward approach*) y hacia atrás (*backward approach*). La primera de ellas es de gran utilidad en ceilómetros cuya constante de calibración Lidar es bien conocida y presentan unas condiciones de estabilidad a largo plazo, aunque esta técnica no es la más utilizada puesto que normalmente nos encontramos que los fabricantes dan sus propias funciones de señal de retrodispersión sin aportar ningún tipo de información ni de la constante de calibración ni de la función de solapamiento. es decir, la señal se procesa a través de ajustes automáticos totalmente desconocidos para el usuario.

Por otro lado, el *backward approach* es la aproximación más utilizada en los Lidar destinados a la medición de aerosol, aunque en ocasiones no es eficaz en ceilómetros puesto que no tienen sensibilidad suficiente para medir las componentes moleculares a una altura suficiente para asegurar una atmósfera libre de aerosol.

Forward Approach

Como hemos comentado, este método se basa en que una vez conocidos los coeficientes de retrodispersión y de extinción, con la señal medida del ceilómetro podemos obtener la constante de calibración Lidar de la siguiente manera:

$$C_L = \frac{P(z)z^2}{\beta(z)} \frac{1}{T_{ovl}^2} \exp \left\{ -2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right\} \quad (3.8)$$

Simplemente se ha despejado de la ecuación Lidar general del ceilómetro y hemos introducido el coeficiente de transmisión del intervalo de solapamiento T_{ovl}^2 , es decir, está definido de manera idéntica a como lo habíamos hecho anteriormente pero el rango de integración está limitado desde de el suelo a la altura donde deja de actuar la función de solapamiento, que nos corregía las señales próximas a rango cero.

Se concluye que la precisión en el cálculo de la constante Lidar no es de una importancia determinante, puesto que, nos movemos en unos márgenes de error de entre el 1% y el 3%, esto nos da margen para utilizar aproximaciones, como pueden ser, asumir que los coeficientes de extinción son constantes en rango (aproximación muy común).

Backward Approach

Este método esta basado en la calibración Rayleigh, integrando la señal de nuestro problema durante un largo periodo de tiempo, del orden de 8 horas. Estas largas integraciones temporales nos permitirán reducir el ruido de la señal (incrementar la relación señal a ruido, SNR), lo que nos permitirá la detección de retrodispersión molecular en regiones libres de aerosol. El problema no carece de importancia, puesto que los ceilómetros típicamente trabajan en un rango espectral en el que la dispersión molecular es débil, que junto unos pulsos láser de baja energía, hacen muy difícil la detección de la señal correspondiente únicamente a las moléculas. Es imprescindible reducir al máximo el SNR ya que introduce errores de alta magnitud en la medida de β_p .

El periodo de integración realizado en este método debe de estar libre de nubes a la altura de calibración pero tiene la ventaja respecto al anterior que no necesita capas de aerosol estables a alturas mas bajas. Llegados a este punto se aplica el algoritmo de inversión de Klett-Fernald-Sasano, usando un perfil de referencia para estimar el valor de calibración en altitudes bajas incluso si hay aerosol presente.

El procedimiento usual para intentar paliar los inconvenientes que presenta este método es el uso de fotómetros para obtener el espesor óptico τ_p . Esto nos proporciona una ecuación más de referencia a la hora de hacer los cálculos.

3.4. Absorción por vapor de agua.

Como hemos mencionado anteriormente, aunque los ceilómetros de más alta longitud de onda no se ven afectados por procesos de absorción de la señal por parte del vapor de agua que se encuentra en la atmósfera, para aquellos de menor longitud de onda formará una parte esencial en los procesos radiativos. Vamos a entrar un poco más en detalle de cómo se trabaja en estos casos.

Para empezar los coeficientes de extinción con los que trabajamos deben ser modificados respecto a los calculados anteriormente de la siguiente manera:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_m + \alpha_W \quad (3.9)$$

Es decir añadimos a los correspondientes a las partículas y a las moléculas, los procesos propios del vapor de agua.

Para conocer la corrección necesaria por vapor de agua hay que conocer la distribución vertical de la humedad absoluta, los coeficientes de extinción del vapor de agua y el espectro del láser. La distribución del vapor de agua puede ser obtenida mediante el uso de lidar de absorción diferencias o lidar Raman, de los cuales ya se habló en el capítulo anterior, pero los mejores resultados para este tipo de medidas son los ofrecidos por radiosondas y modelos de análisis meteorológico, si bien es cierto que ninguno de ellos ofrece grandes precisiones ni una resolución vertical demasiado alta.

La distribución del vapor de agua es dada en términos de la humedad relativa, que podrá variar entre el 0% o 99%. Lo que nos interesa aquí es un estudio limitado únicamente al vapor de agua, por lo que asumiremos al aerosol como totalmente hidrofóbico.

A través de la medida de atmósferas con diferentes condiciones de humedad, cubriendo todo el rango posible de humedad relativa, se llega a que la influencia del vapor de agua no es como podría esperarse. Los cambios son muy pequeños en las capas superiores de aerosol dentro de la capa de mezcla, de tal manera que las pendientes de las posibles capas de aerosol no varían, aunque si se aprecia una atenuación de la intensidad de la señal recibida. Esto impide que grandes errores sean cometidos a la hora de interpretar los productos de la señal a no ser que nos encontremos en casos muy extremos como pueden ser capas extremadamente secas de aerosol en un ambiente de alta humedad relativa. En ese caso es posible ver un cambio significativo en la pendiente de la señal y llegar a conclusiones erróneas.

Sin embargo a la hora de obtener los coeficientes de retrodispersión para las partículas sí que nos presenta problemas que debemos tener en cuenta. Los algoritmos de cálculo definidos en apartados anteriores no son válidos aquí, puesto que la constante Lidar C_L , es desconocida en presencia de vapor de agua. En general debido a despreciar este tipo de procesos, los coeficientes de retrodispersión son sobrestimados entorno a un 20%. Esto se debe a que la absorción del vapor de agua se interpreta como una extinción del aerosol. Los coeficientes de transmisión por lo tanto también se verán afectados, por lo que los correspondientes al vapor de agua deben de ser calculados de la siguiente manera:

$$T_{W,eff}^2(z) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i T_W^2(\lambda_i, z)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} = \exp\{-2 \int_0^z \alpha_W(z') dz'\} \quad (3.10)$$

Si el objetivo es el cálculo de las propiedades ópticas de aerosol, los procesos de absorción por vapor de agua tienen que ser tenidos en cuenta ineludiblemente, siempre que no trabajemos con una longitud de onda de 1064 nm en cuyo caso no se verá afectada. A través de un tratamiento correcto es posible reducir el error cometido en el cálculo de los coeficientes de retrodispersión de el 20% comentado anteriormente hasta un 5%.

3.5. Extinción y retrodispersión bajo distintas condiciones atmosféricas.

En esta sección analizaremos cual es el tratamiento que debe de ser aplicado a la señal de un ceilómetro si son conocidas, mediante medios externos, las condiciones concretas en las que se encuentra la atmósfera cuando fue realizada la medida:

- Cielo Despejado:

En la longitud de onda en la que trabaja el ceilómetro encontramos que en condiciones de cielo claro la extinción atmosférica está dominada por en su totalidad por la dispersión de aerosol. Las contribuciones moleculares tanto de extinción como de dispersión son despreciables en comparación.

- Calima:

En estas condiciones en las que el aire presenta mayor concentración de aerosol y con un mayor tamaño de las partículas, además tienden también a aumentar con la humedad relativa, así que las propiedades ópticas del aerosol (incluyendo los coeficientes de extinción) se ven afectados por la humedad también. Son apreciables los cambios en los coeficientes de retrodispersión a partir de valores de humedad relativa en torno al 50%, siendo muy importantes para mayores valores de humedad.

- Nubes:

Una de las principales funciones de los ceilómetros hoy en día sigue siendo la determinación de la altura de la base de las nubes (Cloud base Height, CBH). Esto será discutido en otro apartado más detenidamente.

- Precipitación:

Haremos un análisis del cálculo de los coeficientes de extinción, tanto para el caso de lluvia como para nieve. Normalmente en los perfiles de Lidar obtenidos en la práctica estas situaciones se identifican con grandes saturaciones de la señal a bajas alturas.

El coeficiente de extinción debido a la lluvia presenta la siguiente forma:

$$\sigma_r = aR^b \quad (3.11)$$

Donde hemos establecido una relación entre la intensidad de precipitación expresada en milímetros por hora y la extinción que provoca. Las constantes a y b servirán para ajustar a los distintos casos.

Por otro lado el correspondiente a la nieve es:

$$\sigma_s = KR \quad (3.12)$$

Generalmente el índice de extinción de este tipo será mayor al producido por la lluvia. Como observamos en este caso, la relación es lineal, pero tratando las constantes en km^{-1} nos encontramos con valores típicos de K de 2,5 y para 'a' de 0.12, quedando en evidencia el diferente orden de magnitud de ambas cantidades.

Los cálculos específicos de estas magnitudes se han seguido a través del siguiente razonamiento: se establece la cantidad de elementos de precipitación en cada tamaño (diámetro de las gotas), y posteriormente se hace una integración de la energía dispersada por cada tamaño a todos los tamaños posibles.

Establecemos el número de gotas con un diámetro concreto como:

$$N(D)dD = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (3.13)$$

Donde D es el diámetro de cada gota y estamos suponiendo que el tamaño está sometido a una dispersión estadística dentro de una aproximación exponencial. Λ es una función del ritmo o intensidad de precipitación, expresado en mm^{-1} . Debido a que las gotas de lluvia presentan un tamaño mucho mayor que la longitud de onda del láser, podemos usar la óptica geométrica para establecer que la sección eficaz de extinción de las mismas es $(\frac{\pi}{2})D^2$. Por último sólo nos queda integrar a todos los posibles tamaños de las gotas:

$$\sigma_r = \frac{\pi}{2} \int_0^{\infty} N(D)D^2 dD \quad (3.14)$$

Al comparar cálculos teóricos con los medidos experimentalmente se encuentran ciertas diferencias apreciables. Esto es debido a la sobrestimación del efecto real en la dispersión por gotas de pequeño tamaño. Aún así los datos ofrecidos por este cálculo presentan una correspondencia suficiente, siendo uno de los más utilizados.

3.6. Altura de la base de las nubes

Como se ha comentado anteriormente, los ceilómetros representan uno de los instrumentos más útiles a la hora realizar una descripción continua y automática de las características de las nubes. Aquí expondremos algunas pinceladas teóricas y los métodos generales más utilizados.

Las nubes son un agente esencial en los procesos radiativos y más concretamente de dispersión en la atmósfera, afectando tanto a longitudes de onda corta como más larga. Es sin embargo difícil saber cómo las nubes afectan al clima, puesto que la variedad de procesos implicados, la enorme cantidad de información necesaria, la distribución espacial y la incertidumbre asociada a la información disponible lo convierten en un proceso realmente arduo.

Los ceilómetros suelen estar enfocados a la medición de la altura de la base de las nubes, a la cobertura nubosa y a la distribución de su estructura vertical.

Podemos dividir los diferentes métodos en el estudio y la investigación de las nubes en tres grandes grupos: instrumentación desde Tierra, observación desde satélite y mediante simulación con modelos meteorológicos.

Los ceilómetros como no podía ser de otra manera se encuentran en el primer grupo, y son el tipo de instrumento más comúnmente utilizado en este tipo de investigaciones.

Se define la CBH como la altura de nuestro perfil de retrodispersión que presenta un valor máximo en la señal recibida. Si bien es cierto que existen circunstancias en las que este valor máximo no corresponde con la parte inferior de la nube, sin embargo este tipo de situaciones ya son tenidas en cuenta en los algoritmos de cálculo empleados.

Su modo de operación consiste en tratar estos máximos de señal recibida en diferentes capas. Muchos estudios a través de mediciones a lo largo de amplios periodos de tiempo han demostrado que, a pesar de la evidente dependencia con las condiciones locales donde se sitúe el aparato, cerca del 90% de los casos se obtienen eventos de una sola capa de nubes, al rededor del 10% para eventos de dos capas detectadas y menos de 1% para casos de 3 capas.

En las situaciones en las que una sola capa está presente, los ceilómetros presentan una gran fiabilidad en la medida puesto que no existen elementos adicionales que puedan distorsionar la señal o saturarla, pudiendo llevar a conclusiones equivocadas. Los posibles errores en los eventos con más de una capa son en general también asumibles.

Si bien es cierto que los ceilómetros proporcionan una buena imagen de la estructura vertical de las nubes, a diferencia de otro tipo de instrumentos como pueden ser las observaciones por satélite, no ofrecen prácticamente ninguna información sobre la extensión horizontal de las mismas. Aquí podemos incluir distintos casos que pasan desapercibidos para los ceilómetros, como pueden ser que las nubes que se encuentren en distintas capas, que dos capas se mezclen entre ellas o que distintas capas coincidan haciendo que la información pierda fiabilidad. Otra de las principales desventajas, como ya se ha discutido anteriormente es el límite de validez superior en las medidas de estos instrumentos, por encima del cual ninguna información puede ser extraída. En la práctica, la forma de paliar estas carencias consiste en la combinación de medidas provenientes de distintos aparatos, como pueden ser radiómetros, radar MMCR (milimeter-wave Radar) o un Lidar, en conjunto ofrecen unos resultados suficientes para ser comparados con los modelos meteorológicos, con la necesaria precisión tanto espacial como temporal.

Capítulo 4

Jenoptik CHM15K Nimbus

En este capítulo vamos a centrarnos en el ceilómetro concreto con el que se ha trabajado. Se hará una descripción de las características técnicas del mismo, así como de su modo de funcionamiento e indicaciones para su uso. Por otro lado se hará una descripción de todos los productos que ofrece el ceilómetro y del programa desarrollado que se ha empleado para leerlos y almacenarlos. También está incluida en esta sección la descripción del otro programa desarrollado para el tratamiento del producto más importante del ceilómetro, para su posterior inclusión en el algoritmo GRASP.

4.1. Descripción técnica del aparato

EL CHM 15k está diseñado para medir nubes a un máximo de altura de 15 kilómetros, y determinar la anchura de penetración de la capa de nubes y la visibilidad vertical. Como hemos descrito en el apartado anterior, al igual que cualquier ceilómetro convencional el CHM 15k se vale de la técnica Lidar para emitir cortos pulsos de luz a la atmósfera. El 'tiempo de vuelo' del pulso y la intensidad del mismo son analizadas para obtener los distintos productos. A través de ellos se puede obtener la altura de las distintas capas de nube o aerosol.

Este sistema de Jenoptik esta basado en el sistema de conteo de fotones, que presenta beneficios considerables respecto a las técnicas de medida analógicas, como pueden ser una alta precisión en la detección, y una gran sensibilidad. Estas características hacen del ceilómetro especialmente válido para la aplicación de la técnica Lidar.

El CHM 15K cuenta con un rango de medida de entre 5 metros y 15 kilómetros, con una resolución espacial de 15 metros y una resolución temporal variable, abierta para el usuario, que puede variar entre los 2 y los 600 segundos de tiempo de integración. Desde el día que entró en funcionamiento, 20 agosto de 2013 a las 11:34 UTC, el día que se realizó su instalación en la azotea de la facultad de ciencias de la UVA, al 28 de octubre de 2014 a las 13:30 UTC el ceilómetro estuvo midiendo con una resolución temporal de 5 minutos. Desde ese día hasta el 17 de noviembre de 2015 a las 13:05 UTC el ceilómetro midió con una resolución de 1 minuto y por último, desde el 17 de noviembre a día de hoy, que el aparato sigue midiendo ininterumpidamente, lo hace con una resolución temporal de 15 segundos.

El haz láser de nuestro aparato está centrado en los 1064 nanómetros con una dispersión de longitud de onda de 0.1 nanómetros, una duración de pulso entre 1 y 5 nanosegundos, una frecuencia de repetición del pulso de entre 5 y 7 kilohercios, un diámetro de haz de 90 milímetros, con una divergencia de menos de 0.3 miliradianes, una energía de pulso de 3 microJulios y el sistema receptor tiene un FOV de 0.45 miliradianes. El sistema de almacenamiento de datos del ceilómetro tiene dos posibles vías para comunicarse con un Pc en el exterior, o bien con una conexión RS485 o mediante LAN. En este caso la instalación se hizo mediante la conexión LAN.

En la siguiente figura podemos observar unas fotografías del aparato en cuestión realizadas en la azotea de la facultad de ciencias de la universidad de Valladolid. Podemos ver tanto su parte exterior, como las principales componentes de su interior:



Figura 4.1: Fotografías del ceilómetro en la azotea de la facultad de ciencias.

4.1.1. Condiciones ambientales de Operabilidad y Mantenimiento

El ceilómetro CHM15k está diseñado para un correcto funcionamiento mientras las condiciones exteriores se encuentren entre los -40°C y los $+50^{\circ}\text{C}$. Fuera de este rango de temperatura no se asegura el correcto funcionamiento del aparato. La condición de humedad relativa del aire sin embargo no se presenta como un factor limitante puesto que una perfecta medición puede ser llevada a cabo entre el 0% y el 100% de humedad relativa. La máxima cantidad de viento que soporta el aparato está en torno a los $55 \frac{m}{s}$.

Para hacer que estas condiciones de operación, el diseño de la cubierta exterior está hecho de tal manera que el interior queda totalmente protegido de radiación solar, viento, lluvia y nieve. En la parte superior y más expuestos a las condiciones meteorológicas nos encontramos con los módulos del emisor y el receptor, el panel de procesado central, el modulo de control del láser, los transformadores y fuentes de alimentación, los sistemas tanto de calefacción como de refrigeración además de los sensores de temperatura tanto interior como exterior.

La protección superior, además de cubrir al láser de la precipitación y la suciedad, presenta dos salidas, una para que el haz emitido salga hacia la atmósfera y otra abertura para que el detector pueda ejercer su función. Encontramos integrado dentro de la parte superior interior un panel de cristal separado para la parte del emisor y para la del receptor. Este cristal está orientado de tal manera que se mantiene el ángulo de Brewster con ambos haces. Esto está pensado para que las pérdidas de la señal a través del panel de cristal sean mínimas tanto a la salida como de nuevo a la entrada. Además la inclinación es perfecta para el sistema de 'autolimpiado' que tienen estos paneles a través de un sistema de ventiladores que dirigen una cantidad de aire hacia los mismos eliminando posible suciedad depositada en ellos. Además estos ventiladores están pensados con funciones refrigeración del aparato.

Es muy importante realizar un seguimiento rutinario del correcto funcionamiento de todas las partes del ceilómetro, ya que gran parte del atractivo es el funcionamiento del mismo durante las 24

horas del día con la precisión adecuada. Uno de los elementos que debe ser tenido muy en cuenta es el estado del receptor. El aparato cuenta con un sistema de testeo propio basado en los niveles de ruido medidos, el voltaje recibido y la intensidad de corriente con y sin un pulso de prueba. La señal que advertirá del funcionamiento incorrecto del mismo será la detección de una tasa de repetición del láser por debajo de los 4.5 KHz. Obtener valores por debajo de este usualmente es debido al envejecimiento por las continuadas horas de uso de la fuente de luz.

A pesar de todo lo comentado anteriormente sobre el poco mantenimiento que requiere el ceilómetro y el sistema de 'autolimpieza', un mínimo mantenimiento es necesario:

Trimestralmente es necesario realizar una limpieza del panel de cristal con agua y jabón, y eventualmente, cuando sea necesario se debe retirar la sedimentación acumulada en la carcasa superior así como la nieve o posibles obstrucciones de la entrada de aire de los ventiladores de refrigeración, cuya salida se encuentra en la parte posterior del aparato.

Con mucha menor frecuencia se deben tener en cuenta consideraciones como reemplazar el deshumidificador del interior, cambiar el modulo de láser óptico si la tasa de repetición cae por debajo del límite anteriormente mencionado, o reemplazar la junta de goma de la compuerta de la parte interior.

4.2. Productos

En esta sección analizaremos uno a uno los distintos productos y variables atmosféricas que nos ofrece el ceilómetro, así como el programa desarrollado para su lectura, visualización y almacenamiento y el procesado de la información obtenida.

4.2.1. NetCDF

El sistema de software proporcionado por la empresa Jenoptik ofrece dos posibilidades para la lectura de las variables medidas por el aparato. Una de ellas consiste en un 'telegrama de datos' que precisa además de otro software externo para la visualización de los mismos. La otra opción es una salida a través de archivos NetCDF. Esta última opción fue la elegida.

El formato de archivos NetCDF es un sistema de software libre de librerías autodescriptivas e independientes de la máquina que las soporta, de tal manera que permiten la creación y acceso de datos científicos normalmente de forma matricial. Las principales ventajas de este formato son:

- Minimización del espacio de almacenamiento.
- Funcionalidad del mismo para ser accedido o modificado, y la sencillez que presenta el aprendizaje de usarlo.
- La eficiencia computacional que presenta así como su arquitectura independiente.
- La gran expansión que presenta dentro de la comunidad científica, habiéndose convertido en muchos campos prácticamente en un standard, sobre todo en la ciencia atmosférica y geo-espacial.
- Internamente contiene toda la información necesaria para la interpretación del fichero.

Los archivos se transmiten desde el software de almacenamiento propio del aparato al exterior. Cada 15 minutos son enviados 3 paquetes con la información correspondiente a 5 minutos cada uno, mientras el ceilómetro esté trabajando en el modo AFD(Away From Device). Posteriormente se hace una 'recompilación' en archivos de 24 horas.

Diariamente se obtiene un archivo de datos NetCDF de nombre generado por la siguiente estructura:

YYYYMMDD_[location]_[Device].nc

En nuestro caso particular, como ejemplo podemos encontrar:

20160519_VALLADOLID_CHM130102_000.nc

Procederemos ahora a describir la estructura general de este tipo de archivos:

Nos encontramos que cada variable contenida en estos archivos tiene las mismas características:

un nombre que la distinguirá de las demás, principalmente de cara al usuario, y un tipo que denominará qué tipo de información contiene, habiendo las siguientes opciones:

- int, para enteros.
- float, para números con coma flotante.
- short, para enteros de menor longitud.
- schar, para caracteres con signo.
- double, para decimales de longitud doble.

Como vemos la nomenclatura es muy similar a la utilizada en el lenguaje C de programación. Las dimensiones de cada variable están definidas también dentro de cada archivo y en el caso que nos ocupa son cuatro:

- time, dependencia con el tiempo del intervalo en el que el aparato toma medidas.
- range, dependencia con el rango de medida del aparato.
- range_hr, dependencia con el rango con una resolución de 5 metros.
- layer, hace referencia a los productos que se devuelven por capas.

La gran ventaja de la utilización de este sistema es que estas dimensiones están asociadas a las variables, pero lo que no está definido es el tamaño de dichas dimensiones, que queda abierto al usuario. Por ejemplo, el tiempo de la toma de medidas del ceilómetro se ha ido variando con el paso del tiempo, por lo que el tamaño de la dimensión 'time' habrá sufrido los pertinentes cambios, es decir, primero tenía un tamaño de 288, posteriormente se aumentó a 1440 y en último lugar a 5760, que es el modo de operación actual (cada 15 segundos). De la misma manera funcionan el resto de dimensiones, siendo el rango fijo puesto que la resolución espacial del aparato es fija a 15 metros por lo que el tamaño de la dimensión 'range' es siempre 1024. El valor de la dimensión 'layer' está fijado a 3 puesto que los productos que la requieren en el 99% de los casos nunca superan los tres valores de salida (por ejemplo el CBH), bien sea por falta de dicho evento en el día o por que la resolución espacial del aparato no permite diferenciarlos con mayor precisión.

Ahora centremos nuestra atención en otro tipo de información que podemos encontrar en los NetCDF. Se trata los llamados 'atributos', de los que nos encontramos dos tipos:

- **Atributos globales:** están ligados al archivo como conjunto, y nos dan información general de cómo se han tomado las medidas. Podemos encontrar desde el nombre del aparato, el nombre de las institución propietaria del mismo, la fecha en la que los datos fueron tomados o la versión del software. Esta información debe ser añadida por el usuario y actualmente en los NetCDF con los que se hizo este trabajo no se encontraban este tipo de atributos.

- **Atributos de variable:** Estos atributos asociados a cada variable particular nos ofrecen información adicional de cada una, como pueden ser sus unidades, el 'nombre completo' de la variable o el factor de escala.

Como ejemplo visual de cómo se estructuran este tipo de datos vamos a ver una variable en concreto:

```
short p_calc(time)
long_name = calibration pulse in photons per shot
units = counts/shot
scale_factor= 100000
```

Donde vemos que tenemos una variable tipo 'short' de nombre *p_calc*, con una sola dimensión que es 'time' y tres atributos que son '*long_name*', '*units*' y '*scale_factor*', con sus correspondientes valores cada uno.

Así es fácil ver la gran utilidad de estos archivos dentro de la comunidad científica, puesto que cada conjunto de datos contiene absolutamente toda la información necesaria de cada variable y del conjunto completo, sin necesidad de apéndices exteriores u otros documentos que lo complementen.

Acceso a los NetCDF

El procedimiento general que se debe de seguir para poder acceder a la información de los NetCDF, y el que se ha seguido en el primer programa en C que se ha desarrollado para este trabajo, con el objetivo de leer, guardar y representar todos los productos del ceilómetro, es el siguiente:

1º Debemos obtener mediante los nombres, supuestos conocidos, de las dimensiones la ID que le ha sido otorgada a cada uno dentro del archivo.

2º Una vez conocida la ID de cada dimensión leemos su longitud.

3º Seguimos el proceso análogo para las variables: conocido su nombre leemos su ID.

Una vez que tenemos conocidas todas las ID's es mucho mas fácil a nivel de software trabajar con ellas que con los nombres.

4º Leemos los tipos de cada variable.

5º Obtenemos el número de sus dimensiones, lo que nos permitirá saber si se trata de un escalar (número de dimensiones igual a 0), un vector (número de dimensiones igual a 1) o si se trata una matriz (en cuyo caso será 2). Además leemos cuáles son esas dimensiones.

6º El proceso descrito para las variables es totalmente análogo para el de los atributos de cada una: ID, nombre, valor...

7º Con todos estos datos ya conocidos de cada variable estamos en condiciones de de leer los valores concretos de cada variable, de tal manera que nos encontramos con una función específica para cada tipo de variable, para cada número de dimensiones correspondiente o de qué forma queremos almacenarla.

Básicamente en esos sencillos pasos podemos explicar de manera general cómo funciona el primer programa que se ha hecho. Por último se ha elegido GNUPlot para realizar las distintas gráficas de cada uno de las variables o productos. La principal razón para elegir GNUPlot por encima de otros, que podrían ser más accesibles para el usuario y de mejor acceso a la edición de los mismos, es la gran portabilidad que presenta y los pocos recursos de la máquina que consume. El programa se ha realizado de la manera más general posible, de tal forma que mediante un sistema de sencillas opciones desde la terminal se puede elegir el día, el intervalo de horas y la variable o variables que se desean leer y representar.

A partir de ahora todos las representaciones gráficas y tablas de datos que incluiremos en este trabajo se han obtenido mediante el programa desarrollado.

4.2.2. Descripción

En esta sección procedemos a la descripción de todos y cada uno de los distintos productos que se pueden extraer del ceilómetro, con una representación gráfica de cada uno (en los que sea posible) y en unos días en los que se detectaron eventos concretos, estos días son:

- 11-08-2014 se detectó un evento de aerosol proveniente de combustión de biomasa.
- 21-10-2014 se detectó un evento de aerosol del tipo mineral (polvo sahariano).
- 24-05-2016 se detectó un evento de nubosidad.

Con el objetivo de poder tener una intuición más clara de lo que está midiendo y representando, vamos a acompañar a la representación de los datos con una imagen de la cámara de cielo que también se encuentra instalada en la azotea de la facultad. Esta cámara toma y almacena fotos del cielo continuamente y a intervalos regulares, de tal manera que nos será muy útil a la hora de comparar nuestros productos con el aspecto que tenía el cielo esos días.

Vamos a empezar con una tabla a modo de resumen de todos los productos que nos encontramos, para tener una primera impresión general:

| Producto | Tamaño/Nº puntos | Tipo | Unidades | Cuantitativo |
|----------------|------------------|--------|--------------|--------------|
| latitude | 1 | float | degrees | si |
| longitude | 1 | float | degrees | si |
| time | time | double | seconds | si |
| range | 1024 | float | meters | si |
| altitude | 1 | float | meters | si |
| azimuth | 1 | float | degrees | si |
| zenith | 1 | float | degrees | si |
| wavelength | 1 | float | nm | si |
| laser pulses | time | int | - | si |
| range gate | 1 | float | meters | si |
| average time | time | int | ms | si |
| beta raw | time,1024 | float | - | si |
| error ext | time | int | - | no |
| state optics | time | short | percent | si |
| temp int | time | short | 10*Kelvin | si |
| temp ext | time | short | 10*Kelvin | si |
| temp det | time | short | 10*Kelvin | si |
| temp lom | time | short | 10*Kelvin | si |
| life time | time | int | hours | si |
| state laser | time | short | percent | si |
| state detector | time | short | percent | si |
| base | time | float | photons/shot | si |
| stddev | time | float | photons/shot | si |
| p calc | time | float | photons/shot | si |
| scaling | 1 | float | - | si |
| PBL | time,3 | short | meters | si |
| PBS | time | schar | - | si |
| SCI | time | schar | - | no |
| BCC | time | schar | -/oktas | no |
| TCC | time | schar | -/oktas | no |
| CBH | time,3 | short | meters | si |
| CBE | time,3 | short | meters | si |
| CDP | time,3 | short | meters | si |
| CDE | time,3 | short | meters | si |
| MXD | time | short | meters | si |
| VOR | time | short | meters | si |
| VOE | 1 | short | meters | si |
| CHO | 1 | short | meters | si |

Tabla 4.1: Productos del ceilómetro

El primer grupo de variables que nos encontramos son las referidas a las características del aparato y a su localización, que como vemos también están incluidas en el archivo NetCDF:

- latitude: expresa en grados norte la latitud en la que se encuentra midiendo el aparato. En nuestro caso: 41.663898°
- longitude: expresa en grados este la longitud en la que se encuentra midiendo el aparato: -4.7056°
- time: mide la hora interna del ceilómetro, que se expresa en el número de segundos que han

pasado desde el 1 de enero de 1904 a las 00:00:00.

- **range**: almacena los valores de altura respecto del suelo en los que el aparato ha tomado medidas expresadas en metros, siendo una sucesión de números equiespaciados por 15 metros, 1024 valores por perfil, que efectivamente cumplen el rango máximo del aparato de 15 Km.

- **range_hr**: la misma variable que range pero esta tiene una resolución de 5 metros, aunque tiene un rango máximo mucho menor, únicamente 32 valores por perfil.

- **altitude**: altura en metros a la que se encuentra el ceilómetro midiendo respecto del nivel del mar. En nuestro caso: 705 m

- **azimuth**: ángulo azimutal en el que se encuentra midiendo el aparato. En nuestro caso: 0.000°

- **zenith**: ángulo cenital en el que está midiendo el ceilómetro. En nuestro caso: 0.000°

El siguiente grupo de variables nos describen procesos internos que están ocurriendo dentro del ceilómetro y que tienen que ver con su óptica:

- **wavelentgh**: longitud de onda de operación del aparato, que tiene un valor de 1064 nanómetros.

- **laser_pulses**: número de pulsos promediados en cada medida. Encontramos un valor medio de 35700.

- **range_gate**: expresada en metros da la resolución espacial de la medida. Tiene un valor de 14.985.

- **average_time**: expresado en milisegundos, tiempo sobre el que se realiza el promediado de la señal. En nuestro caso va tomando los valores de integración que hemos mencionado anteriormente es decir 300000, 60000 y 15000 ms, para cada configuración correspondientemente.

- **beta_raw**: Principal producto del ceilómetro, corresponde al backscatter Lidar en crudo, es decir, sin hacer ningún tipo de promedio ni espacial ni temporal. Posteriormente serán descritos los promedios que se realizaron sobre esta señal. La única consideración hay que tener en cuenta respecto al tratamiento de la señal es que es señal corregida en rango (*Range corrected signal*), es decir, que está multiplicada por el rango al cuadrado. Lo que el fabricante sí que aplica sobre la señal digital "pura", es una corrección de la óptica del sistema siendo nuestra expresión del valor de beta_raw correspondiente a:

$$Beta_raw = ((signal_raw / lp) - b) / (c * o(r) * p_calc) * r^2$$

Donde 'lp' corresponde a la variable 'laser_pulses' descrita anteriormente, 'b' corresponde a la variable 'baseline' que describiremos a continuación, 'p_calc' también será descrita a continuación y la función 'o(r)' es la función de solapamiento de nuestro ceilómetro de la cual ya se hizo una descripción adecuada en el capítulo anterior y que como podemos apreciar aquí nos es totalmente desconocida (y dependiente del fabricante).

Para esta variable se han desarrollado dos rutinas independientes. Una de ellas nos ofrece una tabla de datos ordenada por hora decimal y rango, de la que podemos ver a continuación una pequeña muestra:

| Hora decimal | Rango/Km | Beta_raw / unitless |
|--------------|----------|---------------------|
| 15.0167 | 6.638355 | 152769.671875 |
| 15.0167 | 6.653340 | -5027.290039 |
| 15.0167 | 6.668325 | 301371.437500 |
| 15.0167 | 6.683310 | 92941.875000 |
| 15.0167 | 6.698295 | -12004.548828 |
| 15.0167 | 6.713280 | -244549.671875 |

| Hora decimal | Rango/Km | Beta_raw / unitless |
|---------------------|-----------------|----------------------------|
| 15.0167 | 6.728265 | 264987.343750 |
| 15.0167 | 6.743250 | -54179.085938 |
| 15.0167 | 6.758235 | -124753.132812 |
| 15.0167 | 6.773220 | -68790.796875 |
| 15.0167 | 6.788205 | 413420.031250 |
| 15.0167 | 6.803190 | 139069.078125 |
| 15.0167 | 6.818175 | 35882.535156 |
| 15.0167 | 6.833160 | 23457.742188 |
| 15.0167 | 6.848145 | -115456.648438 |
| 15.0167 | 6.863130 | -293668.843750 |
| 15.0167 | 6.878115 | -101899.367188 |
| 15.0167 | 6.893100 | -259655.218750 |
| 15.0167 | 6.908085 | -32977.085938 |
| 15.0167 | 6.923070 | 70207.671875 |

Tabla 4.2: Almacenamiento de los datos numéricos de Beta_raw

La otra rutina nos permite visualizar en un mapa de color la señal recibida. Como el resto del programa, la filosofía ha sido totalmente general pudiendo elegir mediante un sistema sencillo de opciones tanto el día requerido como el intervalo de horas y el intervalo de altura, utilizado el anteriormente mencionado programa de dibujo GNUPlot. A continuación se muestran algunos eventos como ejemplo, para hacer más fácil una posible interpretación de las figuras aquí mostradas se van a acompañar de las fotos tomadas por la cámara de cielo SONA:

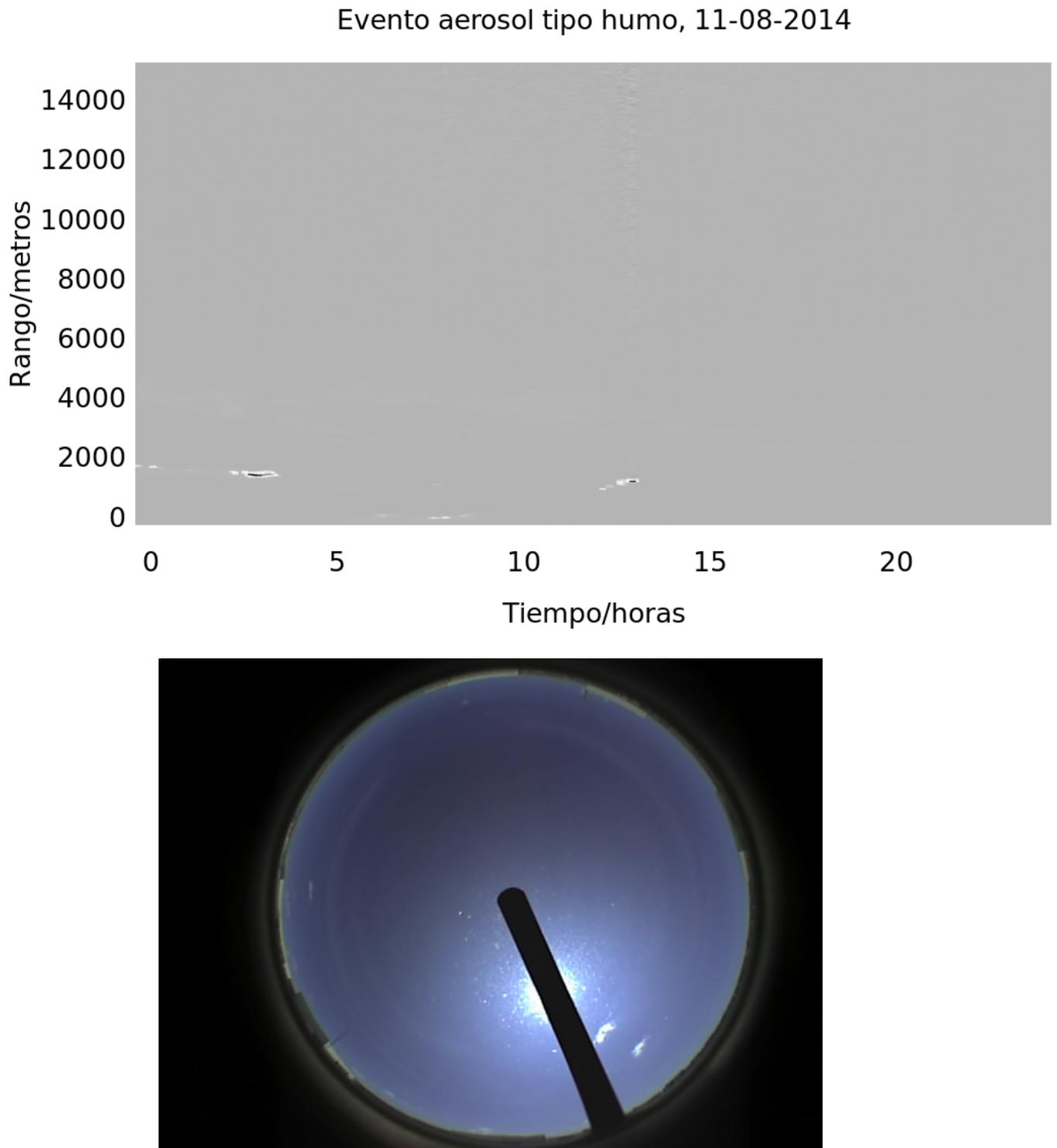


Figura 4.2: Comparación entre la señal medida el día 11/08/2014 por el ceilómetro con la imagen de la cámara de cielo.

Como podemos ver en la figura de arriba, al tratarse de un evento de aerosol se obtiene retrodispersión, pero no podemos apreciar nubosidad, y gracias a otros estudios hemos podido asociar con aerosol del tipo humo por combustión de biomasa.

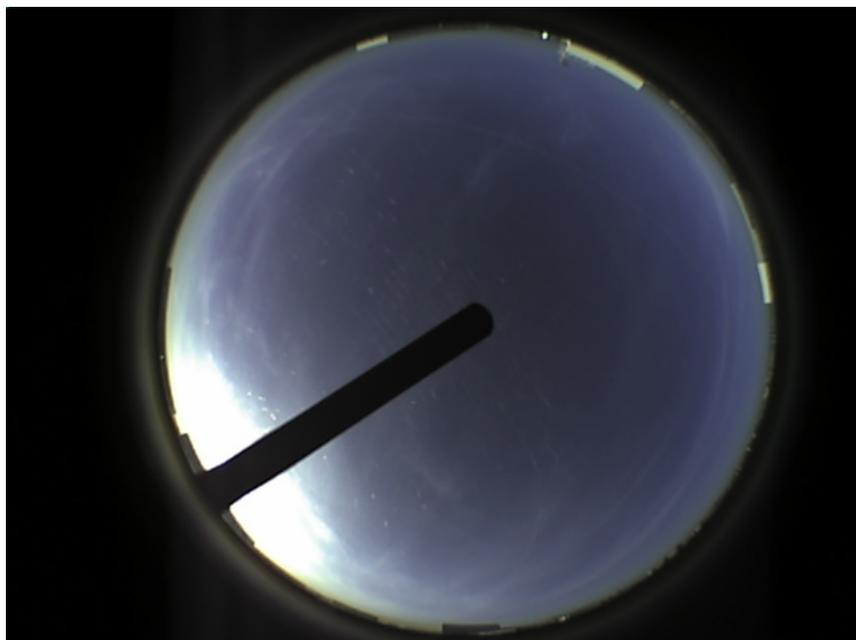
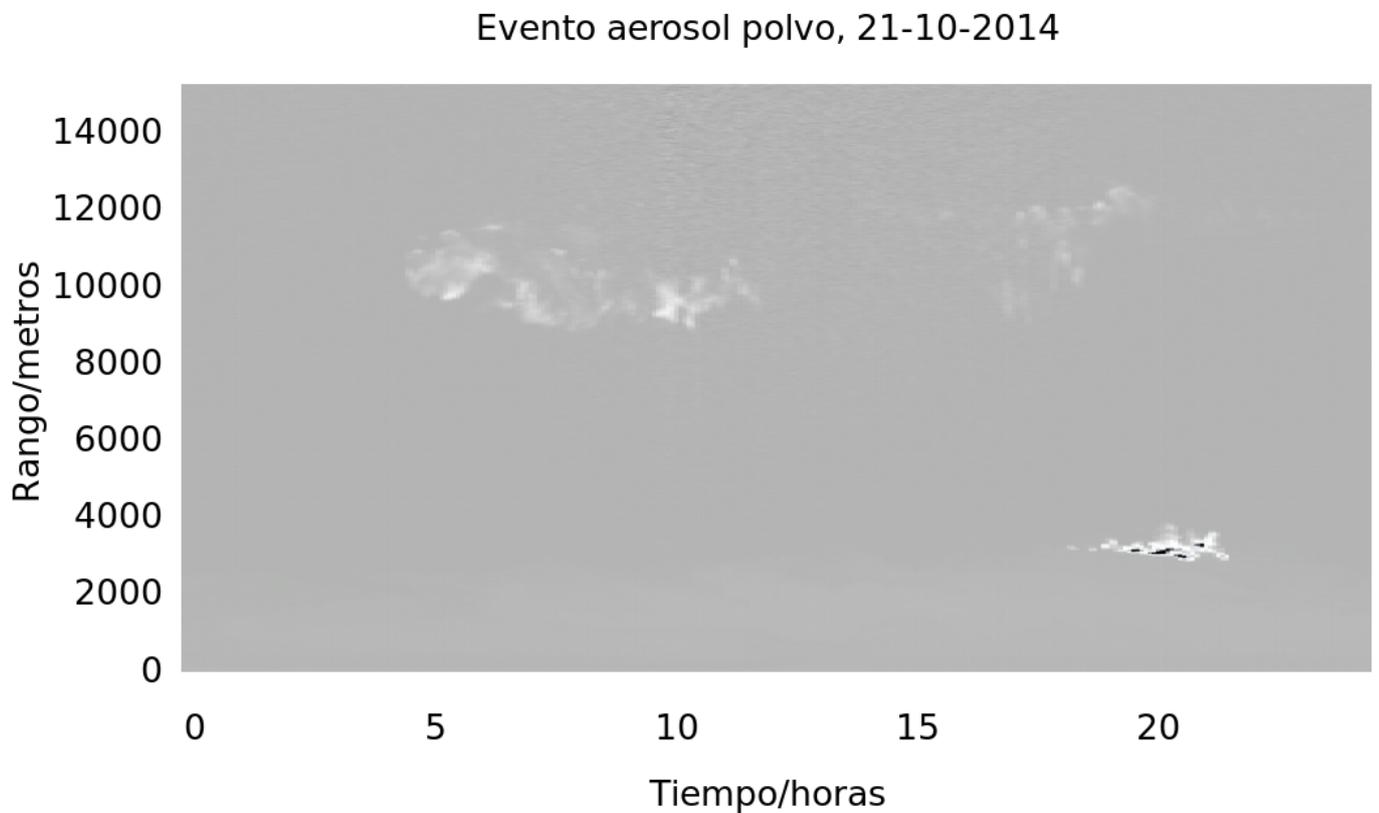


Figura 4.3: Comparación entre la señal medida el día 21/10/2014 por el ceilómetro con la imagen de la cámara de cielo.

Como en el caso anterior, en ninguna de las horas que la cámara muestra imágenes se encuentran nubes. Sin embargo en los datos del ceilómetro sí se aprecian valores altos de retrodispersión, que en este caso gracias a otros estudios se han identificado con aerosoles de tipo polvo mineral, procedente

del Sahara.

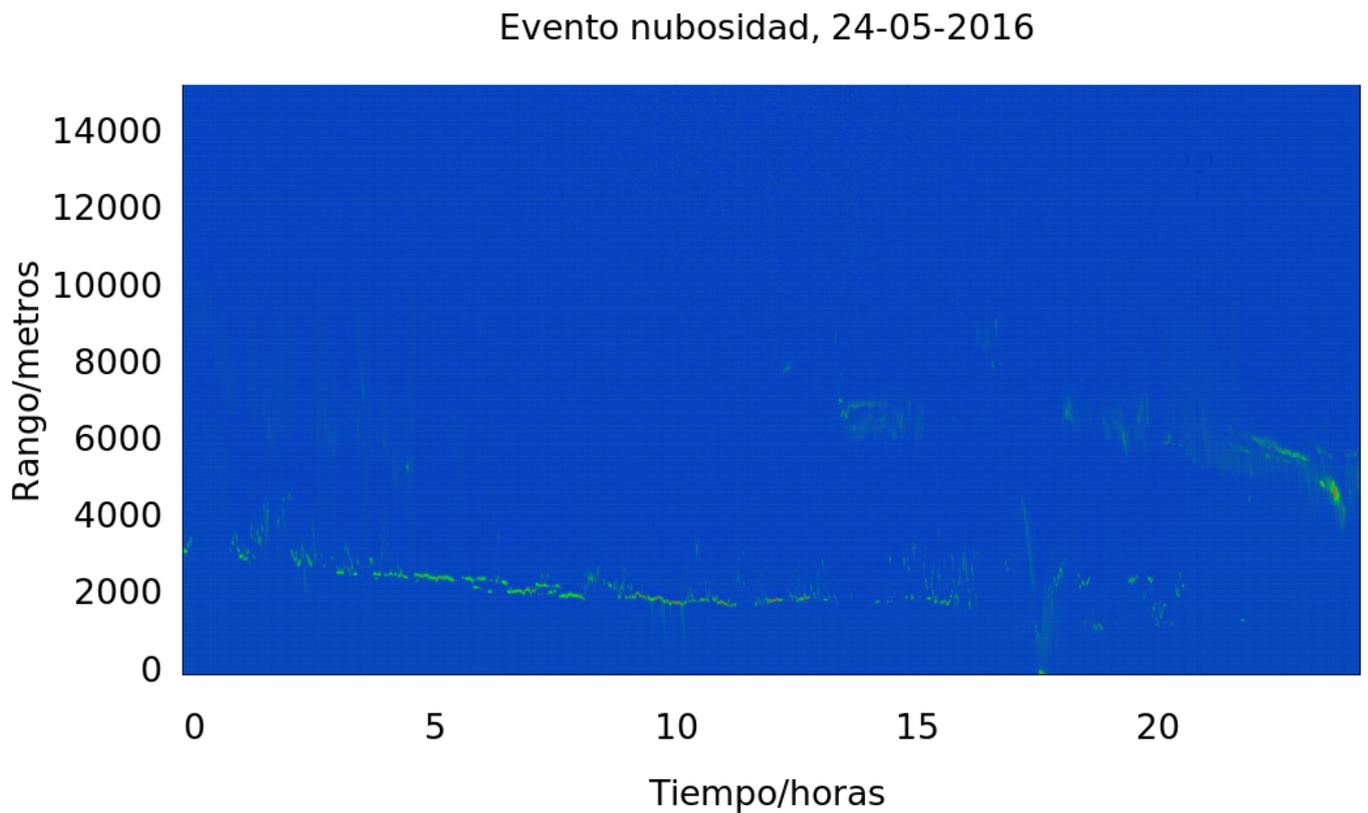


Figura 4.4: Comparación entre la señal medida el día 24/05/2016 por el ceilómetro con la imagen de la cámara de cielo.

Es interesante analizar este caso, por varios motivos, primero que las medidas han sido realizadas con la mayor resolución temporal posible, y de hecho a la vista de la figura, al haber representado una cantidad de datos tan grande se hace difícil su interpretación a simple vista, además de la necesidad evidente de realizar promedios temporales con el objetivo de eliminar el ruido y localizar mejor los eventos dentro de cada día. Además vemos cómo efectivamente los eventos de nubes que son para

los que originariamente se diseñaron estos aparatos se aprecian con mucha mayor nitidez que los de aerosol.

- **error_ext**: Esta variable recoge la salida de muchos posibles errores de distinta naturaleza que apartan al aparato de su correcto funcionamiento. Su valor de salida será un entero al cual le corresponderá un error diferente. Aquí están incluidos una gran variedad de errores entre los que podemos encontrar:

No poder encontrar el valor de la señal de retorno, error en la generación de los archivos NetCDF o los telegramas RS485, diferentes temperaturas de partes del aparato fuera del rango de lo deseable, problemas con el correcto funcionamiento de la óptica o el láser o errores en la electrónica de alimentación del aparato.

- **state_optics**: porcentaje que indica la calidad con la que está operando la óptica del ceilómetro, algoritmo del fabricante desconocido para el usuario. Nos encontramos con valores entorno al 70%-80% de media, obteniéndose valores más bajos, cercanos al 50% en los meses de verano e invierno, presumiblemente debido a las temperaturas más extremas de estas épocas.

- **temp_int**: expresa en kelvin*10 la temperatura del interior de la carcasa del aparato:

| Temperatura interior/kelvin*10 |
|--------------------------------|
| 2968 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2967 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2965 |
| 2965 |
| 2965 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2966 |
| 2965 |
| 2965 |
| 2965 |

Tabla 4.3: Ejemplo de salida para la variable temp_int

- temp_ext: expresa en kelvin*10 la temperatura del exterior de la carcasa del ceilómetro.

| Temperatura exterior/kelvin*10 |
|--------------------------------|
| 2870 |
| 2869 |
| 2868 |
| 2867 |
| 2867 |
| 2868 |
| 2868 |
| 2868 |
| 2869 |
| 2870 |
| 2872 |
| 2871 |
| 2870 |
| 2869 |
| 2869 |
| 2869 |
| 2868 |
| 2867 |
| 2867 |
| 2867 |
| 2868 |
| 2870 |
| 2870 |
| 2870 |
| 2869 |

Tabla 4.4: Ejemplo de salida para la variable temp_ext

- temp_det: expresa en kelvin*10 la temperatura del detector.

| Temperatura exterior/kelvin*10 |
|--------------------------------|
| 2981 |
| 2982 |
| 2981 |
| 2982 |
| 2981 |
| 2982 |
| 2982 |
| 2982 |
| 2982 |
| 2981 |
| 2982 |
| 2982 |
| 2981 |

Como hemos podido apreciar en todas las variables relacionadas con la medición de la temperatura de los distintos módulos del ceilómetro nos encontramos con un factor 10 de escala. Esto es debido a que la máxima precisión del termómetro del aparato es de 0,1K por lo que este factor de escala nos permite expresarlo como un entero, ahorrando un espacio de almacenamiento considerable.

- `life_time`: nos devuelve en horas el tiempo de operación del láser. A la hora de realizar esta memoria el láser llevaba operativo 20315 horas, lo que equivale a 846 días.
- `state_laser`: tanto por ciento que nos indica la calidad de operación del láser, algoritmo propio del fabricante, desconocido para el usuario. Valores típicos que se encuentran están sobre el 90%.
- `state_detector`: tanto por ciento que nos expresa la calidad de la señal recibida, valores típicos que se encuentran están sobre el 90%.
- `base`: valor de 'offset' de la señal de retrodispersión, normalmente se va a deber a la luz del día. Como vimos en el algoritmo para el cálculo de `beta_raw`, lo tenemos que descontar.

| base/(counts pershot) |
|------------------------------|
| 0.001263 |
| 0.001270 |
| 0.001276 |
| 0.001263 |
| 0.001279 |
| 0.001300 |
| 0.001334 |
| 0.001302 |
| 0.001208 |
| 0.001153 |
| 0.001203 |
| 0.001288 |
| 0.001321 |
| 0.001286 |
| 0.001364 |
| 0.001241 |
| 0.001208 |
| 0.001202 |
| 0.001289 |
| 0.001290 |
| 0.001256 |
| 0.001178 |
| 0.001089 |
| 0.001175 |
| 0.001242 |
| 0.001156 |
| 0.001157 |
| 0.001140 |
| 0.001249 |
| 0.001318 |
| 0.001266 |
| 0.001267 |

Tabla 4.7: Ejemplo de salida para la variable base

- **stddev**: desviación estándar de la señal en fotones por segundo.

| stddev/(counts pershot) |
|--------------------------------|
| 0.000123 |
| 0.000130 |
| 0.000131 |
| 0.000131 |
| 0.000137 |
| 0.000121 |
| 0.000117 |
| 0.000130 |
| 0.000133 |
| 0.000131 |
| 0.000135 |
| 0.000132 |
| 0.000128 |
| 0.000131 |
| 0.000120 |
| 0.000132 |
| 0.000136 |
| 0.000133 |
| 0.000136 |
| 0.000130 |
| 0.000129 |
| 0.000122 |
| 0.000119 |
| 0.000129 |
| 0.000131 |
| 0.000125 |
| 0.000125 |
| 0.000130 |
| 0.000132 |
| 0.000123 |
| 0.000131 |
| 0.000131 |

Tabla 4.8: Ejemplo de salida para la variable stddev

- **p_calc**: pulso de calibración utilizado para la normalización de la señal a lo largo del tiempo.

| p_calc/(counts pershot) |
|--------------------------------|
| 7870 |
| 7880 |
| 7959 |
| 8012 |

| p_calc /(counts pershot) |
|---------------------------------|
| 7944 |
| 8169 |
| 8365 |
| 8234 |
| 7632 |
| 7405 |
| 7666 |
| 8208 |
| 8366 |
| 8226 |
| 8518 |
| 7933 |
| 7829 |
| 7687 |
| 8166 |
| 8232 |
| 7999 |
| 7686 |
| 7152 |
| 7595 |
| 7853 |
| 7496 |
| 7546 |
| 7402 |
| 7901 |
| 8215 |
| 7927 |
| 8079 |

Tabla 4.9: Ejemplo de salida para la variable p_calc

- scaling: factor de escala usado para la normalización de unidades con el sistema de referencia, llamado TBcalibration. Se encontró un valor de 0.296468.
- PBL: expresa en metros la altura de la capa de aerosol dentro de los límites de la Planetary Boundary Layer. Matriz con dimensiones de tiempo para el eje 'x' y de layer para el eje 'y'. Se calcula mediante un algoritmo del fabricante que permanece desconocido para el usuario.

| PBL Layer 1 /metros | PBL Layer 2 /metros | PBL Layer 3 /metros |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 884 | 1439 | 2008 |
| 884 | 1439 | 2008 |
| 884 | 1424 | 2008 |
| 884 | 1424 | 2008 |
| 884 | 1409 | 2008 |
| 884 | 1409 | 2008 |
| 884 | 1394 | 2023 |
| 884 | 1394 | -1 |
| 884 | 1394 | 1918 |

| PBL Layer 1 /metros | PBL Layer 2 /metros | PBL Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 899 | 1394 | -1 |
| 899 | 1394 | -1 |
| 899 | 1394 | -1 |
| 899 | 1394 | 1903 |
| 899 | 1394 | 1903 |
| 914 | 1394 | 1903 |
| 914 | -1 | -1 |
| 914 | 1888 | -1 |
| 914 | -1 | -1 |
| 929 | -1 | -1 |
| 929 | -1 | -1 |
| 944 | -1 | -1 |
| 944 | -1 | -1 |
| 944 | 1888 | -1 |
| 944 | 1888 | -1 |
| 959 | 1888 | -1 |
| 959 | 1903 | -1 |
| 959 | 1918 | -1 |
| 959 | 1933 | -1 |
| 959 | 1933 | -1 |
| 974 | 1933 | -1 |

Tabla 4.10: Ejemplo salida PBL, día 24/05/2016

• PBS: matriz con dimensiones de tiempo para el eje 'x' y de layer para el eje 'y', la cual mediante un algoritmo del fabricante que permanece desconocido para el usuario, nos ofrece un indicativo de la calidad de la detección de las capas de aerosol detectadas. La polución originada en fuentes cercanas al suelo tiene un nivel de distribución en altura que depende fuertemente de las condiciones atmosféricas y meteorológicas locales, por lo que la identificación de la capas de aerosol también estará influida en gran medida por las condiciones locales. Los valores que nos proporcionará este producto tienen el siguiente significado:

| Q-index | Descripción |
|---------|--|
| -1 | No se encuentra suficiente señal para el cálculo |
| -2 | Fallo de hardware o el sistema no se encuentra operativo |
| -3 | El algoritmo no ha podido generar ningún valor |
| 0 | No se detectó capa de aerosol |
| 1 | Se pudo detectar capa de aerosol pero tiene un nivel de incertidumbre elevado |
| 9 | Se pudo detectar capa de aerosol con una alta precisión, por debajo de los 50 metros |

Tabla 4.11: Información sobre la calidad del cálculo de las capas de aerosol

• SCI: el Sky Condition Index es una variable que nos proporciona información extra sobre las condiciones meteorológicas del aparato, siendo sus posibles salidas:

| Valor | Descripción |
|---------|---|
| -2 | Fallo de hardware o el sistema no se encuentra operativo |
| 00 | Cielo despejado |
| 01 | Lluvia |
| 02 | Niebla, las nubes no pueden ser detectadas |
| 03 | Nieve o granizo. |
| -1 o -3 | Las nubes no pueden ser detectadas por razones externas a las meteorológicas. |

Tabla 4.12: Resumen de las posibles salidas de SCI

- BCC: expresa en oktas la cobertura de la base de las nubes.
- TCC: expresa en oktas la cobertura total de las nubes.

Estos dos últimos productos tienen como salida el número de oktas correspondiente de tal manera que, podemos encontrar los siguientes valores:

| oktas | Descripción |
|-------------|---|
| -2 | Fallo de hardware o el sistema no se encuentra operativo |
| 0 | Cielo despejado |
| entre 1 y 8 | Oktas, nos indica un valor de cobertura entre 1/8 y 8/8 |
| 9 | Cielo oscurecido por la niebla u otros fenómenos meteorológicos. |
| -1 o -3 | Las nubes no pueden ser detectadas por razones externas a las meteorológicas. |

Tabla 4.13: Salida de BCC y TCC

- CBH: junto con beta_raw es uno de los principales productos de nuestro ceilómetro. Nos encontramos con una matriz de dimensiones 'time' y 'layer', la cual nos proporcionará en metros la altura de la base de las nubes, encontrando el valor de '-1' en los casos en los que no se detectó ningún tipo de nubosidad. Es una de las variables que se utiliza para determinar el tamaño de la 'dimensión layer'. En el transcurso de casi tres años, en más de un 90% de las veces se obtuvieron dos o menos valores, por lo que la dimensión tres elegida es más que aceptable.

| CBH Layer 1 /metros | CBH Layer 2 /metros | CBH Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| 9396 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| 11763 | -1 | -1 |
| 9725 | 11075 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| 11973 | -1 | -1 |
| 12003 | -1 | -1 |

| CBH Layer 1 /metros | CBH Layer 2 /metros | CBH Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 11793 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| 11643 | -1 | -1 |
| 10040 | -1 | -1 |
| 10744 | -1 | -1 |
| 11134 | -1 | -1 |
| 10594 | 11898 | -1 |
| 11658 | -1 | -1 |
| 10144 | 11614 | -1 |
| 10064 | -1 | -1 |
| 12083 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |
| 3232 | 11660 | 12066 |
| 11668 | -1 | -1 |
| 11729 | 12031 | -1 |
| 3279 | 11857 | -1 |
| 11943 | 12369 | -1 |
| 3295 | 12295 | -1 |
| 12168 | -1 | -1 |
| 3216 | 11973 | -1 |

Tabla 4.14: Ejemplo salida CBH, día 24/05/2016

- CBE: este producto nos ofrece el valor de la incertidumbre en metros en el cálculo de la altura de la base de las nubes.

| CBE Layer 1 /metros | CBE Layer 2 /metros | CBE Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 207 | -1 | -1 |
| 200 | -1 | -1 |
| 199 | -1 | -1 |
| 204 | -1 | -1 |
| 207 | -1 | -1 |
| 1825 | -1 | -1 |
| 1827 | -1 | -1 |
| 1828 | -1 | -1 |
| 1826 | -1 | -1 |
| 1829 | -1 | -1 |
| 1832 | -1 | -1 |
| 1832 | -1 | -1 |
| 1831 | -1 | -1 |
| 1830 | -1 | -1 |
| 1830 | -1 | -1 |
| 1828 | -1 | -1 |
| 280 | -1 | -1 |
| 289 | -1 | -1 |
| 303 | -1 | -1 |
| 319 | -1 | -1 |
| 337 | -1 | -1 |

| CBE Layer 1 /metros | CBE Layer 2 /metros | CBE Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 396 | -1 | -1 |
| 440 | -1 | -1 |
| 478 | 3511 | -1 |
| 454 | 3434 | -1 |
| 436 | 3396 | -1 |
| 430 | 3372 | -1 |
| 423 | 3375 | -1 |
| 421 | 3366 | -1 |
| 399 | 3372 | -1 |
| 352 | 3363 | -1 |

Tabla 4.15: Ejemplo salida CBE, día 24/05/2016

- CDP: expresa en metros el valor de la distancia de la penetración de las nubes, Cloud Penetration Depth.

| CDP Layer 1 /metros | CDP Layer 2 /metros | CDP Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 284 | -1 | -1 |
| 289 | -1 | -1 |
| 1843 | -1 | -1 |
| 1833 | -1 | -1 |
| 1819 | -1 | -1 |
| 1806 | -1 | -1 |
| 1789 | -1 | -1 |
| 1735 | -1 | -1 |
| 1855 | -1 | -1 |
| 1824 | 77 | -1 |
| 1916 | 88 | -1 |
| 2304 | 101 | -1 |
| 2370 | 112 | -1 |
| 2392 | 116 | -1 |
| 2405 | 115 | -1 |
| 2468 | 116 | -1 |
| 2513 | 119 | -1 |
| 2556 | 116 | -1 |
| 2569 | 113 | -1 |
| 2583 | 113 | -1 |
| 2599 | 115 | -1 |
| 2609 | 116 | -1 |
| 2623 | 118 | -1 |
| 2640 | 96 | -1 |
| 2652 | 58 | -1 |
| 2627 | -1 | -1 |
| 2632 | -1 | -1 |
| 2624 | -1 | -1 |
| 2547 | -1 | -1 |

Tabla 4.16: Ejemplo salida CDP, día 24/05/2016

- CDE: proporciona el valor de la incertidumbre en metros del cálculo de la distancia de penetración de las nubes.

| CDE Layer 1 /metros | CDE Layer 2 /metros | CDE Layer 3 /metros |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 205 | -1 | -1 |
| 484 | -1 | -1 |
| 882 | -1 | -1 |
| 886 | -1 | -1 |
| 1467 | -1 | -1 |
| 1465 | -1 | -1 |
| 1303 | -1 | -1 |
| 1284 | 150 | -1 |
| 1197 | 151 | -1 |
| 821 | 149 | -1 |
| 764 | 146 | -1 |
| 753 | 146 | -1 |
| 745 | 148 | -1 |
| 703 | 151 | -1 |
| 696 | 146 | -1 |
| 690 | 146 | -1 |
| 699 | 154 | -1 |
| 707 | 160 | -1 |
| 729 | 183 | -1 |
| 704 | 157 | -1 |
| 690 | 147 | -1 |
| 694 | 161 | -1 |
| 710 | 194 | -1 |
| 726 | -1 | -1 |
| 728 | -1 | -1 |

Tabla 4.17: Ejemplo salida CDE, día 24/05/2016

- MXD: en metros, devuelve el rango máximo de detección del aparato. Corresponde a la máxima distancia a la cual señales significativas pueden ser medidas. Se calcula mediante una relación promediada de señal/ruido. Por encima de la Planetary Boundry Layer la única señal apreciable es la proveniente de las nubes. En presencia de éstas, el máximo rango de validez se calcula a partir de la distancia de penetración de la última capa de nubes detectada.

Este algoritmo en función de los resultados de los productos anteriores puede presentar varios valores distintos: 3506, 3536, 3521, 3566, 9695 o 10325 m.

- VOR: nos ofrece en metros el rango óptico vertical. En todos los archivos leídos hasta el momento se encuentra el valor de '-1'.

- VOE: expresa en metros la incertidumbre en el cálculo del rango óptico vertical. En todos los archivos leídos hasta el momento se encuentra el valor de '0'.

- CHO: expresa en metros el 'offset' de la base de la altura de las nubes, es decir la altitud del aparato respecto el nivel del mar. En este caso esta variable no está configurada, pero podemos utilizar de manera totalmente análoga la variable 'altitude'.

4.3. Código desarrollado en este trabajo

Uno de los principales objetivos de este trabajo ha sido hacer un tratamiento específico de los datos de retrodispersión de nuestro ceilómetro, de tal manera que tengan la forma adecuada para su posterior inclusión como una de las entradas en el algoritmo GRASP, donde se llevará a cabo su correspondiente inversión para obtener información del aerosol contenido en la atmósfera, además de permitir su inclusión en la base de datos principal de GOA-UVa llamada CÆLIS.

4.3.1. CÆLIS

La base de datos CÆLIS surge de la necesidad de controlar, mantener y explotar una red de sensores fotométricos, así como radiómetros, lidar, ceilómetros, etc. El software CÆLIS fue desarrollado para ordenar el proceso de recolección, almacenamiento, y explotación de datos y modelos. Dicho sistema de gestión pretende tres objetivos:

- La gestión de la información generada por la red (base de datos y metadatos).
- Ayudar al mantenimiento de la red, lo que incluye un sistema de alarmas en tiempo real que advierte a los gestores y a los responsables locales de las estaciones sobre problemas en el funcionamiento de los instrumentos.
- Facilitar las tareas de investigación al GOA-UVa y a los usuarios de la red, mediante la elaboración de productos que pueden ser consultados de manera flexible y potente.

CÆLIS es la plataforma informática desarrollada para conseguir estos objetivos. Este software se puede dividir en tres elementos fundamentales: una base de datos, un conjunto de rutinas para procesar la información y una interfaz web para ofrecer los datos a los usuarios. La base de datos almacena de manera ordenada tanto los datos adquiridos y la meta-información como los resultados procesados. El conjunto de rutinas y programas para manipular la información contenida en la base de datos es modular, y por tanto permite con facilidad añadir nuevos procesos de transformación de la información.

En esta trabajo se pretende incorporar al sistema CÆLIS nuevos módulos, correspondientes a los distintos productos del ceilómetro descritos anteriormente, así como los datos procesados para el algoritmo GRASP.

4.3.2. GRASP

GRASP es un acrónimo que corresponde a la siglas 'Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties'. Es el primer algoritmo unificado para la caracterización de propiedades atmosféricas a través de una gran variedad de observaciones (satélite, laboratorio, distintos instrumentos situados en tierra, etc.), y está basado en la generalización de varios principios con la idea de desarrollar un algoritmo accesible, versátil, eficiente, transparente y científicamente riguroso.

Además de las distintas medidas fotométricas y de AOD que ya se encuentran implementadas en CÆLIS, este trabajo ha contribuido a la implementación de las medidas del ceilómetro para añadir información adicional y así mejorar la inversión de las propiedades ópticas y microfísicas del aerosol.

4.3.3. Procesamiento

El proceso seguido para ello se ha basado en el procedimiento proporcionado por el propio grupo GRASP, recogido en el documento llamado 'Lidar measurement processing for GARRLiC/GRASP input'. Pese a que esta rutina está específicamente diseñada para el tratamiento de datos obtenidos con un aparato Lidar, se hace un tratamiento totalmente independiente para cada longitud de onda por lo que la adaptación a las medidas del ceilómetro es totalmente inmediata.

Primer paso.

Para empezar, necesitamos partir de una señal en la que se ha eliminado el fondo y corregida en rango. Por otro lado las pertinentes correcciones en el medida del número de fotones, el ruido

eléctrico, la función de solapamiento o el 'tiempo muerto' entre fotones deben ser tenidas en cuenta. Por suerte nuestro producto β_{raw} es exactamente lo que necesitamos puesto que el fabricante ya ha aplicado estas correcciones al valor crudo de la señal medida. Si recordamos como era el algoritmo de cálculo para esta variable:

$$\beta_{raw} = ((\text{signal}_{raw} / lp) - b) / (c * o(r) * p_{calc}) * r^2$$

Segundo paso.

Hay que establecer unos límites tanto inferior como superior en las alturas con las que se va a trabajar, siendo preferible excluir la zona donde la función de solapamiento no se puede aplicar correctamente, y un límite superior donde la relación señal/ruido comentada anteriormente sea también aceptable pero donde también se puedan encontrar unas cantidades de aerosol significativas.

Bajo estas consideraciones la selección de alturas que se hizo es de un límite inferior fijado en 250 metros y un límite superior en 8000 metros.

Tercer paso.

Con el objetivo de un posterior correcto almacenamiento en la base de datos, se optó por dividir cada día en intervalos de cinco minutos en los que se realiza un promedio aritmético de la señal, lo que también nos ayudará a eliminar en gran medida ruido no deseable de nuestras medidas. Esto significa que tendremos 288 perfiles diarios.

Cuarto paso.

Reducir el número de puntos en cada perfil (suavizado vertical). Se realizan promedios logarítmicos dentro del intervalo de altura seleccionado. Para ello se han seleccionado 60 puntos, equiespaciados logarítmicamente en altura entre los que se dividirá dicho intervalo.

Para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Transformamos nuestras alturas a una escala logarítmica:

$$z_i^{log} = \log(z_i) \quad (4.1)$$

Donde hay que seleccionar las alturas dentro de nuestro rango. Hay que prestar atención en este punto puesto que aquí lo que se necesita es la altura de los puntos seleccionados y hasta ahora hemos estado trabajando únicamente con el rango, por lo que habrá que sumar a todos los valores del rango la altura sobre el nivel del mar a la que el aparato se encuentra midiendo, en nuestro caso 705 metros.

- Calculamos el paso logarítmico:

$$\Delta z = \frac{z_{max}^{log} - z_{min}^{log}}{N_z} \quad (4.2)$$

Donde N_z es el número de puntos en los que hemos dividido el intervalo, es decir 60.

- Calculamos el vector de alturas logarítmicamente equiespaciadas:

$$h_k = z_0^{log} + (k - 1) * \Delta z \quad (4.3)$$

Con $k=1 \dots N_z$.

- Promediamos todos los perfiles dentro de nuestros intervalos de altura:

$$A_k = \frac{\sum_{j=1}^n A_j(h_k, h_{k+1})}{n} \quad (4.4)$$

Donde:

- A_k es nuestra señal ya promediada dentro de cada intervalo de altura.

-n es el número de puntos dentro de cada intervalo de altura, teniendo en cuenta que en nuestro caso nos encontramos con un punto cada 15 metros.

Siguiendo estos pasos hemos conseguido un promedio de la señal equiespaciado logarítmicamente dividido en 60 puntos.

¡Atención! El promediado temporal debe realizarse **siempre** antes del correspondiente en rango. Puede demostrarse matemáticamente que el procedimiento inverso no lleva a los mismo resultados y que de hecho no nos ofrece un resultado aceptable.

Otra consideración que debe ser tenida en cuenta es que una vez que tenemos calculado el vector de alturas logarítmicamente equiespaciado, debemos dar un paso más, ya que este vector únicamente nos marca los límites superiores de cada intervalo en el cual promediamos la señal. Un valor más representativo de la altura del intervalo será la media aritmética de las alturas contenidas en cada intervalo, que es el procedimiento que aquí se ha elegido.

Por ello el producto final será una matriz cuya columna 'x' corresponde a el vector de alturas ya promediado y una columna 'y' con los valores correspondientes de ' A_k '.

Comparación de resultados

Con el objetivo de comprobar que el código realizado es correcto y ofrece los resultados esperados, se han hecho dos gráficas comparativas correspondientes a los días de eventos de aerosol con los que hemos estado trabajando hasta ahora. Las gráficas que aquí se presentan en rojo son las correspondientes a los puntos calculados por un software de la propia empresa GRASP, y las gráficas de color grisáceo son los resultados para esos días con el programa desarrollado:

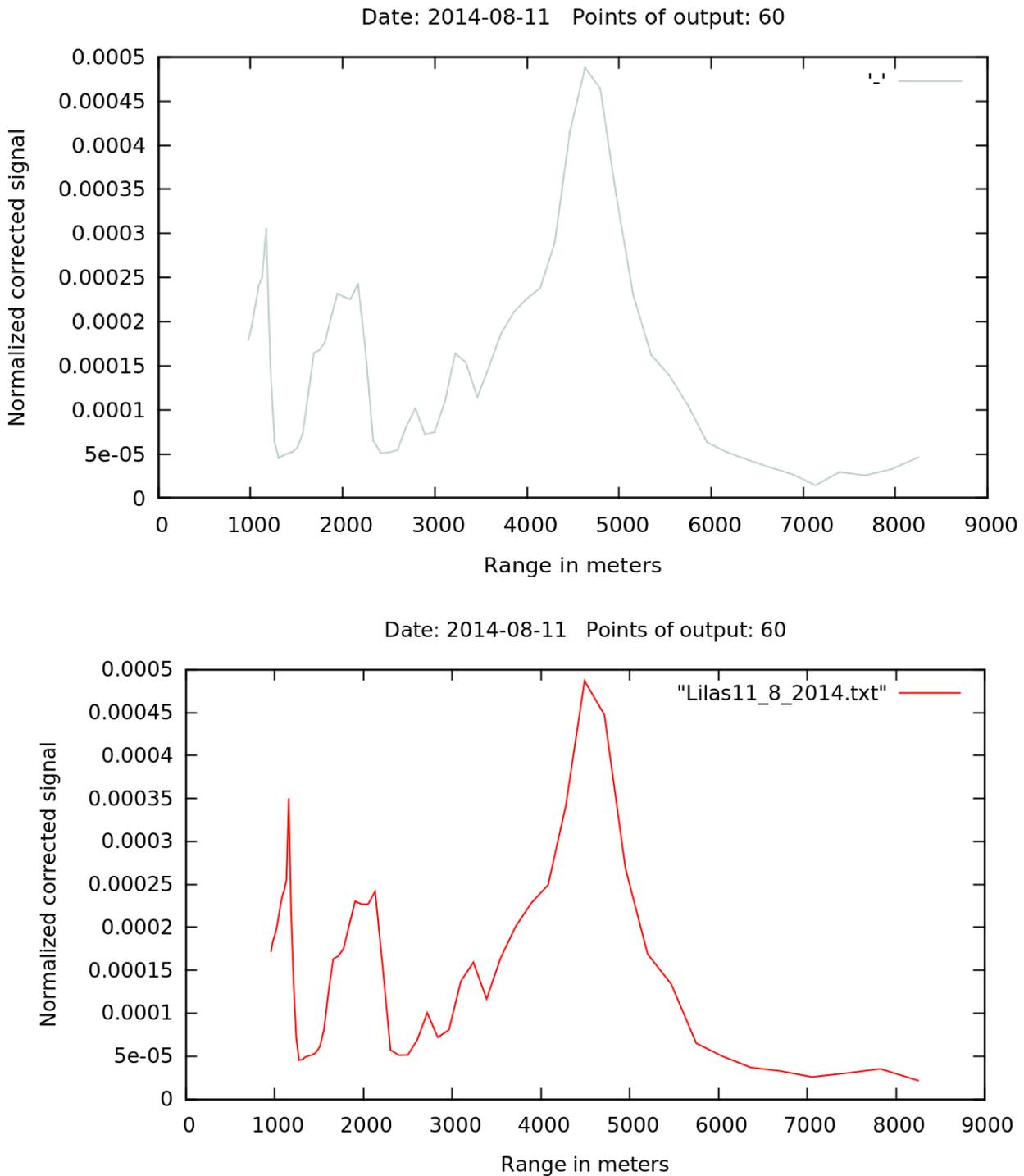


Figura 4.5: Comparación entre promedios el día 11/08/2014 para GRASP.

Y para el otro evento:

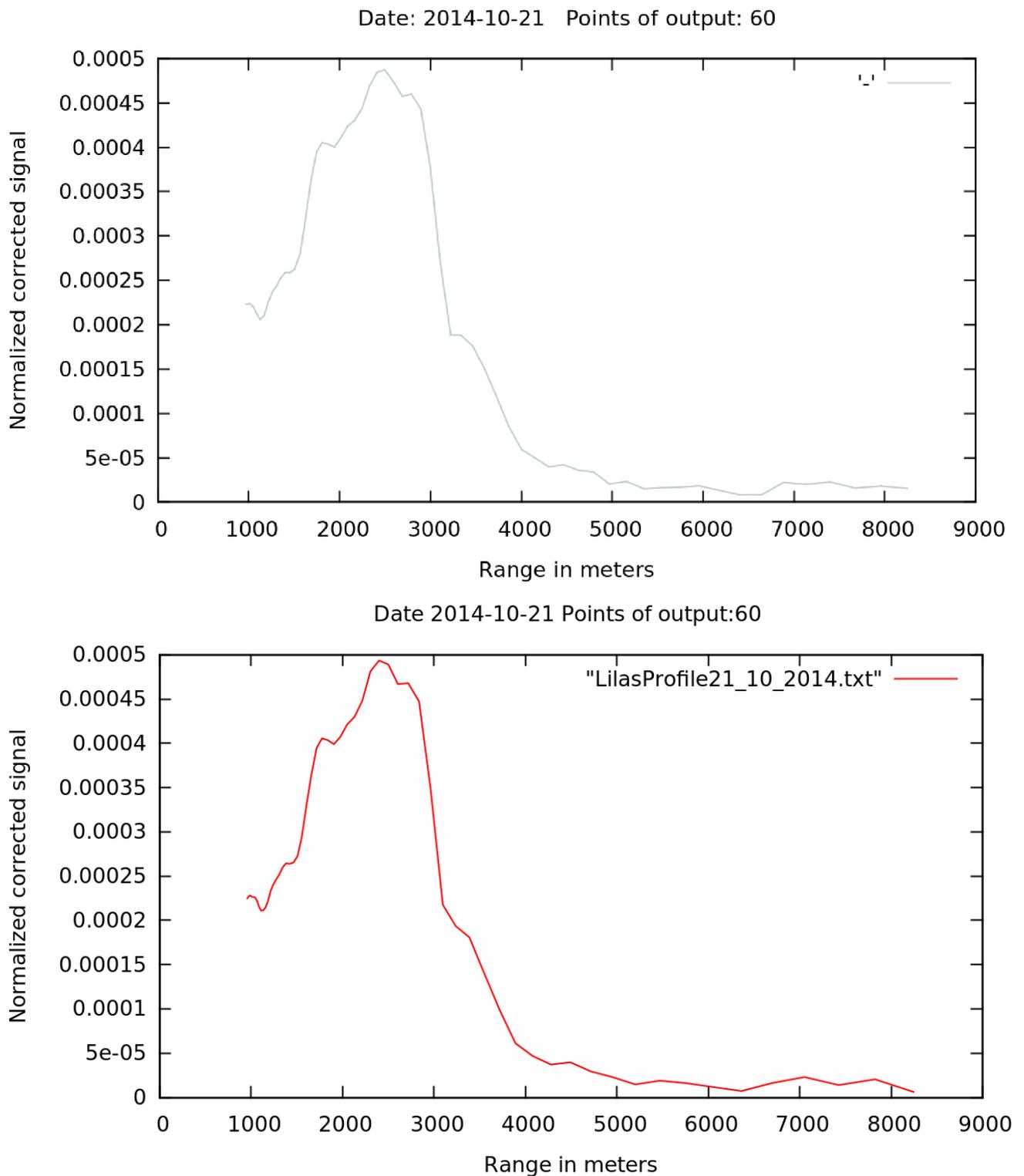


Figura 4.6: Comparación entre promedios el día 21/10/2014 para GRASP.

Por la gran similitud que presentan ambas gráficas podemos asegurar que el programa de promediado logarítmico que se ha realizado es correcto, ofreciendo los resultados deseados para su posterior utilización en las tareas de investigación del GOA-UVa.

Puntos extra

Pese a que para el algoritmo GRASP sólo son válidos los puntos calculados con el método que se acaba de describir, con el objetivo de aportar información complementaria que ayude a la posterior interpretación de resultados (por ejemplo la presencia de nubes altas como cirros) se ha incluido un conjunto de puntos extra en cada perfil correspondientes al intervalo de alturas desde los 8000 a los 12000 metros. De tal manera que se calculan 20 puntos espaciados y promediados aritméticamente en este caso. En total cada perfil contará con 80 puntos, 60 equiespaciados logarítmicamente, y 20 aritméticos para las alturas superiores, en un intervalo completo de alturas que cubre desde los 500 a los 12000 metros.

Conclusiones

En este trabajo se han expuesto todos los procesos correspondientes al uso de los ceilómetros, así como el tratamiento de los datos proporcionados por el ceilómetro Jenoptik CHM 15k Nimbus. Mediante el software desarrollado se han tratado los datos de manera adecuada, dentro del período de tiempo desde 2014 a la actualidad, de manera que están en el último paso para su incorporación en la base de datos CÆLIS y el algoritmo GRASP. Se ha podido adquirir una buena comprensión de todo el proceso de obtención de productos atmosféricos relacionados con este tipo de aparatos, incluyendo tanto su fundamentación física como el procedimiento experimental.

También hay que destacar la necesidad de guardar junto con los datos la meta-información asociada que indica la calidad de las medidas y las condiciones de observación, ya que son esenciales para su uso posterior en el algoritmo GRASP. Esto se realizará mediante consultas a la base de datos, que seleccionarán dentro de un período de tiempo determinado aquellas medidas que cumplan con una serie de requisitos, como ausencia de nubosidad, correcta limpieza de la óptica, etc.

Finalmente se ha abierto la puerta a la inclusión de otros tipos de ceilómetros. Actualmente se está empezando a trabajar en el tratamiento de la señal de un ceilómetro Vaisala CL-51, cuya salida seguirá los mismos pasos que los expuestos aquí para el Jenoptik. Estos dos son los modelos de ceilómetro más modernos y que pueden ser utilizados para obtener propiedades de los aerosoles, sobre todo en combinación con las medidas de fotómetros solares.

Bibliografía

- [1] ANTHONY BUCHOLTZ, *Rayleigh calculations for the terrestrial atmosphere*.
- [2] BRAULIO GARCÍA-CAMARA, *On light scattering by nanoparticles with conventional and non-conventional optical properties* Santander, Julio 2010.
- [3] THOMAS WRIEDT, *Mie Theory: A Review*.
- [4] SPINHIRNE, REAGAN AND HERMAN, *Vertical Distribution of Aerosol Extinction Cross Section and Interference of Aerosol Imaginary Index in the Troposphere by Lidar Technique*. Institute of Atmospheric Physics, The university of Arizona, Diciembre 1979.
- [5] FREDERICK G: FERNALD, *Analysis of atmospheric lidar observations: some comments*. University of Denver, Octubre 1983.
- [6] McCORMICK, LAWRENCE AND CROWNFIELD, *Mie Total and Differential Backscattering Cross Sections at Laser Wavelengths for Junge Aerosol Models*. NASA Langley Research Station, July 1968.
- [7] QIU JINHUA, *Sensitivity of Lidar equation solution to boundary values and determination of the values*. Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing, October 1986.
- [8] COVA, S. ET ALI, *Avalanche photodiodes for near infrared photon-counting*. 1995.
- [9] JINGBIN ZHANG AND HUANLING HU, *Lidar calibration: a new method*. Febrero 1997.
- [10] F: NAVAS-GUZMAN, J.L. GUERRERO RASCADO, J.A. BRAVO-ARANDA, L. ALADOS-ARBOLEDAS, *Calibration of 1064 nm-Backscatter profiles with a multiwavelength Raman Lidar*. Department of Applied Physics, University of Granada, Noviembre 2009.
- [11] VANESSA SHERLOCK, ALAIN HAUCHECORNE, AND JACQUELINE LENOBLE, *Methodology for the independent calibration of Raman backscatter water-vapor lidar systems*. Septiembre 1999.
- [12] 5ecu ANA MARÍA DÍAZ RODRÍGUEZ, *Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias*. Universidad de la Laguna, 2005.
- [13] JORDI RIU, MICHAEL SICARD, SANTIAGO ROYO AND ADOLFO COMERÓN, *Silicon photomultiplier detector for atmospheric lidar applications*. Universidad politécnica de Cataluña, Marzo 2012.
- [14] SONGYAN JIN, *Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura*. Universidad de Salamanca, Junio de 2010.
- [15] F. ROCADENBOSCH, M. SICARD, A. COMERÓN, A. RODRÍGUEZ, C. MUÑOZ, M.A. LÓPEZ, D. GARCÍA, R. AGISHEV, *Remote sensing mediante Lidar en la UPC*. Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones (TSC), UPC, 1999.
- [16] *GPhotomultiplier tubes and Related products*. Hamamatsu Photonics K.K.

- [17] DHIRAJ KUMAR, FRANCESC ROCADENBOSCH, MICHAEL SICARD, ADOLFO COMERÓN, CONSTANTINO MUÑOZ, DIEGO LANGE, SERGIO TOMÁS, EDUARD GREGORIO, *Six-channel polychromator design and implementation for the UPC elastic/Raman LIDAR*. Univerisdad politécnica de Cataluña, 2011.
- [18] D. N. WHITEMAN, S. H. MELFI, AND R. A. FERRARE, *Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere*. Laboratory for Terrestrial Physics, NASA, 1992.
- [19] JUAN LUIS GUERRERO RASCADO, *Técnica Lidar para la caracterización atmosférica mediante dispersión elástica y Raman*. Grupo Física de la atmósfera, universidad de Granada, 2009.
- [20] SARA SEGURA REDÓN, *Caracterización In-situ de las propiedades espectrales de absorción de los aerosoles atmosféricos en Valencia*. Universidad de Valencia, 2015.
- [21] M. WIEGNER, F. MADONNA, I. BINIETOGLU, R. FORKEL, J. GASTEIGER, A. GEIVAL, G. PAPPALARDO, K. SCHAFER, AND W. THOMAS, *What is the benefit of ceilometers for aerosol remote sensing? An answer from EARLINET*. Mayo 2014.
- [22] ULRICH SCHUMANN, *Atmospheric Physics Background Methods Trends*. Springer, Institut forr Physik der Atmosphere, 2012.
- [23] M. COSTA-SURÓS, J. CALBÓ, J.A. GONZÁLEZ, J. MARTIN-VIDE, *Behavior of cloud base height from ceilometer measurements*. Group of Environmental Physics, Physics Department, University of Girona (Spain) Group of Climatology, Department of Physical Geography, University of Barcelona (Spain), Febrero 2013.
- [24] M. WIEGNER AND A. GEIÄ, *Aerosol profiling with the Jenoptik ceilometer CHM15kx*. Ludwig-Maximilians-Universitat, Meteorologisches Institut, Theresienstralle 37, 80333 Munich, Germany, Agosto 2012.
- [25] M. COSTA-SURÓS, J. CALBÓ , J.A. GONZÁLEZ , J. MARTIN-VIDE, *Behavior of cloud base height from ceilometer measurements*. Group of Environmental Physics, Physics Department, University of Girona, Spain Group of Climatology, Department of Physical Geography, University of Barcelona, Spain, Febrero 2013.
- [26] W. THOMAS, DEUTSCHER WETTERDIENST, *Transitioning to operations: Lidars and Ceilometers*. Hohenpeissenberg Meteorological Observatory, 2012.
- [27] R.R. ROGERS, M.F. LAMOUREUX, L.R. BISSONNETTE, R.M. PETERS, *Quantitative Interpretation of Laser Ceilometer Intensity Profiles*. Atmospheric and Oceanic Sciences, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, Octubre 1996.
- [28] G. TSAKNAKIS, A. PAPAYANNIS, P. KOKKALIS, V. AMIRIDIS, H. D. KAMBEZIDIS, R. E. MAMOURI, G. GEORGOUSSIS, AND G. AVDIKOS, *Inter-comparison of lidar and ceilometer retrievals for aerosol and Planetary Boundary Layer profiling over Athens, Greece*. 1Laser Remote Sensing Unit, Department of Physics, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9, Zografou Campus, 15780 Athens, Greece, 2011.
- [29] MANFRED WENDISCH, THOMAS FOKEN, *On the Retrieval of Mixing Height from Ceilometers*. Von der Fakultat far Physik und Geowissenschaften der UniversitÄt Leipzig, Marzo 2014.
- [30] STEFANIE EMMRICH, *The effect of cities on aerosol and cloud properties concerning the planetary boundary layer observed with rural and urban lidar and sun photometer measurements in Melpitz and Leipzig*. University of Leipzig, Noviembre 2015.

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Esquema general Lidar, la parte óptica corresponde concretamente a un Lidar Raman | 9 |
| 2.2. Montaje experimental para un sistema Lidar | 10 |
| 2.3. Funcionamiento del Telescopio dentro del Lidar | 11 |
| 2.4. Posibles solapamientos del haz láser y el telescopio | 11 |
| 2.5. Sistema de funcionamiento de un Policromador | 12 |
| 2.6. Sistema de funcionamiento de un tubo fotomultiplicador | 13 |
| 2.7. Sistema de funcionamiento de un APD | 14 |
| 2.8. Esquema de los procesos recogidos en la ecuación Lidar | 14 |
| 3.1. Comparación entre la cantidad de estaciones Lidar y ceilómetros en Europa | 22 |
| 3.2. Comparación entre resultados basados en técnica Lidar. | 24 |
| 4.1. Fotografías del ceilómetro en la azotea de la facultad de ciencias. | 32 |
| 4.2. Comparación entre la señal medida el día 11/08/2014 por el ceilómetro con la imagen de la cámara de cielo. | 39 |
| 4.3. Comparación entre la señal medida el día 21/10/2014 por el ceilómetro con la imagen de la cámara de cielo. | 40 |
| 4.4. Comparación entre la señal medida el día 24/05/2016 por el ceilómetro con la imagen de la cámara de cielo. | 41 |
| 4.5. Comparación entre promedios el día 11/08/2014 para GRASP. | 56 |
| 4.6. Comparación entre promedios el día 21/10/2014 para GRASP. | 57 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 4.1. Productos del ceilómetro | 36 |
| 4.2. Almacenamiento de los datos numéricos de Beta_raw | 38 |
| 4.3. Ejemplo de salida para la variable temp_int | 42 |
| 4.4. Ejemplo de salida para la variable temp_ext | 43 |
| 4.5. Ejemplo de salida para la variable temp_det | 44 |
| 4.6. Ejemplo de salida para la variable temp_lom | 44 |
| 4.7. Ejemplo de salida para la variable base | 45 |
| 4.8. Ejemplo de salida para la variable stddev | 46 |
| 4.9. Ejemplo de salida para la variable p_calc | 47 |
| 4.10. Ejemplo salida PBL, día 24/05/2016 | 48 |
| 4.11. Información sobre la calidad del cálculo de las capas de aerosol | 48 |
| 4.12. Resumen de las posibles salidas de SCI | 49 |
| 4.13. Salida de BCC y TCC | 49 |
| 4.14. Ejemplo salida CBH, día 24/05/2016 | 50 |
| 4.15. Ejemplo salida CBE, día 24/05/2016 | 51 |
| 4.16. Ejemplo salida CDP, día 24/05/2016 | 51 |
| 4.17. Ejemplo salida CDE, día 24/05/2016 | 52 |