

## Estudio de la conexión entre el Viento Turbulento sobre el observatorio del Teide y la velocidad del viento a 200 milibares.

E.G. Mendizábal<sup>(1),(2)</sup>, B. García-Lorenzo<sup>(1)</sup>, J.J. Fuensalida<sup>(1)</sup>, C. Muñoz-Tuñón<sup>(1)</sup> y A.M. Varela<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias. Tenerife. C/ Via Lactea s/n, 38200 La Laguna, Tenerife, Canarias. [egm@iac.es](mailto:egm@iac.es), [begoña.garcía@iac.es](mailto:begoña.garcía@iac.es), [jjf@iac.es](mailto:jjf@iac.es), [cmt@iac.es](mailto:cmt@iac.es), [avp@iac.es](mailto:avp@iac.es).

<sup>(2)</sup>Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. C/Luis Enrique Erro No.1 Tonantzintla, Puebla, México.

### Resumen

Un parámetro importante propuesto para la selección y evaluación de la calidad de observatorios astronómicos es el viento al nivel de presión de 200 milibares ( $V_{200}$ ). En este trabajo presentamos un amplio estudio de la relación existente entre  $V_{200}$  y el Viento Turbulento ( $V_0$ ) sobre el Observatorio del Teide (OT) en Tenerife. Para este estudio, hemos utilizado datos de la velocidad del viento procedentes del archivo de la NCEP/NCAR (*Nacional Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research*) en 8 niveles distintos de presión atmosférica en el periodo 1980-2002 y analizamos estadísticamente el dominio que tiene  $V_{200}$  en el comportamiento global del perfil de viento troposférico. Por otro lado, utilizando medidas de la intensidad de la turbulencia ( $C^2_n$ ) obtenidas con la técnica *Scintillation Detection and Ranging* (SCIDAR) y medidas de globos del Instituto Nacional de Meteorología (INM), hemos calculado la velocidad del viento turbulento ( $V_0$ ) para el OT, encontrando que existe una relación lineal entre el  $V_0$  calculado y  $V_{200}$ . Este resultado sugiere que la calidad del OT en relación a la turbulencia atmosférica puede estimarse a través del estudio estadístico de  $V_{200}$ .

### 1. Introducción

En la última década se han perfeccionado extraordinariamente los sistemas de óptica adaptativa que tratan de compensar los efectos que ejerce la atmósfera sobre la imagen de los objetos astronómicos. No obstante, el desconocimiento de los valores específicos que caracterizan la turbulencia atmosférica en cada lugar, hace que el diseño y operación de estos sistemas sea muy complejo. En la actualidad se trabaja en los llamados sistemas de óptica adaptativa multiconjugada, cuyo diseño se simplifica si conocemos el comportamiento estadístico de la estructura vertical

de la turbulencia donde el sistema vaya a ser operativo. Por otro lado, los requisitos en cuanto a calidad de imagen de los futuros telescopios, hace necesario caracterizar adecuadamente la turbulencia atmosférica. Los lugares con menor y más estable turbulencia serán los observatorios más adecuados para albergar la próxima generación de telescopios.

Para poder determinar con suficiente precisión los parámetros atmosféricos requeridos en la implementación de óptica adaptativa multiconjugada en telescopios es necesario realizar observaciones de la turbulencia durante varios años o décadas para tener suficiente cobertura estadística. Los estudios que se han realizado hasta el momento sólo cuentan con un número muy limitado de observaciones. Por esta razón, surge la necesidad de encontrar parámetros alternativos que nos permitan hacer estimaciones de  $V_0$ .

Como uno de los parámetros fundamentales para conocer la turbulencia en un determinado lugar es el  $V_{200}$ , en este artículo nos centramos en el perfil vertical del viento con datos de los últimos 23 años, con el fin de poner de manifiesto la utilidad de los archivos de predicción climatológica como herramienta para la caracterización de la turbulencia en observatorios y, en particular, el OT.

Un recurso disponible y que cuenta con una amplia cobertura temporal son los archivos de variables para la predicción climatológica. Estas bases de datos disponen de medidas diarias de varios parámetros atmosféricos obtenidos con diferentes sistemas de medición (globos, satélites, estaciones meteorológicas, etc.). Estos datos, combinados con un modelo 3D de predicción climatológica, permiten simular las medidas meteorológicas en cualquier punto del globo terrestre. Por este motivo, se escogió esta base de datos como herramienta potencial para caracterizar la atmósfera de los observatorios astronómicos en primera aproximación.

## 2. Los Datos

Para la realización de este estudio se utilizó el archivo de datos NCEP-NCAR ([www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml)) para obtener las componentes  $U$  y  $V$  de Viento (dos medidas por noche) en 8 niveles de presión (100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 milibares ) sobre el OT (lat. 16.27W, lon. 28.47N). A partir de las componentes  $U$  y  $V$  para cada nivel de presión se calcularon más de 16000 módulos de la velocidad para cada uno de los 8 niveles de presión en el periodo en estudio, a partir de ahora denominaremos a esta serie de datos OT-S

### 2.1. Validación los datos

Con el fin de comprobar la validez de los datos de la NCEP/NCAR y evaluar su posible utilidad en la caracterización de la turbulencia en observatorios astronómicos, se utilizaron para comparación, más de 12700 medidas directas de viento para cada nivel obtenidas con radiosondas por el Centro Meteorológico Territorial en Canarias Occidental desde su estación de Santa Cruz de Tenerife (lat.16.27W, lon.28.47N). Esta serie de datos la denominaremos OT-M.

Partiendo de las medidas diarias del viento se seleccionaron los datos simultáneos en las series temporales OT-S y OT-M y calculamos el coeficiente de correlación de Pearson entre las dos muestras. Obtenemos un coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0,5 para niveles comprendidos entre 100 y 600 milibares, por lo que las dos bases de datos son consistentes y utilizaremos la serie OT-S para análisis posteriores.

## 3. Análisis

De acuerdo a los resultados de calcular la media mensual del viento para los diferentes niveles (figura 1), encontramos que la velocidad máxima durante todo el año prevalece en el nivel de 200 milibares ( $V_{200}$ ), alcanzando un máximo de velocidad en abril de 34 m/s y una velocidad mínima en julio y agosto de 12,5 m/s, la velocidad promedio anual en  $V_{200}$  es de 23.5 m/s. Para los niveles de 100 a 600 milibares la velocidad del viento a lo largo del año sigue la misma tendencia que  $V_{200}$  aunque con menor intensidad, con máximos en abril y mínimos en julio y agosto. Este comportamiento nos sugiere que el  $V_{200}$  podría dominar el comportamiento del viento en toda la atmósfera. Sin embargo, encontramos que

el mayor gradiente entre velocidades es en abril, con una diferencia de  $\sim 23$  m/s entre  $V_{200}$  (máximo) y  $V_{600}$  (mínimo). Este gradiente va disminuyendo en los siguientes meses, hasta llegar a una diferencia mínima entre niveles de apenas 6m/s en julio y agosto, lo que nos indica que el grado de influencia podría variar en diferentes épocas del año.

### 3.1. Vientos Dominantes

El análisis realizado hasta ahora sugiere una conexión del viento entre los diferentes niveles de estudio. Para analizar esta relación, se ha efectuado el test de Pearson, seleccionando el nivel donde el viento es más intenso ( $V_{200}$ ) para correlacionarlo con el viento en los niveles restantes. De esta manera podemos ver cómo influye  $V_{200}$  sobre el comportamiento global del viento de la tropósfera. Para analizar si cambia el grado de influencia de  $V_{200}$  en diferentes épocas del año, se han seleccionado los datos del mes de abril donde encontramos el máximo gradiente de velocidad en el perfil en todo el año, y por otra parte, seleccionamos los meses de julio y agosto, donde se encuentran los vientos de menor intensidad y menor gradiente de velocidad entre niveles para hacer el mismo análisis de correlación.

En la figura 2 mostramos que existe una alta correlación entre los vientos a diferentes alturas y los vientos más intensos, obteniéndose un índice de Pearson superior a 0.5 en el rango entre 100 y 600 milibares. Por este motivo, se puede afirmar que los niveles de presión donde el viento tiene una mayor intensidad son los que van a determinar el comportamiento del viento en la tropósfera.

El resultado del análisis para julio y agosto (figura 2) indica que el grado de correlación disminuye para todos los niveles y sólo en el rango de 150 a 500 milibares el coeficiente de Pearson está por encima de 0,5. Esto quiere decir que en julio y agosto  $V_{200}$  tiene una menor influencia sobre el viento en tropósfera que en el resto del año. Para el mes de abril (figura 2), donde la intensidad del viento es la mayor de todo el año, los coeficientes de correlación son muy parecidos a los resultados del análisis anual, conservando un coeficiente de Pearson superior a 0.5 en el rango de niveles de 100 a 600 milibares.

Como conclusión a este análisis encontramos que el comportamiento del viento a la altura correspondiente a los niveles de presión entre 100 y 600 milibares está dominado por  $V_{200}$ . Sin embargo,

en los meses de julio y agosto disminuye el grado de influencia en el rango de 150 a 500 milibares teniendo un comportamiento de la atmósfera diferente al que predomina durante el resto del año.

### 3.2. Viento Turbulento

El viento turbulento  $V_0$  viene dado por:

$$V_0 = \left[ \frac{\int_0^{\infty} C_n^2(h) V(h)^{\frac{5}{3}} dh}{\int_0^{\infty} C_n^2(h) dh} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (3.1)$$

donde  $C_n^2$  es el coeficiente del índice de refracción,  $V$  es el perfil vertical del viento y  $h$  es la altura.

En el apartado anterior hemos encontrado que el viento a cualquier altura dentro de la troposfera está relacionado con el viento más intenso. Este resultado sugiere que el viento turbulento, que básicamente se trata de la suma de vientos ponderado por la constante de refracción sobre todo el perfil, podría estar relacionado con los vientos más intensos de la troposfera. Con el fin de probar esta posibilidad, hemos combinado las medidas de  $C_n^2$  obtenidas en nuestras campañas de observación con *SCIDAR* en el OT en 15 noches distribuidas de manera inhomogénea a lo largo del año (debido a las fechas y condiciones de las diferentes campañas de *SCIDAR*) y con medidas simultáneas del viento obtenidas en globos por el INM. Se calcularon las integrales de la ecuación 3.1 sobre el rango de 3700 m (un kilómetro por encima del observatorio) hasta 16000 m (100 milibares) que fue el rango de influencia del viento máximo encontrado en el análisis anterior.

Como la resolución de los perfiles de  $C_n^2$  es de 300mts y la de los perfiles de viento es de 5mts degradamos la resolución de los perfiles de viento para calcular la integral (3.1).

Para comparar los  $V_0$  obtenidos con los vientos troposféricos más intensos, se obtuvo el módulo de viento en los días analizados. Los resultados se muestran en la figura 3. Y con el fin de estudiar si existe una relación lineal entre  $V_{200}$  y  $V_0$  sobre el OT, también se representa en la figura 3, el ajuste lineal de mínimos cuadrados para estos puntos y encontramos un relación lineal de la forma

$$V_0 = 0,19V_{200} + 3,9$$

Aunque en el ajuste obtenemos errores muy altos ( $\chi^2=24$ ), esto puede ser debido al comportamiento singular que tienen los meses de julio y agosto según el análisis previo, donde encontramos que la influencia del viento en estos niveles disminuye en comparación a los otros meses.

En la figura 3 se han señalado en color rojo, los datos obtenidos a finales de junio, julio y agosto. Se puede ver que todos se encuentran por debajo de la recta ajustada. Si realizamos un nuevo ajuste únicamente para los datos de estos meses, la pendiente de la recta ajustada es casi la misma (0,18) al resultado del ajuste global, con una y el error disminuye notablemente ( $\chi^2=0,35$ ). Este resultado no ha podido ser analizado ampliamente debido al reducido número de datos disponibles por el momento, siendo necesario hacer un análisis con una muestra adecuada y así poder obtener una relación de  $V_0$  con  $V_{200}$  con un error menor.

### 4. Conclusiones

De acuerdo al análisis realizado, podemos afirmar que en el observatorio del Teide existe una relación lineal entre el viento turbulento y  $V_{200}$  de la forma:

$$V_0 = 0,19 V_{200} + 3,9$$

Con este resultado podemos estimar el  $V_0$  para el OT con una amplia cobertura estadística a partir del  $V_{200}$  promedio calculado anteriormente ( $V_{200} = 23.5$  m/s) y obtenemos que el  $V_0$  promedio para el OT es de 8.36 m/s.

Si la alta correlación entre  $V_0$  y  $V_{200}$  encontrada para el observatorio del Teide existe también en otros observatorios del mundo, los  $V_{200}$  más bajos y estables estadísticamente indicarían los lugares con menor turbulencia y, por tanto, mejores candidatos para implementar las nuevas técnicas de óptica adaptativa multiconjugada para la nueva generación de telescopios. La validación de la base de datos de predicción climatológica NCEP/NCAR que se ha realizado en este artículo, pone de manifiesto su utilidad para evaluar los observatorios astronómicos en materia de alta resolución espacial y óptica adaptativa con una amplia cobertura estadística.

## 5. Figuras

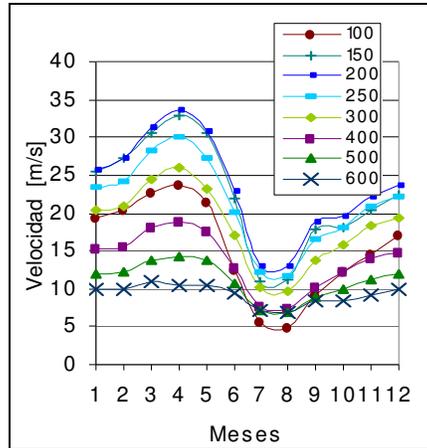


Figura 1: Promedio mensual del viento para niveles de 100 a 700 milibares.

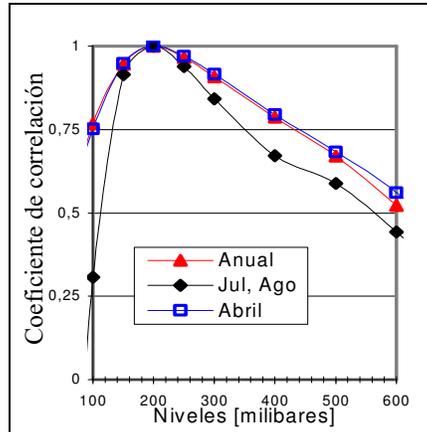


Figura 2: Coeficiente de correlación de Pearson obtenido al comparar el viento a diferentes niveles verticales de presión (100 a 600 milibares) con los  $V_{200}$ .

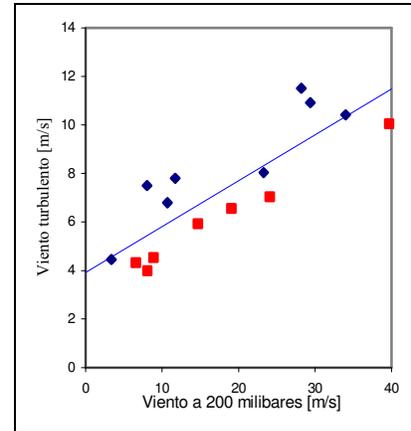


Figura 3 Se representa  $V_0$  (eje Y) calculados contra  $V_{200}$  (eje X) además, la recta que mejor ajusta por mínimos cuadrados a los puntos.

## 6. Referencias

- [1] Sarazin M. Tokovinin A. "The statistics of isoplanatic angle and adaptive optics time constant derived from DIMM data" *Beyond Conventional Adaptive Optics I* Venice, Italy. (2001).
- [2] Rocca A., Roddier F., & Vernin J. "Detection of atmospheric turbulent layers by spatiotemporal an spatioangular correlation measurements of stellar scintillation" *J. Opt. Soc. Am.* 64, 1000 (1974)
- [3] García-Lorenzo, *et al.* "Detailed study of 200 mbar wind speed at the Canary Islands." *Proc. SPIE*, Backaskog, Sweden (2004).
- [4] "NationalCenter for Environmental Prediction/ Nacional Center for Atmospheric Research" [www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml)
- [5] Chueca, *et al* "Statistics and analysis of high-altitude wind above the Canary Islands observatories." *MNRAS* (2004)