

# MÉTODOS DE ESTUDIO DE CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA (CLA) MEDIANTE UN LIDAR DE RETRODIFUSIÓN

J. Fochesatto, M. Lavorato, P. Cesarano, E. Quel, P. Flamant\*, J. Pelon\*\*

DIVISION RADAR LASER. CEILAP (CITEFA - CONICET)  
Zufriategui 4380 (1603), Villa Martelli, Pcia.Bs.As. -ARGENTINA.

\* LMD - Ecole Polytechnique - Palaiseau - FRANCE.

\*\* Service d'Aeronomie du CNRS - Université Paris 6 - Paris - FRANCE.  
e-mail lavorato@udceilap.edu.ar  
foch@udceilap.edu.ar.

Se estudian distintos métodos para la determinación de la CLA ( Capa Límite Atmosférica ) mediante un Lidar de Retrodifusión y el rango de validez de los datos. También se muestra el procesamiento de datos necesario para la aplicación de cada método en particular.

Differents methods for Atmospheric Boundary Layer (ABL) determination by means of a Backscatter Lidar and data range validity are analysed. The data processing necessary for the application of each particular method is shown.

## I. INTRODUCCION.

Desde el punto de vista dinámico la Capa Límite Atmosférica (CLA) es la zona de la atmósfera influenciada por la superficie de la tierra. Es en general una zona turbulenta como lo muestra su elevado número de Reynolds calculado en base a la velocidad de viento.

Desde el punto de vista térmico se define como la zona de la atmósfera próxima a la superficie terrestre donde sus características son influenciadas por la variación diurna de la radiación solar. Esta interacción entre la CLA y la superficie terrestre se manifiesta a través de la reemisión de radiación por parte de esta última. En efecto esto se debe a que el balance radiativo medio es positivo para la superficie terrestre y negativo para la tropósfera; según se muestra en la figura 1.

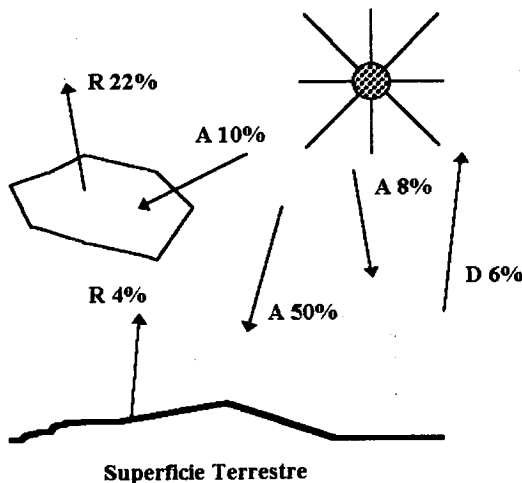


Figura 1. Esquema de Balance de radiación visible. A: absorción, R: reflexión; D: difusión.

Se pueden distinguir a lo largo del día dos clases bien definidas de CLA. En las Figuras 2 y 3 se visualizan los

diagramas de CLA Estable y CLA Inestable respectivamente en donde se indican los perfiles de los principales parámetros que las caracterizan.

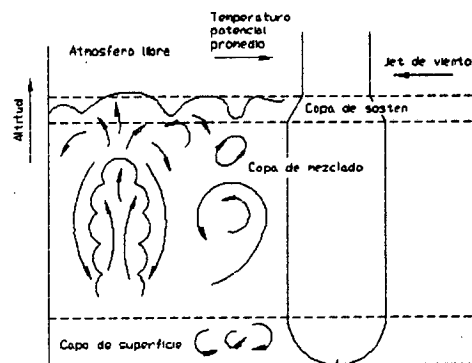


Figura 2. Capa Límite Atmosférica Inestable.

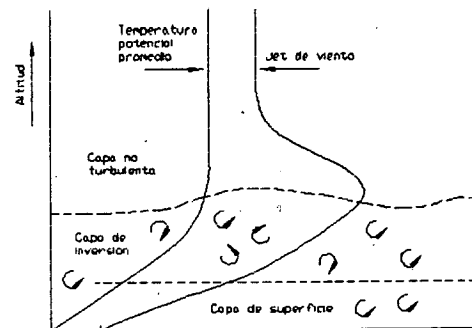


Figura 3. Capa Límite Atmosférica Estable

## II. SONDEO DE LA CLA Y MODELIZACIÓN UNIDIMENSIONAL.

Con el fin de interpretar la señal de sondeo LIDAR de la CLA se considera un modelo de distribución de moléculas con una discontinuidad en el borde de la CLA. El modelo mas sencillo de la CLA es el que se describe a continuación. Su variación con la altura en la zona del borde de la capa límite se muestra en la figura 4:

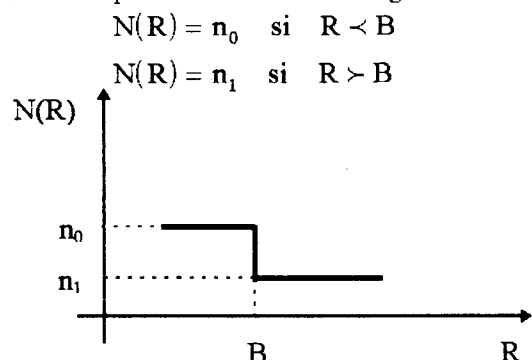


Figura 4. Capa Límite Atmosférica Modelo Unidimensional.

Donde  $N(R)$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] es el perfil de concentración vertical de moléculas el cual presenta una discontinuidad en el borde de la CLA.

## III. TRATAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES LIDAR.

El tratamiento de datos de las observaciones de la CLA está asociado a parámetros tales como el ancho de banda y la relación de señal a ruido del sistema de detección. La interacción entre éstos la podemos resumir en los siguientes puntos:

- Un sistema de detección de ancho de banda pequeño no permite visualizar correctamente perturbaciones localizadas, como por ejemplo cambios de pendientes, incrementando la incerteza en la posición del borde de la CLA.
- Un sistema de ancho de banda medio permitiría efectuar estas observaciones con buena resolución

espacial pero resulta fuertemente dependiente del nivel de ruido de banda ancha de captura del sistema de recepción. Una solución a este problema se alcanzaria si se promediara un gran número de observaciones del fenómeno; pero los tiempos de evolución de la CLA suelen ser significativamente inferiores a los necesarios para rescatar la señal del ruido.

- Un sistema de gran ancho de banda posee una buena resolución espacial con una extrema dependencia del ruido. La solución óptima es la captura de señales Lidar con todo el ancho de banda electrónico posible efectuando un tratamiento digital de los datos adquiridos a posteriori con el fin de extraer información asociada con la dinámica de la CLA.

A continuación describimos el tratamiento digital de los datos presentando luego los distintos métodos de determinación de la CLA en su evolución diaria. En la figura 5 se muestran la señal Lidar capturada y su tratamiento mediante un proceso de convolución (C) en el tiempo con una ventana de ancho variable. En ella se verifica que al aumentar el ciclo de actividad de la ventana temporal de convolución, la señal sufre una disminución del ancho de banda.

En la figura 6 se presenta el tratamiento de la señal Lidar por medio de un filtro digital no-causal denominado de media móvil (MA-moving average) con el cual se verifica que si se aumenta el número de elementos de la señal con la que se construye el filtro digital se logra una reducción del ancho de banda de la señal capturada por el sistema Lidar.

Para los dos casos vistos se concluye que el tratamiento de la señal logrará estabilizar los algoritmos de inversión de la CLA dado que incrementan la relación de señal/ruido. Sin embargo se observa que hay un punto límite a partir del cual la señal comienza a perder el ancho de banda natural.

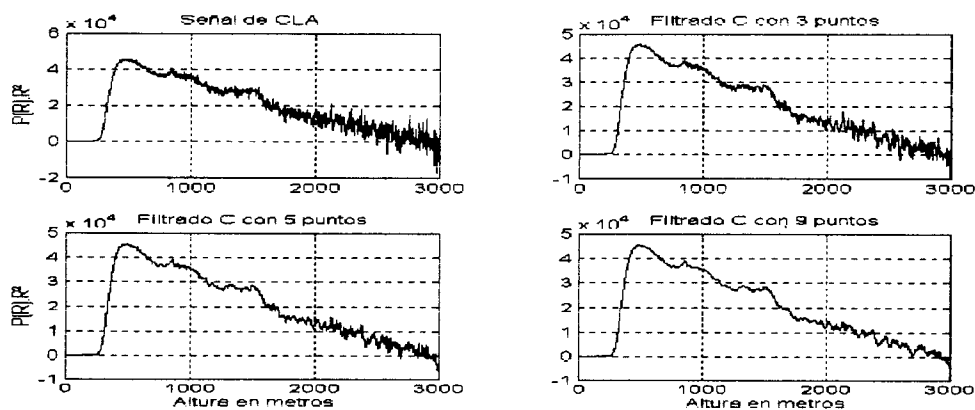


Figura 5. Tratamiento de la señal Lidar por Convolución (C).

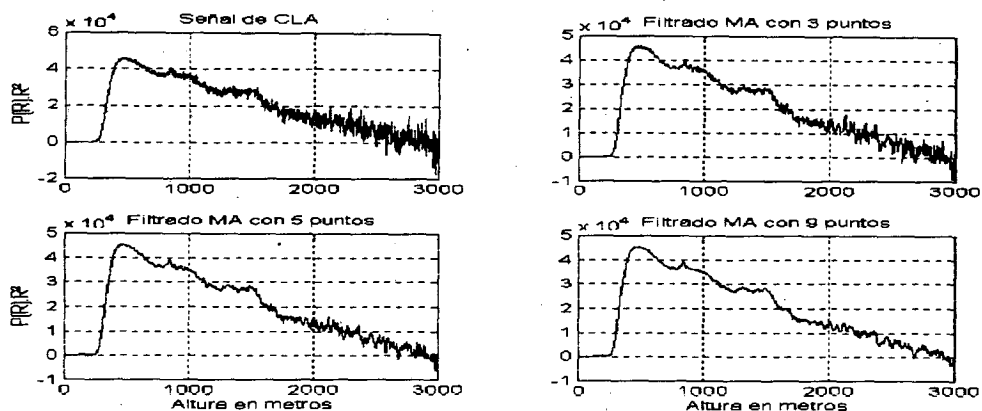


Figura 6. Tratamiento de la señal Lidar por medio del filtro digital de media móvil. (MA).

#### IV. METODOS DE ESTUDIO DE CLA.

##### 1- Derivada.

Por este método se busca determinar el punto de la señal Lidar donde se produce la máxima pendiente basándonos en el hecho de que en el borde de la CLA la señal cae bruscamente. Para esto se calcula la derivada de señal corregida en rango  $[P(R) \cdot R^2]$  y se busca el mínimo local. Este método se implementa en base a las siguientes ecuaciones.

$$S(R_i) = P(R_i) \cdot R_i^2$$

$$S'(R_i) = \left[ \frac{S(R_{i+1}) - S(R_{i-1}))}{R_{i+1} - R_{i-1}} \right]$$

##### 2- Ruptura de pendientes.

Es un método de determinación gráfica de la CLA que se basa en el modelo unidimensional presentado y su definición, determinándola sobre la curva logarítmica de la señal corregida en rango. En este caso el método se implementa a través de la ecuación siguiente.

$$U(R) = \ln[S(R)] = \ln[P(R) \cdot R^2]$$

##### 3- Varianza. STD.

Se basa en el monitoreo de un punto fijo cercano al borde de la CLA donde el movimiento de aerosoles y polvo atmosférico entretenido por las térmicas, que se desarrollan en la capa de mezclado, llega a su nivel máximo de ascensión causando una fuerte variación de la señal de retrodifusión. Dichas variaciones permiten efectuar una medición de covarianza adquiriendo señales a intervalos regulares. La curva de covarianza o STD presenta un máximo bien definido en el borde de la CLA.

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [S(R_i) - \bar{S}(R_i)]^2}{N}}$$

##### 4- Inversión de Klett.

Este método permite determinar el perfil de retrodifusión  $\beta(R)$  producto de la interacción elástica entre la radiación emitida y la atmósfera bajo los procesos Rayleigh y Mie. Tomando la ecuación Lidar<sup>(2,3,4)</sup> y asumiendo condiciones de dispersión simple y atmósfera homogénea se llega a la ecuación:

$$\frac{dS(R)}{dR} = \frac{1}{\beta(R)} \cdot \frac{d\beta(R)}{dR} - \frac{2}{k} \cdot \beta(R)$$

donde

$$\beta(R) = k \cdot \alpha(R)^6$$

donde  $\alpha(R)$  es la atenuación atmosférica a la longitud de onda del emisor láser.

La integración de esta ecuación diferencial se torna inestable cuando la relación de señal a ruido se aproxima a la unidad.

La integración de la ecuación diferencial nos da por debajo y por encima del borde de la CLA las siguientes expresiones:

$$\beta(R) = k \cdot \frac{e^{[S(R) - S(R_0)]}}{\frac{1}{\alpha(R_0)} + 2 \cdot \int_{R_0}^R e^{[S(r) - S(r_0)]} \cdot dr} \quad R < R_0$$

$$\beta(R) = k \cdot \frac{e^{[S(R) - S(R_0)]}}{\frac{1}{\alpha(R_0)} - 2 \cdot \int_R^{R_0} e^{[S(r) - S(r_0)]} \cdot dr} \quad R > R_0$$

donde  $R_0$  es la altura de referencia a la que la relación de señal a ruido se hace unitaria.

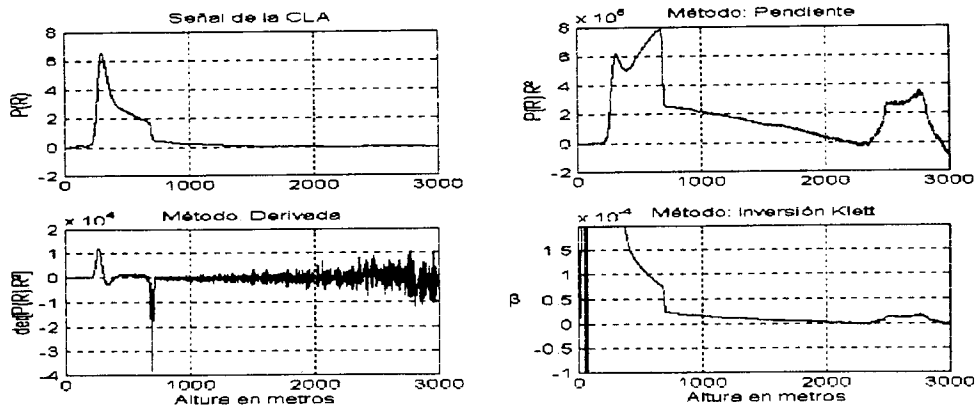


Figura7. Implementación de los métodos de determinación de la CLA.

## V. CONCLUSIONES.

Se han presentado dos métodos para el tratamiento de la señal Lidar de la CLA del tipo causal (C) y no causal (MA). En este sentido se debe destacar que cuando S/N es alta, ambos filtros digitales presentan en apariencia resultados similares. Pero cuando S/N es baja el tratamiento digital la compensa disminuyendo la frecuencia de corte del filtrado tomando mayor número de puntos de señal lo cual baja la resolución de la señal. Por otro lado debemos destacar que el filtrado digital (MA, moving average) por ser no causal (anticipativo) resulta el más adaptado para el tratamiento de la señal de CLA.

Se debe notar que si bien al incrementar el número de puntos de promediación se reduce notablemente el nivel de ruido, se pierde sensibilidad espacial y se distorsiona la señal. Por otro lado todos los métodos de determinación de la CLA necesitan de un filtrado de señales para estabilizar los algoritmos de inversión y disminuir la incerteza en su aplicación.

Con respecto a los métodos de determinación de la CLA es posible señalar que:

- El método de la derivada es un método sencillo, de primer orden, rápido y preciso en su utilización.
- El método de la pendiente es visual y poco preciso y se lo utiliza en general para el proceso de alineación del sistema y seguimiento del monitoreo de la CLA.
- El método de la varianza trabaja sobre una serie temporal de mediciones efectuadas en intervalos regulares, a diferencia de los anteriores, que trabajan sobre una medición en particular.
- La inversión de Klett es el más preciso de los métodos de determinación de la CLA puesto que con él se extrae el perfil de retrodifusión

volumétrico molecular  $\beta[\text{km}^{-1}.\text{sr}^{-1}]$  que es proporcional a la concentración de dispersores.

- En particular cuando se mide en presencia de nubes bajas o en ambientes con alta condensación los métodos de la derivada y de la covarianza resultan imprecisos debido a que la señal aparecerá con varias discontinuidades..

Por último, el método de la pendiente es utilizado casi exclusivamente en el monitoreo visual de la CLA. Los métodos de la derivada y la covarianza de la señal son aplicables por lo general en proceso de expansión de la CLA (capa de mezclado). Por el contrario el método de inversión de Klett es el que más se adapta al monitoreo completo pero, se utiliza en el proceso de contracción de la misma donde los otros métodos se toman imprecisos.

## VI. REFERENCIAS.

1. Ronal B. Stull. "An Introduction to Boundary Layer Meteorologie". Kluwer Academic Publisher's (1994)
2. G.J.Fochesatto, M. Lavorato, C. Rosito, E. Quel, P.H.Flamant, Proceedings of the 5<sup>th</sup> Latin-American Meeting on Optics, Laser and Their Applications. November 20-25 de 1995 La Habana, Cuba, pp312 - 315.
3. M.B.Lavorato, G.J.Fochesatto, E.J. Quel, P.H.Flamant. Proceedings IGARSS' 96. International Geoscience and Remote Sensing, Lincoln, Nebraska, U.S.A. Vol.I pp 2-4.
4. M.B.Lavorato, G.J.Fochesatto, E.J. Quel, P.H.Flamant, J. Pelon. "Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar". Springer, Berlín. (1996). pp. 91-94.