

Archivos de diagnóstico del clima: una herramienta para evaluar la calidad de los observatorios astronómicos

B. García-Lorenzo⁽¹⁾, J.J.Fuensialida⁽¹⁾, E.G. Mendizabal^(1,2), C.Muñoz-Tuñón⁽¹⁾ y A.M. Varela⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Astrofísica de Canarias. C/ Vía Láctea, S/N, 38200 La Laguna. Tenerife. Canarias. bgarcia@iac.es, jjf@iac.es, egm@iac.es, cmt@iac.es, avp@iac.es.

⁽²⁾ Instituto Nacional de Astronomía, Óptica y Electrónica, Tonanzintla, Puebla, México

Resumen

Los modelos de diagnóstico del clima combinan datos de diferentes fuentes (satélites, globos, mástiles meteorológicos, etc) con modelos numéricos para evaluar las condiciones climatológicas y su evolución temporal en localizaciones geográficas específicas o a escala global. Los resultados de estos modelos son almacenados en bases de datos de largo periodo que pueden constituir una fuente de datos muy útil para la evaluación y caracterización de observatorios astronómicos. En este trabajo se presenta el análisis estadístico de perfiles verticales de viento obtenidos de archivos de predicción climatológica y medidas directas tomadas con globos meteorológicos para cinco importantes observatorios situados en La Palma (España), Hawaii (Estados Unidos), La Silla (Chile), Paranal (Chile) y San Pedro Mártir (México). Los perfiles verticales de viento son un importante parámetro a tener en cuenta en la evaluación de la calidad de los observatorios astronómicos en relación a la implementación de sistemas de óptica adaptativa, dispositivos que permiten corregir los efectos de la turbulencia atmosférica sobre las imágenes astronómicas.

1. Introducción

La preocupación por el cambio climático y sus fuertes implicaciones sobre la sociedad humana y la vida en nuestro planeta han impulsado un importante desarrollo de los modelos de diagnóstico del clima. Los estudios de predicción climatológica combinan datos de largo periodo de diversas variables climatológicas, incluyendo datos de globos meteorológicos y satélites, con modelos numéricos sofisticados, con el fin de estudiar las condiciones climáticas pasadas, presentes y futuras en un lugar concreto o globalmente. Los archivos de predicción climatológica proporcionan variables meteorológicas (viento, temperatura, humedad, etc) con una resolución espacial y temporal aceptable para la evaluación y control de calidad de las

condiciones meteorológicas predominantes en los observatorios astronómicos. Con el fin de ilustrar la aplicación de datos de los archivos de diagnóstico del clima a la caracterización de observatorios astronómicos, presentamos en este trabajo un estudio detallado de los perfiles verticales de viento en cinco de los observatorios más importantes del mundo.

La calidad de un observatorio astronómico se evalúa de acuerdo a sus condiciones meteorológicas predominantes. Los requerimientos exigidos para alcanzar la mejor calidad de imagen de los actuales grandes telescopio (telescopios de 8 y 10 metros) o de los futuros telescopios gigantes de más de 50 metros hacen necesario el perfecto conocimiento de las condiciones meteorológicas y la adecuada caracterización de la turbulencia atmosférica. En la actualidad se tiene poca información de turbulencia atmosférica y su estructura en los diferentes observatorios del mundo. Por este motivo, se necesita buscar parámetros alternativos que nos den idea de la turbulencia media. En este sentido, los vientos de altura, en particular, el viento al nivel de presión de 200 milibares ha sido propuesto como un parámetro relacionado con el viento turbulento total en un determinado lugar. La elección de este parámetro está basado en un resultado empírico encontrado en los observatorios de Paranal y Cerro Pachón (Chile) que conecta la velocidad media de la turbulencia (V_0) a nivel del suelo con los vientos al nivel de 200 milibares (V_{200}), de forma que: $V_0 = 0.4 \times V_{200}$ (Sarazin & Tokovinin 2002). El cálculo de V_0 requiere conocer el perfil vertical de viento ($V(h)$) y la intensidad de la estructura vertical de la turbulencia ($C_N^2(h)$) de acuerdo a la ecuación:

$$V_0 = \left[\frac{\int_0^{\infty} C_N^2(h) V(h)^{5/3} dh}{\int_0^{\infty} C_N^2(h) dh} \right]^{3/5} \quad (1)$$

Una relación tan simple como la encontrada en Paranal y Cerro Pachón simplificaría enormemente los cálculos de diversos parámetros, tales como el tiempo de coherencia, importantes para el diseño e implementación de los sistemas de óptica adaptativa en los observatorios astronómicos. No obstante, la fuerte dependencia de V_0 con el perfil vertical de turbulencia hace difícil pensar que una relación tan simple se pueda generalizar. A pesar de que esta relación lineal no ha sido comprobada en ningún otro observatorio astronómico, V_{200} se ha adoptado como un parámetro importante a tener en cuenta en la búsqueda de los observatorios idóneos para la construcción de los futuros telescopios gigantes de 100 metros. De hecho, existen ya varios trabajos comparando los valores medios de V_{200} en diferentes observatorios (García-Lorenzo et al. 2005; Carrasco, Ávila & Carramiñana 2005; Chueca et al. 2004; Sarazin 2002).

La ecuación (1) indica una relación lineal entre V_0 y el perfil vertical de viento. Esto sugiere que V_0 puede ser proporcional al viento dominante a una altura determinada siempre que exista un alto grado de correlación entre los vientos a diferentes niveles y que la turbulencia varíe suavemente con la altura. En este caso, podría existir una dependencia de V_0 con V_{200} . No obstante, esto no significa que exista una conexión entre la turbulencia total a nivel del suelo y V_{200} , como se ha estado asumiendo en los últimos tiempos entre la comunidad astronómica interesada en óptica adaptativa.

La comparación de la ecuación (1) y la relación lineal encontrada por Sarazin & Tokovinin (2002) en Paranal y Cerro Pachón sugiere que el análisis de los perfiles de viento y el estudio de la conexión de viento a alto y bajo nivel podría ayudar a extender la relación $V_0 = 0.4 \times V_{200}$ a otros lugares sin necesidad de conocer $C_N^2(h)$.

Los archivos de predicción climatológica constituyen una fuente inmensa de datos de perfiles verticales de viento en todo el mundo. Como ejemplo de la aplicabilidad de datos procedentes de estos archivos como apoyo a la caracterización de observatorios astronómicos, presentamos en este trabajo un estudio estadístico detallado de los perfiles verticales de viento en cinco importantes localizaciones: Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma, España; Observatorio de Mauna Kea, Hawai, Estados Unidos, Observatorio de La Silla, Chile, Observatorio de Paranal, Chile y Observatorio de San Pedro Mártir, México.

2. Los Datos

Los perfiles de viento utilizados en este trabajo han sido obtenidos del archivo del NCEP: Nacional

Center for Environmental Prediction a través de su página web (<http://www.cdc.noaa.gov>). Hemos utilizado más de 33600 medidas individuales para cada uno de los observatorios a analizar. El periodo elegido para este estudio ha sido de 23 años (1980-2002). Esta base de datos de predicción del clima hace uso de un modelo de interpolación tridimensional para obtener los perfiles de viento en 45 niveles verticales y una resolución horizontal de 32 km en la localización seleccionada por el usuario mediante sus coordenadas (Kistler et al. 2001).

Con el fin de validar los resultados obtenidos a través del modelo de predicción climatológica, se han utilizado también perfiles verticales de viento obtenidos con radiosondas. Hemos encontrado una excelente correlación entre los datos del archivo de predicción del clima y los medidos con los globos meteorológicos (García-Lorenzo et al. 2005).

3. Análisis de los datos

3.1. Conexión entre vientos a alto y bajo nivel

Con el fin de estudiar la relación entre vientos a diferentes niveles, como una primera aproximación a una conexión lineal entre V_0 y V_{200} , hemos comparado las medidas diarias individuales en cada nivel de presión en los que disponemos datos con las medidas simultáneas al nivel de 200 milibares. Los coeficientes de Pearson resultantes se muestran en la figura 1, encontrándose un alto grado de correlación entre los vientos en los distintos niveles y V_{200} . Los vientos en los niveles más bajos pueden estar afectados por la orografía de cada lugar particular, desviándolos de un comportamiento lineal. La figura 1 muestra una conexión similar entre el V_{200} y los vientos a otros niveles en La Palma, La Silla, Paranal y San Pedro Mártir. Esto podría indicar una relación entre V_{200} y V_0 en estos observatorios similar a la encontrada en Paranal (Sarazin & Tokovinin 2002).

3.2. Estadística y comportamiento estacional

La figura 2 muestra los perfiles verticales de viento promedio derivados para cada observatorio en estudio. El máximo de velocidad en estos perfiles de viento se alcanza siempre al nivel de 200 milibares, excepto en Mauna Kea durante el mes de Mayo, donde el máximo está en 150 milibares. La Palma, Mauna Kea y San Pedro Mártir muestran un comportamiento estacional bien definido, con vientos más altos en invierno y más bajos en verano. Estadísticamente, Paranal y La Silla presentan fuertes vientos durante largo periodo, con vientos más suaves sólo durante Enero y Febrero.

San Pedro Mártir presenta el mayor gradiente de velocidades, mientras que el menor corresponde a La Palma.

3.3. Estadística de V_{200}

En la figura 3 se muestra el promedio mensual de V_{200} en los observatorios seleccionados, donde se observa una clara tendencia estacional en el comportamiento de los vientos de altura. En la tabla 1 presentamos los resultados estadísticos globales de V_{200} en los distintos observatorios estudiados. Estadísticamente, La Palma presenta el valor promedio más bajo de V_{200} , mientras que la amplitud de la variación estacional es de tan sólo 13.69 m/s. El 50% de los valores de V_{200} son inferiores a 21 y 23 m/s en La Palma y Mauna Kea, respectivamente, superando los 32 m/s sólo el 10% del tiempo. En cambio, en Paranal y La Silla V_{200} es superior a 32 m/s la mitad de las veces.

Tabla 1: Resultados estadísticos del viento al nivel de 200 milibares obtenidos para el periodo 1980-2002. La amplitud es la diferencia entre el máximo y el mínimo estadístico. Los valores están dados en m/s.

Lugar	Amplitud	Media	RMS
La Palma	13.69	22.13	0.06
La Silla	12.46	33.35	0.07
Mauna Kea	18.00	24.33	0.07
Paranal	18.47	30.05	0.07
San Pedro	26.49	26.55	0.08

4. Discusión y Conclusiones

La similitud de la curva de correlación conectando vientos a distintos niveles con V_{200} (figura 1) en distintos lugares del mundo podría indicar una conexión similar entre V_{200} y V_0 a la encontrada en Paranal (Sarazin & Tokovinin 2002). No obstante, las marcadas diferencias entre los perfiles de viento en los distintos observatorios sugiere todo lo contrario. De nuestros resultados se deriva que podría existir una dependencia estacional no sólo de los perfiles de viento, sino también de la “constante” de proporcionalidad de la posible relación lineal entre V_0 y V_{200} en cualquier observatorio. Esta constante podría diferir enormemente en unos lugares y otros, ya que depende fuertemente del perfil vertical de turbulencia.

Los resultados estadísticos presentados aquí apuntan a los archivos de predicción climatológica como una fuente de datos útil para la evaluación y caracterización de observatorios astronómicos. Los

resultados y conclusiones más relevantes de este trabajo podrían resumirse en:

- La Palma es la mejor localización de las estudiadas en términos de V_{200} como parámetro de calidad de observatorios astronómicos. La Silla se sitúa en el último, con un valor medio de V_{200} de 33.35 m/s.
- Hemos encontrado una clara dependencia estacional de los vientos en los distintos observatorios estudiados.
- Hemos encontrado un grado de correlación alto entre vientos a distintas alturas, lo que apoya la idea de una relación lineal entre V_{200} y la velocidad media de la turbulencia (V_0) en los observatorios analizados. No obstante, el coeficiente de proporcionalidad de esta relación podría diferir enormemente en los distintos observatorios, dadas las grandes diferencias de los perfiles de viento y su comportamiento estacional.
- Los resultados de este trabajo no confirman la relación lineal entre V_0 y V_{200} en los observatorios estudiados, sólo que existe una conexión entre los vientos a diferentes niveles con V_{200} . V_0 depende fuertemente de la estructura vertical de turbulencia en cada lugar (ecuación 1) y, por lo tanto, la relación lineal no puede ser establecida sin un conocimiento adecuado de las características específicas de la turbulencia atmosférica. Si la relación lineal se pudiera generalizar a cualquier observatorio del mundo, se podría calcular de forma más sencilla ciertos parámetros imprescindibles para el diseño y operación de sistemas de óptica adaptativa, con el fin de corregir los efectos de la turbulencia sobre las imágenes astronómicas.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado utilizando datos del NCEP Reanalysis del NOAA-CIRES obtenidos de su página web (<http://www.cdc.noaa.gov/>). Nuestra investigación está parcialmente financiada por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología (AYA2003-07728). Los resultados presentados aquí han sido validados utilizando datos de globos obtenidos por el Centro Meteorológico en Canarias Occidental, perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología (<http://www.inm.es>).

6. Referencias

- [1] Carrasco, E., Ávila, R., & Carramiñana, A. 2005, PASP, 117, 104
- [2] Chueca, S., García-Lorenzo, B., Muñoz-Tuñón, C., Fuensalida, J.J., 2004, MNRAS, 349, 627
- [3] García-Lorenzo, B., Fuensalida, J.J., Muñoz-Tuñón, C., & Mendizábal, E. 2005, MNRAS, 356, 849
- [4] Sarazin, M. & Tokovinin, A. 2002 in Vernet E., Ragazzoni, R., Esposito, S., Hubin, N., eds, Proc. 58th ESO Conf. Workshop, Beyond Conventional Adaptive Optics. ESO Publications, Garching, p.321
- [5] Sarazin, M. 2002, ESPAS Site Summary Series: Mauna Kea, Issue 1.1

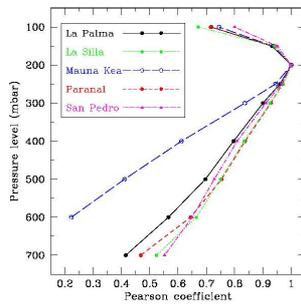


Figura 1: Coeficiente lineal de Pearson obtenido de la comparación de las medias diarias de viento a diferentes niveles de presión con los vientos a 200 milibares.

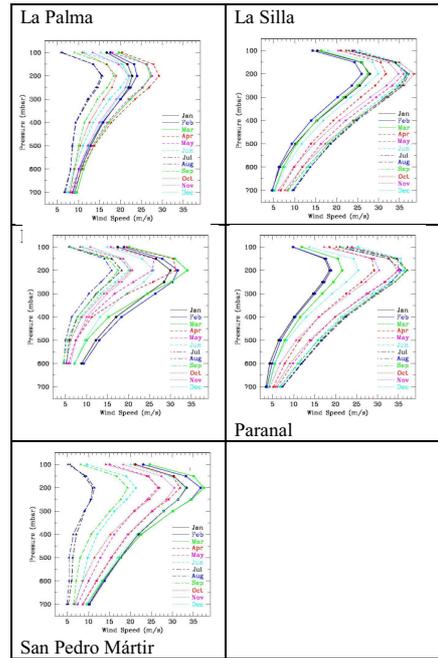


Figura 2: Perfiles de viento mensuales promedio para el periodo 1980-2002 en los niveles de presión indicados obtenidos para los observatorios astronómicos indicados

Figura 3: Comparación del promedio mensual del viento al nivel de 200 milibares obtenidos para el periodo 1980-2002 en los cuatro observatorios seleccionados.

