

## VI. Objetivos y metodología.

Este capítulo se va a centrar en el estudio de los datos obtenidos mediante el LIDAR. El objetivo es poder aplicar los datos obtenidos a la interpretación de la composición y evolución de la atmósfera. Para ello se mostrarán gráficas justificativas de los fenómenos explicados. En el presente capítulo se explican las herramientas que van a utilizarse en el análisis de datos.

### 6.1 Obtención de datos con el LIDAR UV11.

En primer lugar se explica la técnica en la que se basa el LIDAR. A continuación veremos distintas formas de interpretar los datos obtenidos según las distintas opciones que nos da el software disponible.

#### 6.1.1 Fundamentos de la técnica LIDAR.

Cuando un rayo láser es enviado a la atmósfera, este es ampliamente dispersado en todas las direcciones. La atmósfera es un sistema dinámico en el que están presentes además de los gases que componen el aire, contaminantes y partículas. Las partículas provocan dos tipos de dispersión dependiendo de su tamaño. A la dispersión provocada por partículas de pequeño radio la denominamos dispersión Rayleigh y a la provocada por partículas de mayor tamaño la denominamos dispersión Mie.

La luz dispersada es recogida por un telescopio situado de manera coaxial al láser emisor. De esta manera se intenta recoger al máximo la señal dispersada. Esta señal es enviada a un fotodetector a través de un filtro espectral, adaptado a la longitud de onda del láser.

Obtenemos así una señal  $P(r, \lambda)$ . Obtenemos su evolución temporal a través de la ecuación (1), ecuación del LIDAR.

$$P(r, \lambda) = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \cdot P_0 \cdot \frac{A \cdot \eta \cdot O}{r^2} \cdot \beta \cdot e^{(-2 \int_0^r \alpha \cdot dr)} \quad (1)$$

Donde:

P: potencia recibida desde una distancia  $r$ , función de diferentes factores.

c: velocidad de la luz

$\Delta t$ : duración del pulso del láser.

$P_0$ : número de fotones emitidos por el láser.

$A$ : área del receptor óptico.

$\eta$ : eficiencia del receptor óptico.

$O$ : rango dependiente del solapamiento entre la señal emitida y el campo de visión del receptor.

$\beta$ : coeficiente de dispersión, depende de la atmósfera para dispersar la luz hacia la fuente emisora.

$\Theta$ : ángulo de dispersión.

$\lambda$ : longitud de onda

$r$ : distancia.

Para determinar la concentración del contaminante tenemos en cuenta tanto la extinción del láser emitido como la dispersión.

La exponencial de la ecuación nos muestra la atenuación total atmosférica. Sin embargo el coeficiente alfa está formado por dos procesos distintos: la dispersión Rayleigh- Mie y la absorción específica de las moléculas presentes en la atmósfera, como vemos en la ecuación (2):

$$\alpha = \alpha_{Ray} + \alpha_{Mie} + \alpha_{gas} \quad (2)$$

La técnica LÍDAR se basa en la emisión de dos señales de longitud de onda muy próximas entre sí, o más bien lo suficientemente próximas como para tener igual dispersión en la atmósfera debida a aerosoles y otros contaminantes, salvo para un contaminante objetivo que será el limitante de cercanía de ambas longitudes de onda. Serán lo suficientemente lejanas como para que una de ellas determinada  $\lambda_{on}$  experimente una absorción muy superior a la otra longitud de onda  $\lambda_{off}$ .

Estas longitudes de onda aproximarán la consideración siguiente: Para todo  $\lambda_{off}$  y  $\lambda_{on}$ , elegidos para un determinado contaminante, supondremos las igualdades dadas en (3):

$$\begin{aligned}
 \alpha_{Ray}(\lambda_{on}) &= \alpha_{Ray}(\lambda_{off}) \\
 \alpha_{Mie}(\lambda_{on}) &= \alpha_{Mie}(\lambda_{off}) \\
 \frac{d}{dr} \ln \beta(\lambda_{on}) &= \frac{d}{dr} \ln \beta(\lambda_{off}) \quad (3) \\
 P_0(\lambda_{on}) &= P_0(\lambda_{off})
 \end{aligned}$$

Dicho esto si dividimos la potencia obtenida mediante la ecuación del lidar obtenida individualmente para dos longitudes de onda  $\lambda_{off}$  y  $\lambda_{on}$ , obtenemos la expresión (4):

$$\frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = \frac{\frac{c \cdot \Delta t}{2} \cdot P_0(\lambda_{on}) \cdot \frac{A \cdot \eta \cdot O}{r^2} \cdot \beta \cdot e^{(-2 \cdot \int_0^r \alpha(\lambda_{on}) \cdot dr)}}{\frac{c \cdot \Delta t}{2} \cdot P_0(\lambda_{off}) \cdot \frac{A \cdot \eta \cdot O}{r^2} \cdot \beta \cdot e^{(-2 \cdot \int_0^r \alpha(\lambda_{off}) \cdot dr)}} \quad (4)$$

Como vemos podemos simplificarlo todo salvo las exponenciales, resultando la expresión (5):

$$\frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = \frac{e^{(-2 \cdot \int_0^r \alpha(\lambda_{on}) \cdot dr)}}{e^{(-2 \cdot \int_0^r \alpha(\lambda_{off}) \cdot dr)}} \quad (5)$$

Pero además debido a las suposiciones hechas en (3) podemos simplificar lo siguiente:

$$\frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = \frac{e^{-2 \cdot \int_0^r \alpha_{gas}(\lambda_{on}) + \alpha_{Mie}(\lambda_{on}) + \alpha_{Ray}(\lambda_{on}) \cdot dr}}{e^{-2 \cdot \int_0^r \alpha_{gas}(\lambda_{off}) + \alpha_{Mie}(\lambda_{off}) + \alpha_{Ray}(\lambda_{off}) \cdot dr}} \quad (6)$$

Aplicando propiedades de las potencias obtenemos en (7):

$$\frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = \frac{e^{-2 \cdot \int_0^r \alpha_{gas}(\lambda_{on}) \cdot dr}}{e^{-2 \cdot \int_0^r \alpha_{gas}(\lambda_{off}) \cdot dr}} \quad (7)$$

Sacando logaritmos obtenemos la expresión (9):

$$\ln \frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = \ln e^{-2 \cdot \int_{r_0}^r \alpha_{gas}(\lambda_{on}) dr} - \ln e^{-2 \cdot \int_{r_0}^r \alpha_{gas}(\lambda_{off}) dr} \quad (8)$$

$$\ln \frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = -2 \cdot \int_{r_0}^r \alpha_{gas}(\lambda_{on}) dr + 2 \cdot \int_{r_0}^r \alpha_{gas}(\lambda_{off}) dr \quad (9)$$

Derivando respecto a x en ambos miembros, resulta la expresión (10):

$$\frac{d}{dx} \ln \frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})} = 2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})] \quad (10)$$

Donde:

$2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})]$  es la absorción diferencial de las longitudes de onda estudiadas. Podemos encontrar este parámetro, para distintas longitudes de onda en las especificaciones habituales del lidar para cada contaminante.

Obtendremos el número densidad, que sustituiremos mediante la ley de Beer Lambert para obtener la ecuación de la concentración (11):

$$N = \frac{\frac{d}{dx} \ln \frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})}}{2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})]} \quad (11)$$

La expresión de la ley de Ley de Beer- Lambert la tenemos en la ecuación (12)

$$\log \frac{I}{I_0} = -\sigma \cdot N \quad (12)$$

Donde:

N es la concentración molar del contaminante.

$\sigma$  es la absorción diferencial.

Despejando y multiplicando por su peso molecular (M) obtenemos la concentración de cada contaminante (13):

$$C = \frac{\frac{d}{dx} \ln \frac{P(r, \lambda_{on})}{P(r, \lambda_{off})}}{2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})]} \cdot M \quad (13)$$

### 6.1.2 Interferencias. ¿Cómo evitarlas?

La técnica basada en utilizar espectros de absorción para determinar la concentración de sustancias en una muestra problema es muy habitual en laboratorio, donde se dispone de equipos adecuados y de condiciones de medida estables. Sin embargo, el objeto de este estudio es la utilización de esta técnica para la medición del ozono atmosférico mediante un sistema de teledeteción. Por tanto las medidas son hechas in situ y habrá que tener en cuenta las posibles interferencias que pueden aparecer en los datos obtenidos.

#### 6.1.2.1 Presencia de otros gases en la atmósfera.

La atmósfera está formada por multitud de gases. Estos, al igual que el ozono absorben luz. Cada gas tiene un rango de longitud de onda donde la absorción de ésta es mayor. Una manera de evitar las interferencias ocasionadas por la presencia de otros gases es ajustar la longitud de onda de la luz emitida al rango de máxima absorción del ozono en el que no haya interferencias de otros gases.

“Espectros de absorción de algunos contaminantes atmosféricos”

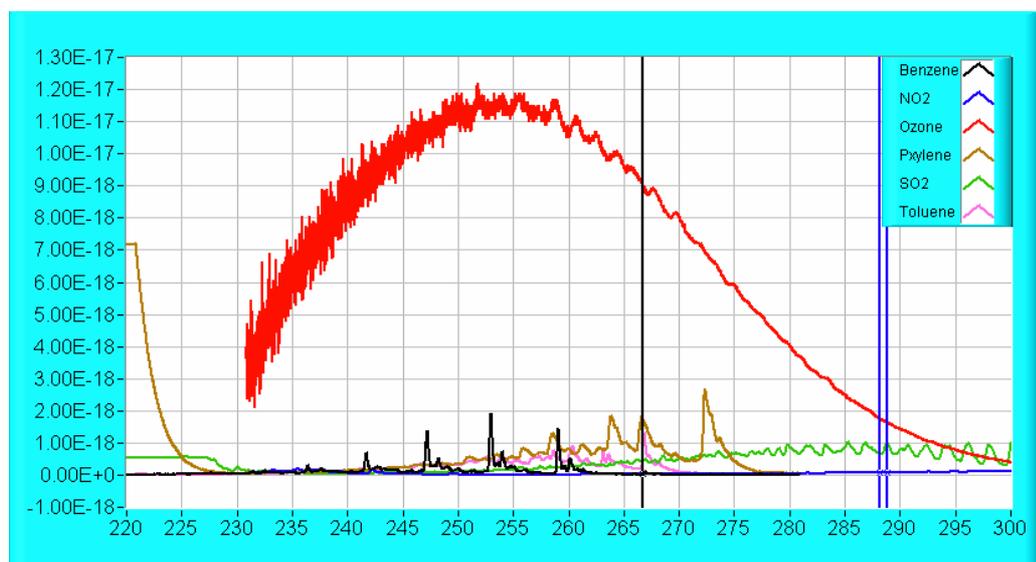


Fig. 1

En la figura 2 viene representada el corte transversal de la absorción de cada gas en  $\text{cm}^2$  frente a la longitud de onda de la luz incidente. Las verticales azules indican las longitudes de onda on y off utilizadas para medir ozono. Como vemos en la zona utilizada el corte transversal de la absorción para los gases distintos al ozono es despreciable para tolueno, xileno y benceno, resulta constante para dióxido de nitrógeno y además se ha realizado el ajuste de la longitud de onda para que también resulte constante para dióxido de azufre. De esta manera se minimiza la interferencia de estos contaminantes en las medidas realizadas.

“Espectros de absorción de algunos contaminantes atmosféricos”

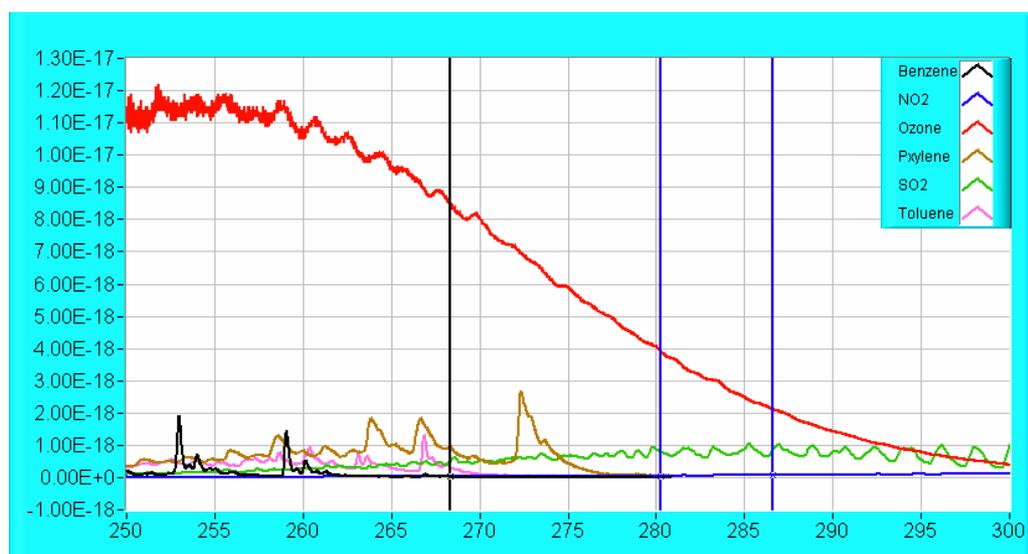


Fig. 2

### 6.1.2.2 Dispersión Rayleigh y Mie.

La dispersión de la luz en la atmósfera es la responsable del color que percibimos del cielo. Vamos a ver que efecto tienen y cuando se producen cada uno de los efectos citados.

**Dispersión Rayleigh:** se define como la dispersión debida a partículas muy pequeñas en comparación con la longitud de onda de la radiación dispersada. Dentro del estudio del LIDAR, se conoce como dispersión molecular. Ya que el 99% de la atmósfera está compuesto de oxígeno y nitrógeno, se considera a estos dos gases como la fuente de dispersión Rayleigh. (Claus Weitkamp,2005)

**Dispersión Mie:** Por el contrario, la presencia de partículas de mayor tamaño como aerosoles, la longitud de onda predominante será de apariencia blanquecina. Consideramos

partículas las grandes las que tienen mayor tamaño que la longitud de onda de la luz blanca. Por tanto si hay gran cantidad de nubes o humo etc. Veremos el color blanco en el cielo. (Claus Weitkamp,2005)

Para evitar la interferencia de este tipo de dispersión de la luz en la atmósfera es necesario, además de elegir días despejados para toma de medidas, realizar medidas a dos longitudes de onda distinta simultáneamente. De esta manera ajustamos una longitud de onda a la máxima absorción de ozono (sin interferencias de otros gases) y otra longitud de onda a una absorción mínima de ozono, lo suficientemente cercana a la anterior para que la dispersión experimentada sea similar. De esta manera tenemos dos medidas, una de ozono más dispersión atmosférica y otra sólo afectada por la dispersión atmosférica.

### 6.1.2.3 Otras

La presencia de cualquier objeto en el campo de alcance del láser producirá errores de medida. En el caso de pájaros o cualquier otro objeto que pueda cruzar la línea del láser, no afectará la medida dada por el LIDAR, ya que los barridos que hace este son de varios minutos en cada línea, por tanto una interferencia de unos instantes no afectara al resultado final.

### 6.1.3 Lecturas de resultados.

El programa utilizado nos da los resultados obtenidos de varias formas. Es recomendable obtener los resultados utilizando las distintas posibilidades.

#### “LIDAR UV11”



Fig. 3

**Validar datos.**

En primer lugar observamos la evolución de los datos obtenidos mediante la opción del programa de Validar datos. Podemos ver como evoluciona la señal obtenida según la absorción que experimente. El cálculo a partir de esta señal es complicado, pero podemos obtener una información valiosa para empezar a trabajar. Para la obtención de resultados sobre ozono se han utilizado las siguientes longitudes de onda:

$$\lambda_{\text{off}} = 286.24 \text{ nm y } \lambda_{\text{on}} = 280.84 \text{ nm.}$$

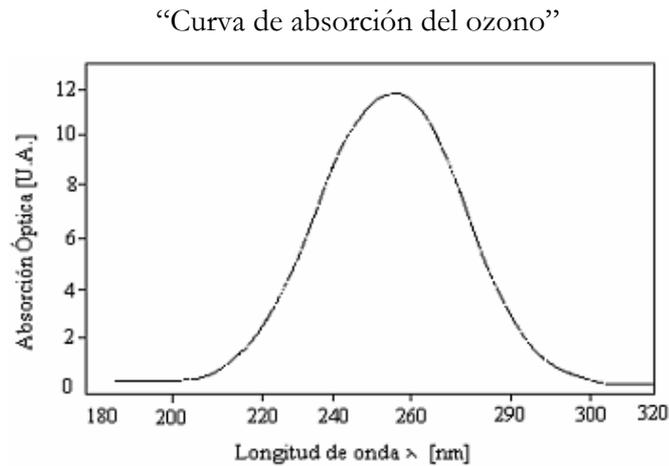


Fig. 4

En la gráfica vemos la absorción que presenta el ozono en función de la longitud de onda de la luz emitida.

En la figura 5 tenemos la gráfica de interpretación obtenida en el software del LIDAR UV11.

“Gráfica de respuesta del equipo para  $\lambda_{\text{off}} = 286.24 \text{ nm}$  y  $\lambda_{\text{on}} = 280.84 \text{ nm}$ ”

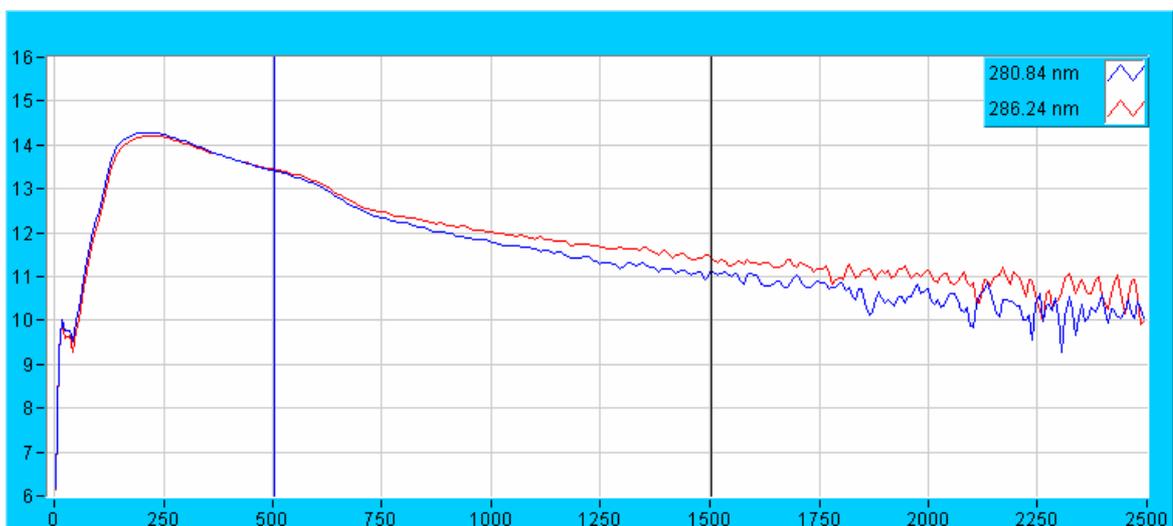


Fig. 5

En la imagen vemos la evolución de la señal recibida. La señal obtenida es la media de las medidas tomadas durante aproximadamente dos minutos en la misma orientación. Cada línea corresponde a una longitud de onda. En el eje x viene representada la distancia respecto al láser y en el eje y está representada el logaritmo neperiano de Potencia· distancia<sup>2</sup>.

En primer lugar observamos que la señal presenta ruido a partir de 1500 metros aproximadamente. Por tanto a partir de esta distancia la señal no será considerada válida.

En una primera aproximación, el software facilitado por el fabricante calculará la relación entre la variación entre cada una de las señales. En realidad incorpora varios coeficientes correctores para obtener los valores de respuesta.

Las medidas se realizan mediante barridos, por lo que el láser va describiendo un giro en abanico. Cada 10° de giro realizará una toma de medida como la mostrada. Por tanto para ver un abanico completo será necesario ordenar las distintas gráficas. Además podemos orientar el abanico respecto a la horizontal. En nuestro estudio realizamos los barridos perpendiculares al suelo, pero es posible realizar medidas formando otros ángulos con la horizontal.

La interpretación bidimensional de los datos resulta complicada de esta forma. Para ello utilizaremos otras funciones del programa.

### **Procesador en dos dimensiones.**

Mediante la introducción del intervalo de tiempos en el que se ha llevado a cabo un barrido completo, el programa realiza la conversión a concentraciones mediante la ecuación del LIDAR y da como resultado un barrido. Este barrido es una tabla de concentraciones puntuales, interpolada y graduada mediante colores para su mejor comprensión.

Para obtener esta tabla utilizamos información obtenida en la fase de Validación de datos. Representamos hasta la distancia donde se consideran válidos los datos. Además, la validación nos ayuda a la hora de identificar los fenómenos atmosféricos que se producen. Por ejemplo, en esta imagen podemos identificar una capa de inversión mediante la ayuda de la grafica de validación. Como vemos en la figura 5, a 600 metros y -60° aparece un escalón. Cuando observamos la evaluación en dos dimensiones en la figura 6 vemos claramente la acumulación de ozono en un capa inferior.

“Barrido que incluye la medida dada por la figura 5”

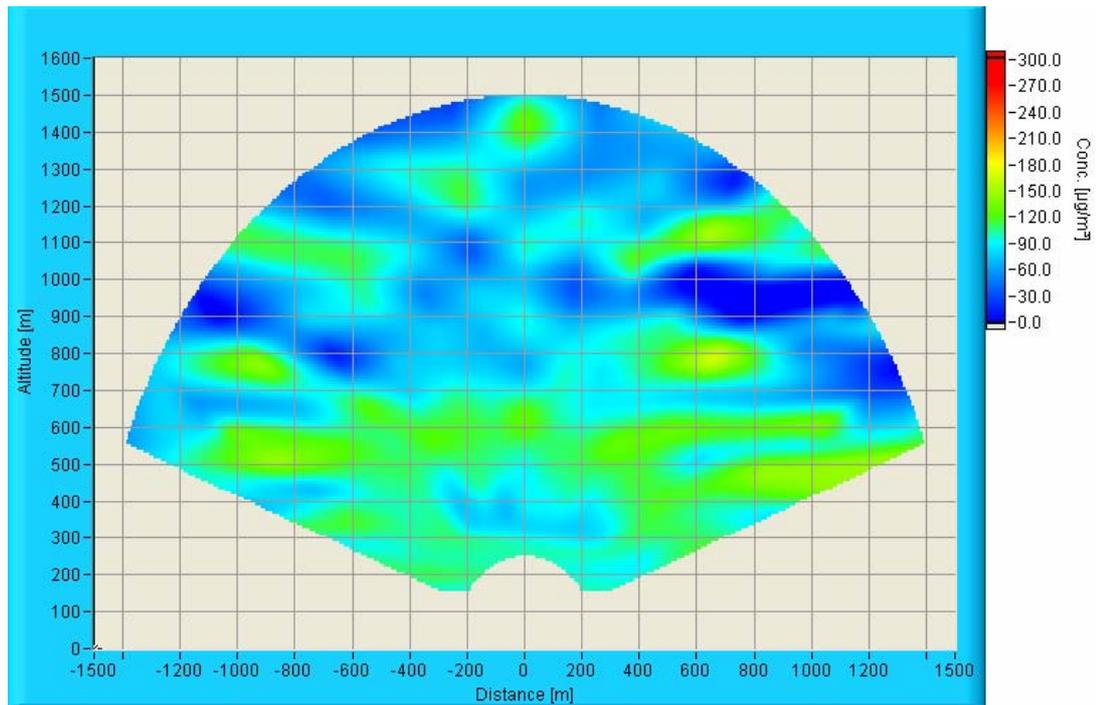


Fig. 6

El programa utiliza la escala de colores situada a la derecha.

**Plot VS tiempo.**

Esta opción es un complemento a la anterior. Podemos ordenar en el tiempo varios barridos para observar la evolución de algún detalle:

“Serie de barridos”

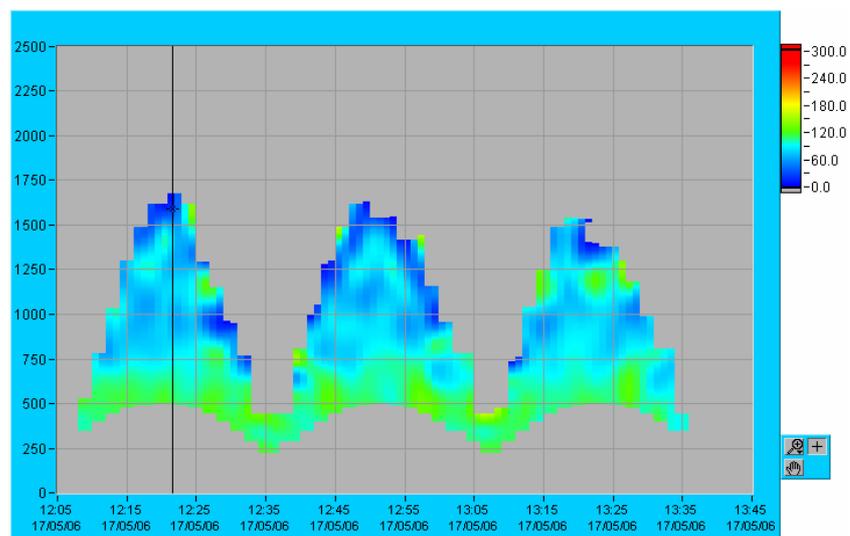


Fig. 7

Los barridos de la figura 7 no tienen gran calidad, pero permiten ver, como en este caso la disipación de la capa de inversión. Además el eje y nos da una escala de tiempos que no resulta real, ya que los barridos se realizan en forma de abanico, no verticalmente. En cualquier caso se acepta la aproximación, ya que los cambios atmosféricos no ocurren a gran velocidad.

### **Get Data.**

En esta opción podemos elegir la obtención del espectro de cada gas. En la figura 8 aparece la curva correspondiente al ozono. Nos da gráficamente la absorción en el corte transversal para cada longitud de onda.

“Curva de absorción del ozono”

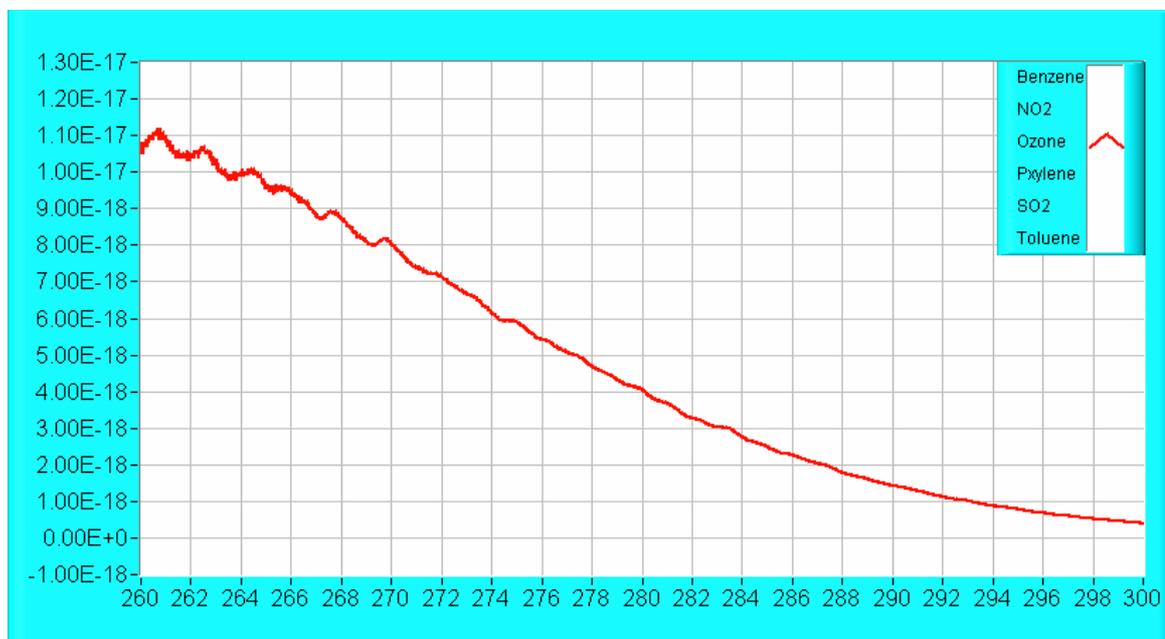


Fig. 8

Hemos seleccionado el ozono. Este dato será una constante en la ecuación del LIDAR.

### **6.1.4 Estudio espacial de datos.**

El software suministrado con el equipo está limitado a lo expuesto hasta el momento. Ha sido necesaria la realización de un nuevo programa independiente del suministrado por el fabricante para tratar los datos obtenidos. Este nuevo programa permite numerosas opciones como las que se exponen a continuación.

### 6.1.4.1 Concentraciones puntuales.

Obtenemos la siguiente gráfica que analizamos:

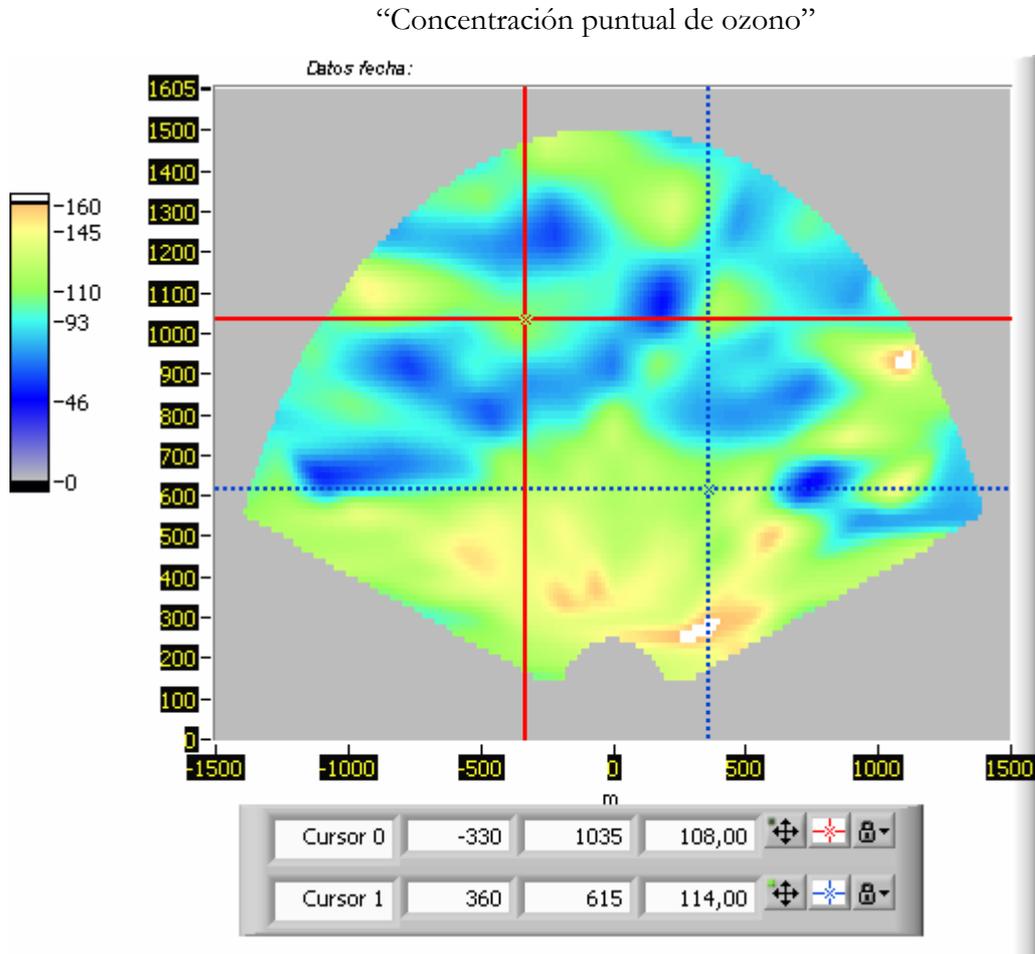


Fig. 9

Como vemos en la figura 9, aparecen unos cursores que se cortan en un punto, cada uno de ellos nos permite medir la concentración en el punto donde los situamos. Debajo de la gráfica obtenemos las coordenadas de cada punto y la concentración.

Podemos obtener la gráfica también sin interpolar los datos, como se ve en la figura 10:

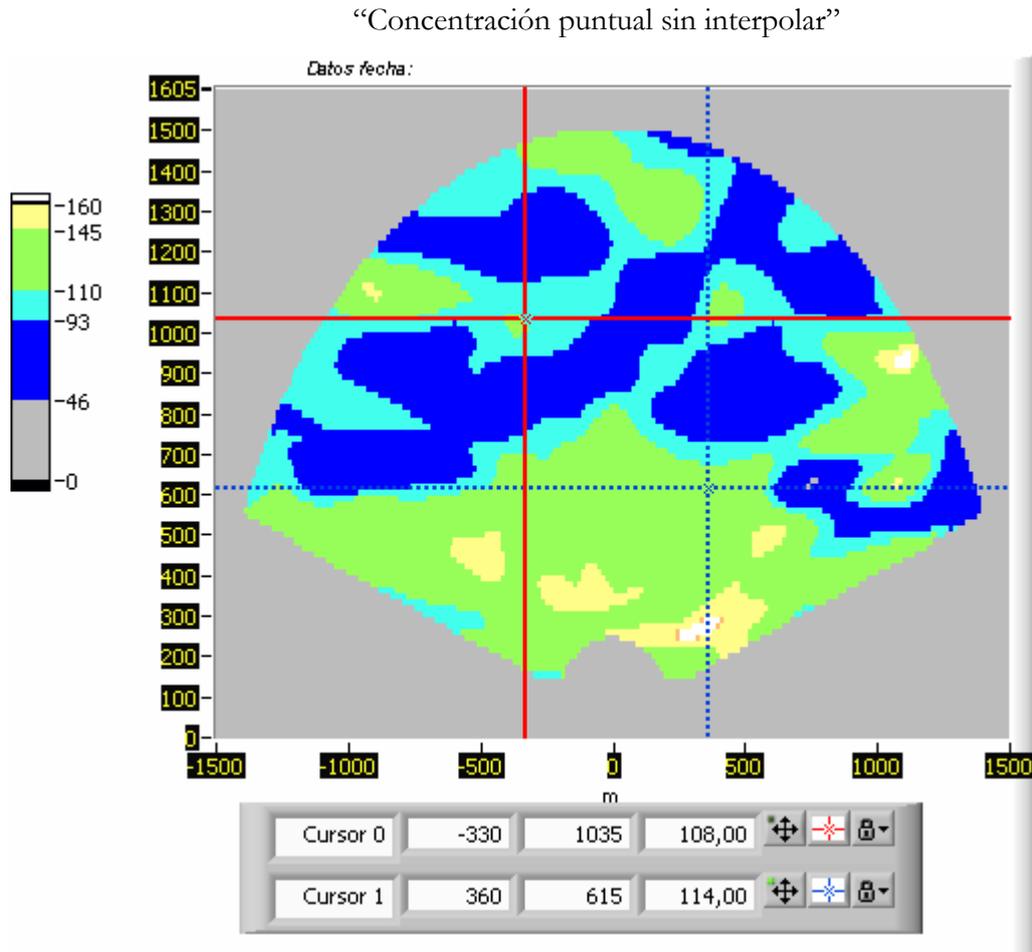


Fig. 10

#### 6.1.4.2 Concentración en verticales y horizontales.

El programa nos permite obtener las siguientes gráficas, como vemos en la figura 11 nos dan un perfil de concentraciones según la vertical u horizontal marcada con los cursores.

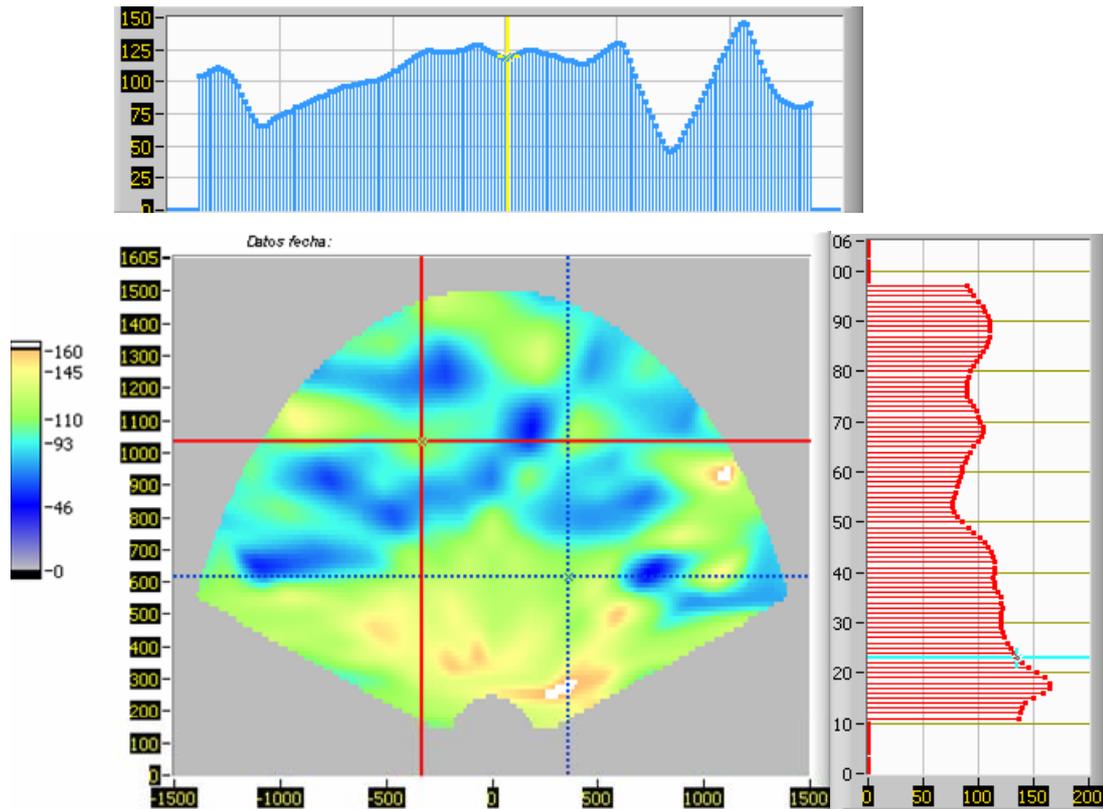


Fig. 11

En la parte superior de la figura 11 tenemos el perfil de concentraciones dado por el corte horizontal, mientras en el lateral obtenemos lo mismo pero del corte vertical. Con unidades de concentración en los ejes de ambos.

### 6.1.4.3 Media puntual y general.

Es posible también obtener la media de un detalle que definamos limitándolo entre los cursores. También podemos obtener la media del barrido completo.

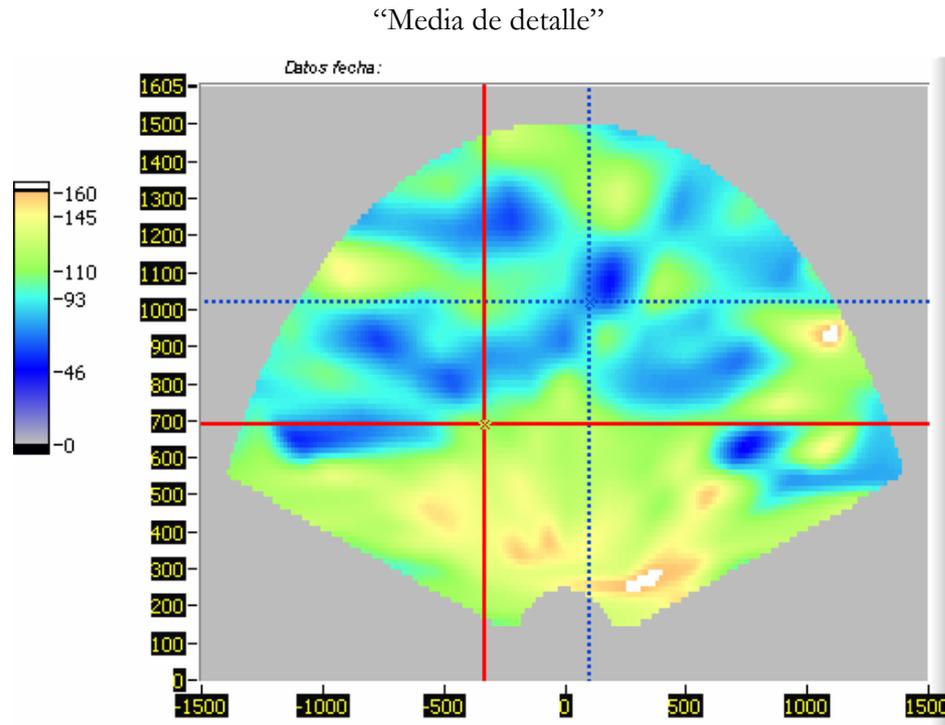


Fig. 12

A partir del barrido completo podemos aislar el detalle que nos interesa como vemos en la figura 13:

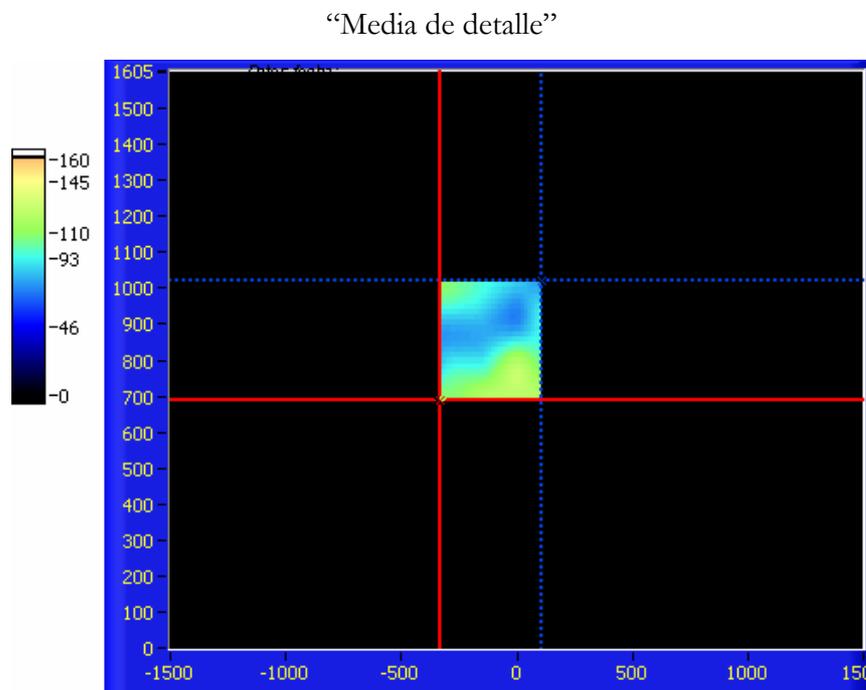


Fig. 13

Además obtenemos de forma analítica los valores medios tanto del detalle como de todo el

barrido.

“valores analíticos de media total y media del detalle”

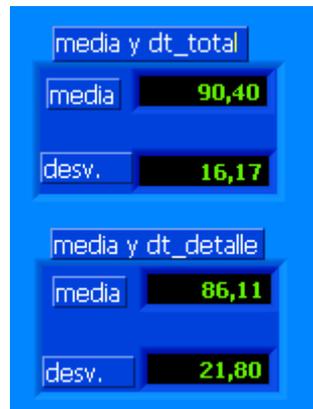


Fig. 14

#### 6.1.4.4 Localización de zonas de riesgo.

El análisis de datos realizado conlleva un riesgo de pasar por alto algunas zonas de concentración elevada al observar las gráficas. Disponemos de una opción que nos permite aislar zonas según su concentración, de esta manera podemos tener más información sobre lo que ocurre realmente.

Como hemos visto en las gráficas cada concentración tiene asignado un color de la escala. Podemos asignar a los colores que deseemos el color negro, que hace que las zonas a esa concentración queden transparentes, resaltando los colores deseados únicamente. Igualmente podemos asignar un color a las zonas de concentración que nos resulte interesante para el estudio, como por ejemplo zonas con concentraciones por encima del límite permitido.

“Zonas de alta concentración”

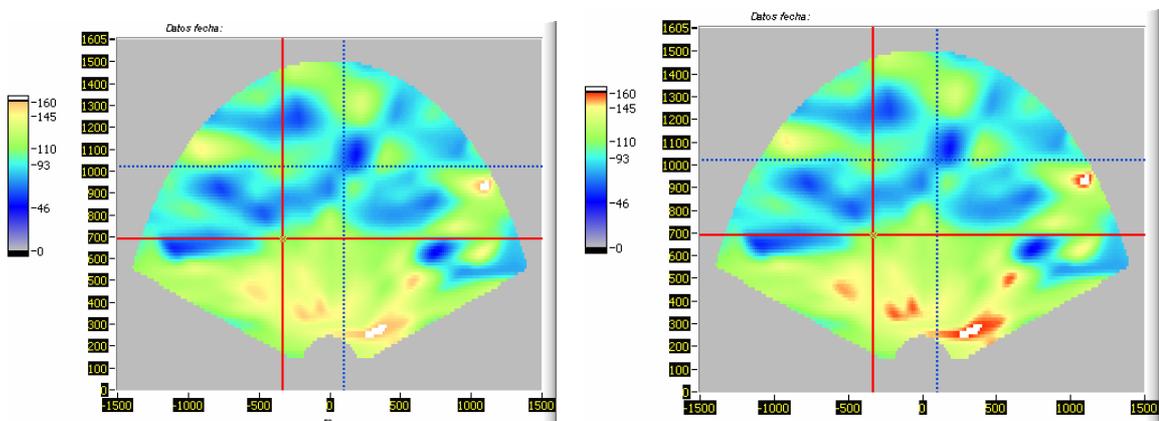


Fig. 15

En la figura 15 resaltamos las zonas de alta concentración.

“Concentración alrededor de  $93 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ”

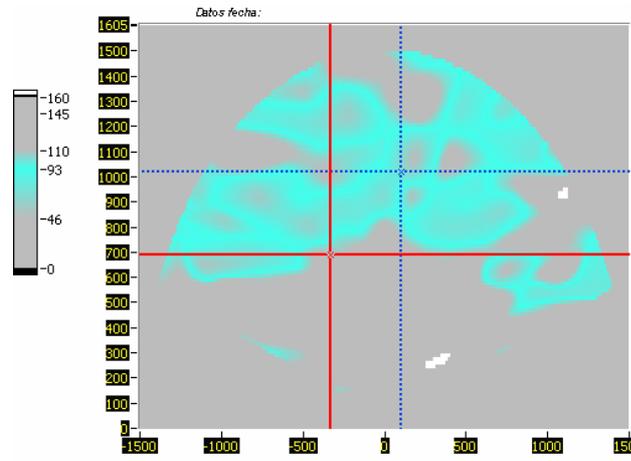


Fig. 16

En la gráfica 16 hemos aislado las zonas de concentración alrededor de  $93 \mu\text{g}/\text{m}^2$ .

#### 6.1.4.5 Análisis tridimensional.

Podemos también realizar la representación tridimensional de los datos, siendo el eje z el valor de concentración y los ejes x e y las coordenadas del punto.

“Análisis tridimensional”

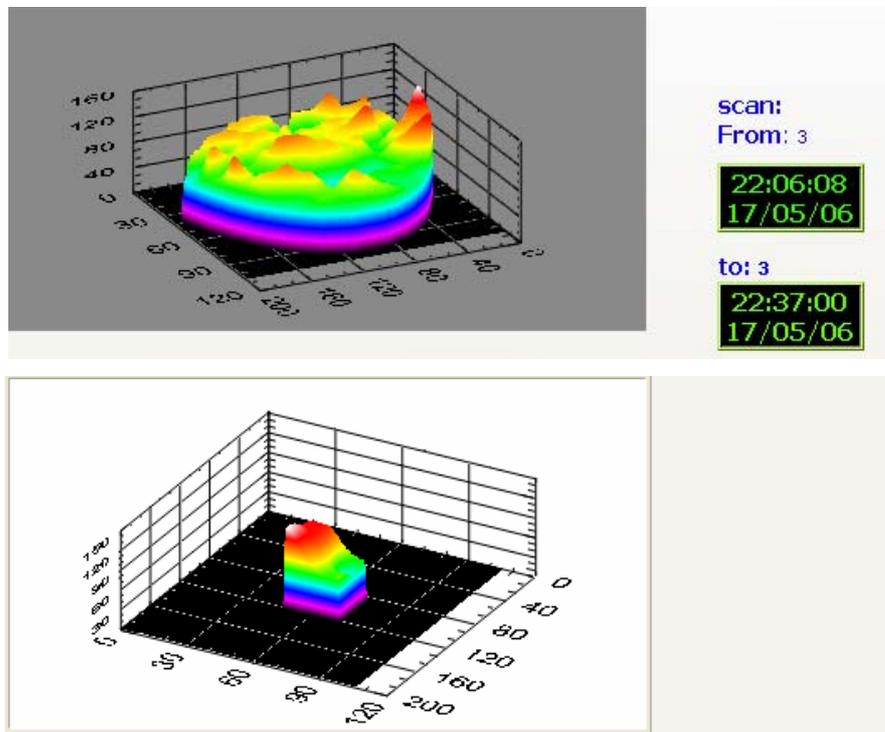


Fig. 17

En la figura 17 tenemos tanto el barrido completo como el detalle señalado con los cursores en la gráfica.

### 6.1.5 Evolución temporal de datos.

Para estudiar la evolución temporal de los datos se utilizara el programa ampliación del proporcionado por el fabricante del Lídár. Este programa permite obtener la sucesión de cortes verticales y horizontales en el tiempo. Así podemos centrar el estudio en una zona determinada y obtener un resultado gráfico para un tiempo determinado.

Vamos a mostrar un ejemplo sobre como mostrar la evolución temporal. En primer lugar mostramos la imagen del primer barrido de la serie que introducimos en el programa. En el indicamos donde queremos estudiar la evolución temporal marcando con el cursor correspondiente. El programa nos devuelve los cortes marcados de cada uno de los barridos ordenados temporalmente.

Para explicar como se realiza este análisis ofrecemos en las figuras 18, 19 y 20, barridos consecutivos de los que extraeremos cortes verticales y horizontales.

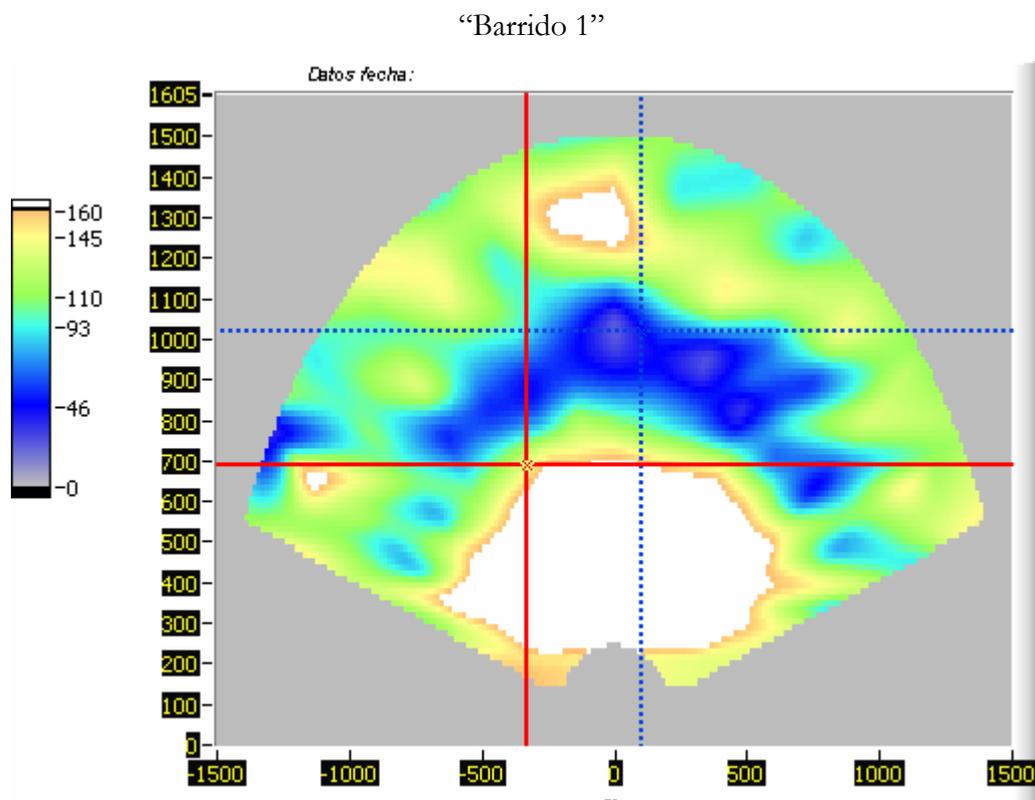


Fig. 18

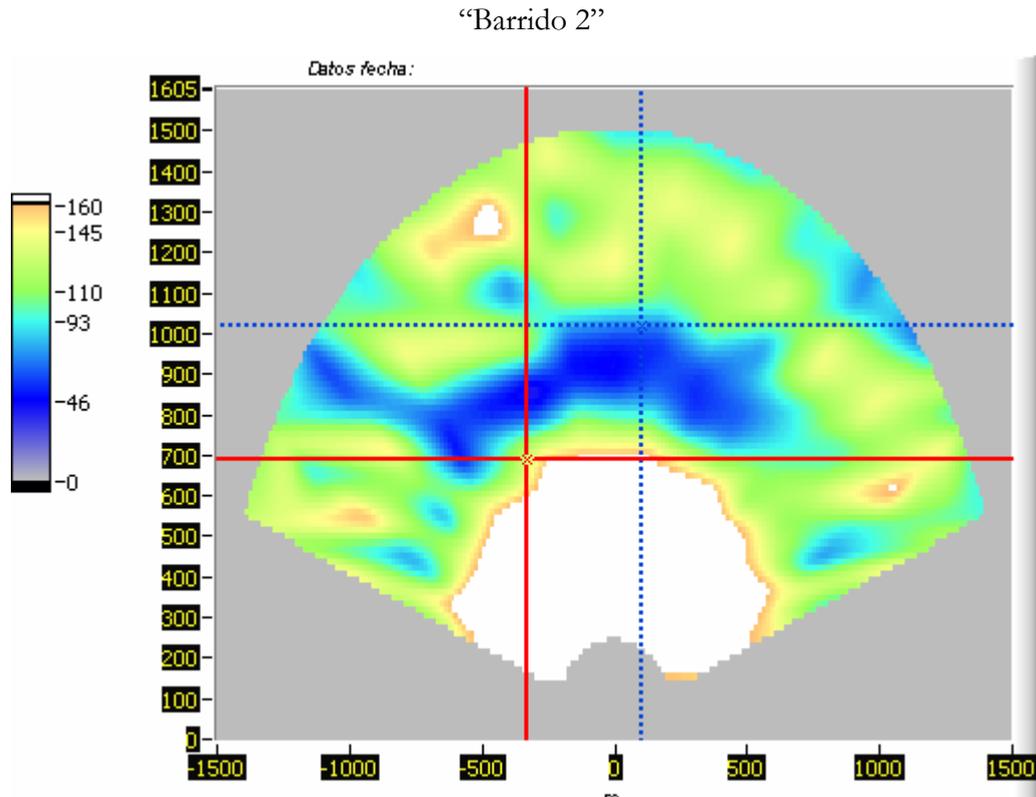


Fig. 19

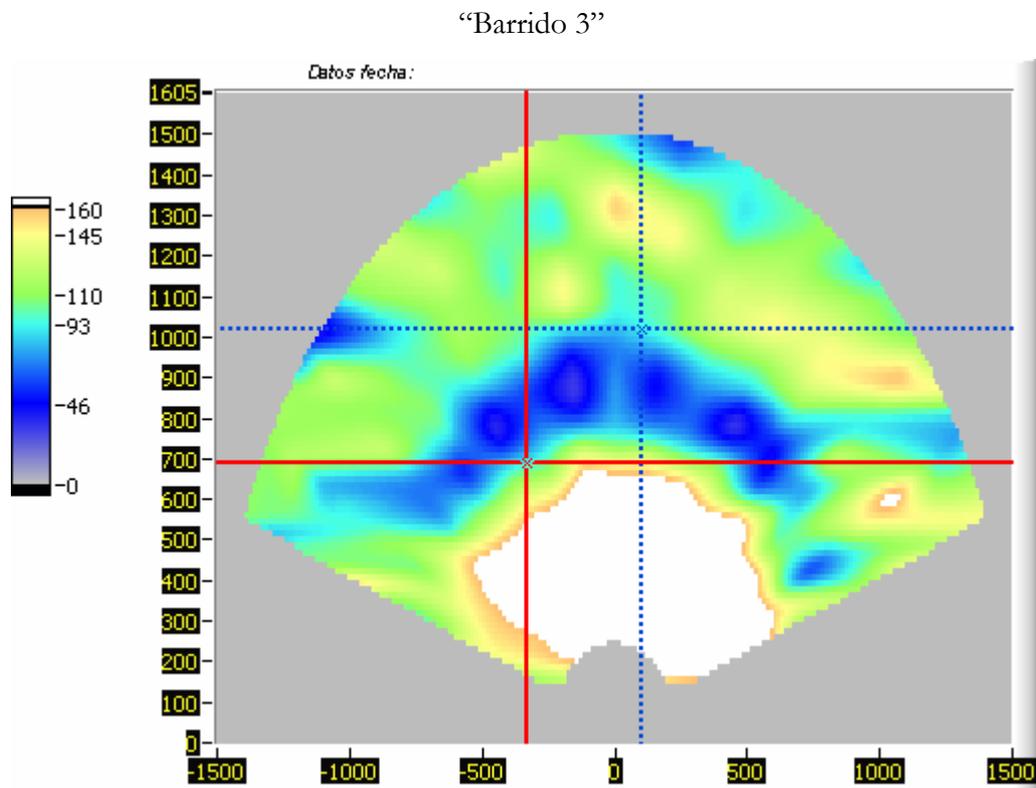


Fig. 20

En la figura 21 tenemos ordenados los cortes hechos con el cursor horizontal:

“Cortes horizontales”

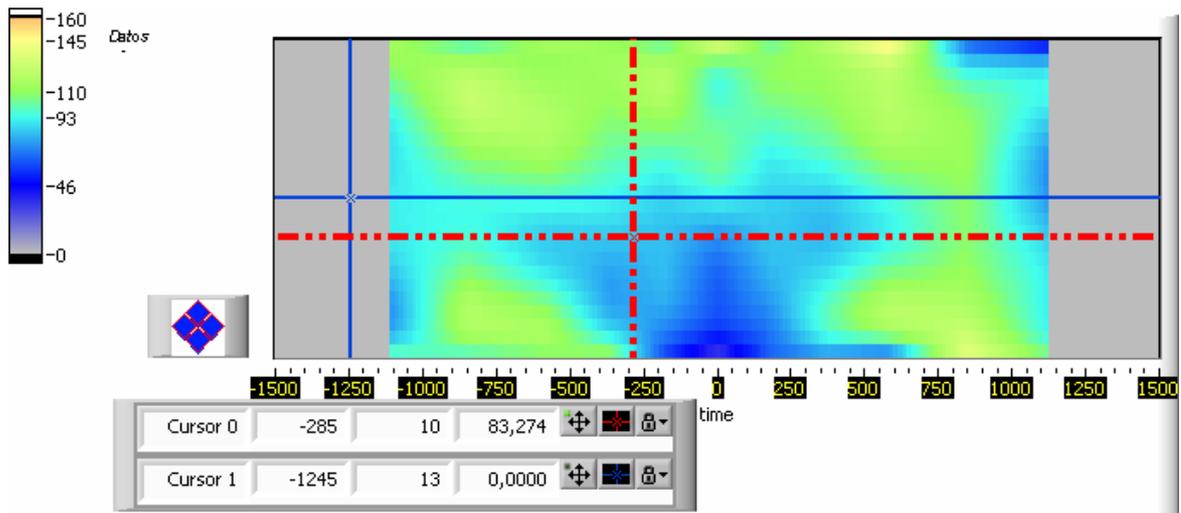


Fig. 21

En la figura 22 presentamos los cortes hechos con el cursor vertical.

“Cortes verticales”

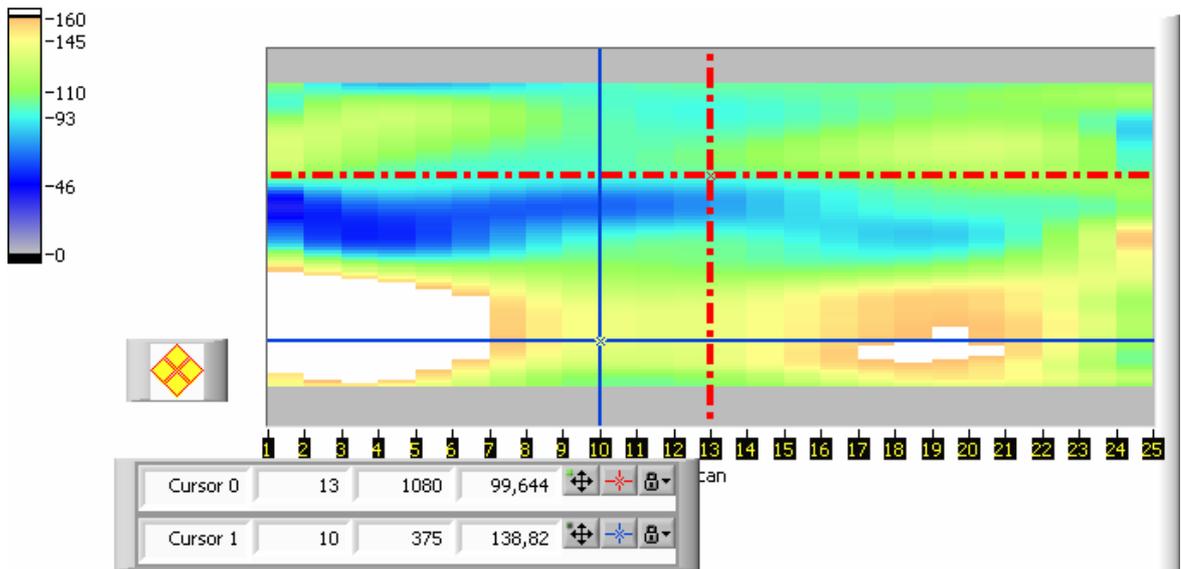


Fig. 22

En estas gráficas también podemos obtener los datos de concentraciones puntuales que nos interesen desplazando los cursores.

Las gráficas muestran los cortes apilados directamente. También es posible obtener las gráficas sin interpolar los datos:

“Cortes verticales sin interpolación”

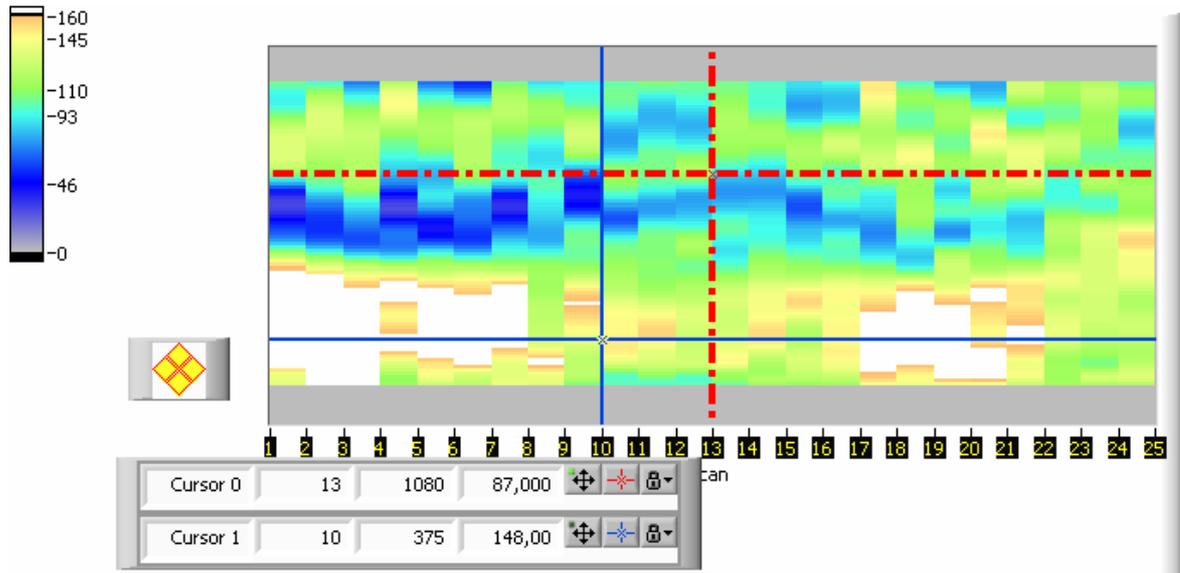


Fig. 23

“Cortes horizontales sin interpolación”

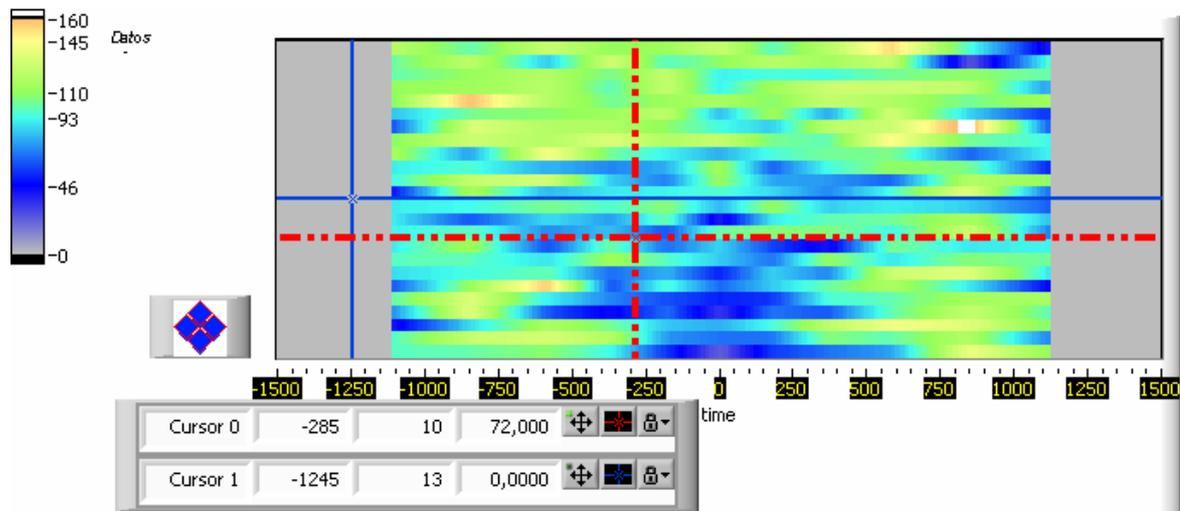


Fig. 24

En el análisis de la evolución temporal de ozono utilizaremos las gráficas con interpolación.