

CLASIFICACIÓN DE LAS NUBES A PARTIR DE DATOS DE RADIACIÓN E IMÁGENES DE UNA CÁMARA DE CIELO

Martínez-Chico, M.⁽¹⁾, Batlles, F.J.⁽²⁾

⁽¹⁾ Dpto. Didáctica de la matemática y de las ciencias experimentales. Universidad de Almería, 0412 Almería, maria.martinez.chico@gmail.com

⁽²⁾ Dpto. Física Aplicada. Universidad de Almería, 0412 Almería, fbatlles@ual.es

1. RESUMEN

El conocimiento preciso de la cantidad de nubes presentes en el cielo es fundamental para evaluar los recursos energéticos solares de una determinada localidad. Las nubes son la principal causa de atenuación de la radiación solar; por ello se hace necesario el análisis tanto de la posición de la nube con respecto al sol, como los niveles de atenuación producidos por la misma.

A lo largo de los años, el estudio de la cobertura nubosa y la influencia que ésta ejerce en la radiación en superficie, se ha abordado aplicando distintas metodologías, y a partir de datos de diferente naturaleza. Por una parte, encontramos autores que basan sus trabajos en imágenes de satélite, pero en los últimos años, el estudio de la cobertura nubosa también se está abordando mediante el uso de imágenes realizadas con cámaras de cielo.

En este trabajo se caracteriza la cubierta nubosa según niveles de atenuación de la radiación solar, para lo que se utiliza un índice adimensional k_b , definido como el cociente entre la radiación directa incidente sobre la superficie terrestre y la radiación solar extraterrestre.

2. INTRODUCCIÓN

El análisis de la magnitud e intensidad de la radiación que llega a la superficie y los mecanismos que controlan su transmisión en la atmósfera, resulta de gran importancia. La radiación solar afecta a procesos tan variados como el calentamiento del aire y del suelo, la fotosíntesis, el viento, producción de energía, etc., razón por la cual es considerada un parámetro clave en estudios relativos a la agricultura, hidrología, análisis medioambiental o energías renovables.

Para evaluar la cantidad de radiación que llega a la superficie, se deben considerar determinados factores que influyen en su transmisión en la atmósfera, entre los cuales cabe destacar a las nubes,

debido a su importante papel como principal atenuador de la radiación solar en la atmósfera. Hoy día las nubes son uno de los componentes más complejos del sistema atmósfera, pero como sabemos, su estudio resulta necesario a la hora de abordar el campo de la radiación solar, debido a la gran influencia que ejercen en los niveles de radiación que llegan a la superficie. No obstante, la cobertura nubosa presenta una elevada variabilidad espacial y temporal, que es especialmente responsable de una clara variación de la radiación.

A lo largo de los años, el estudio de la cobertura nubosa y la influencia que ésta ejerce en la radiación en superficie, se ha abordado aplicando distintas metodologías, y a partir de datos de diferente naturaleza. Históricamente, las medidas desde superficie de las nubes, se realizaban mediante observaciones humanas, que distinguían tipos de nubes en función de su aspecto, pero cuya toma de datos resultaba cara y quizá demasiado subjetiva. Así, comenzaron a emplearse nuevas técnicas para la recogida de datos.

En los últimos tiempos se ha caracterizado a las nubes mediante imágenes de satélite; existen métodos para obtener la nubosidad y tipo de nubes a partir de las imágenes de Meteosat (Sèze et al., 1999), aunque estos métodos suelen presentar errores tanto en la determinación de la nubosidad como en la detección del tipo de nubes (Romanov, 1999). Otros, McKenzie et al., 1998 evalúan la estimación del efecto de la cobertura nubosa en la radiación UV a partir de datos de satélite. Mefti et al., 2007 estiman la radiación solar global horaria con imágenes de satélite, basándose en una clasificación de la cubierta nubosa.

Recientemente el estudio de la cobertura nubosa se está abordando mediante el uso de imágenes realizadas con cámaras de cielo. Pfister et al., 2003 comparan dos dispositivos de este tipo con datos de radiación en superficie, analizando las situaciones en las que las nubes provocan aumentos o disminuciones en la radiación, y el efecto neto en la irradiancia superficial. Sabburg y Long, 2004 examinan la importancia del estudio de los efectos

de las nubes en la radiación solar que llega a superficie; afirman que el uso de todas las imágenes de cielo ofrece la posibilidad de entender y cuantificar los efectos de nubes con mayor precisión. Kassianov et al., 2004 evalúan la relación entre la fracción nubosa vista desde el nadir y la cobertura de cielo con un campo de visión hemisférico, mediante el uso de modelos de simulación y observaciones de superficie. Los resultados sugieren que para un promedio de 15 minutos, la fracción de cobertura de cielo dada con el campo de visión de 160° siempre sobrestima la fracción de nubes correspondiente a una visión desde el nadir. Posteriormente Kassianov et al., 2005 estiman la altura de la base de la nube a partir de dos cámaras de cielo (TSI), gracias al campo de visión hemisférico de ambas, y producen series de datos de la fracción de cobertura nubosa (pero aplicable a una sola capa de nubes). Long et al., 2006 realizan una caracterización de las nubes a partir de imágenes de cielo en color tomadas desde superficie durante el día; los métodos de procesado de la cubierta nubosa se comparan con observaciones directas y análisis visual de las imágenes de cielo.

Aunque puede existir cierta fluctuación en cuanto a la fracción de cielo cubierta, esta no es mayor que la debida a las observaciones humanas; así, la aplicación de técnicas de procesamiento automático de imágenes digitales en imágenes de cielo puede resultar un método útil para complementar las tradicionales observaciones humanas de la cobertura nubosa, eliminando con ello la componente subjetiva de estas; además, las posibilidades de inferir parámetros de las nubes tales como grado de fracturación o la obstrucción del disco solar mejora aún más la utilidad de las cámaras de cielo; a pesar de ello, la detección automatizada de la cobertura nubosa es un campo relativamente nuevo, sin gran cantidad de literatura ni de algoritmos desarrollados.

El objetivo de este trabajo es realizar una descripción estadística de las características observadas en las nubes que obstruyen el disco solar, basándonos en el análisis de las imágenes realizadas con una cámara de cielo hemisférica relacionadas con diferentes valores de atenuación en la radiación directa. Para ello se analizarán las características macrofísicas de los distintos tipos de nubes clasificados en función del coeficiente k_b (Radiación Directa/Radiación Extraterrestre); además se observará la permanencia o el tiempo que perdura cada episodio nuboso obstruyendo al disco solar.

3. DATOS EXPERIMENTALES

En este apartado se analizan los datos experimentales utilizados en el trabajo. En primer

lugar se presentan los datos de radiación, y posteriormente las imágenes de cielo.

Ambos tipos de datos son registrados en una estación radiométrica situada en la Universidad de Almería (36.83° N, 2.41° W); se trata de una zona con unas condiciones climatológicas un tanto peculiares que resultan de interés: Nos encontramos en un emplazamiento situado a orillas del Mediterráneo, en el extremo SE de la Península Ibérica, afectado por una disposición orográfica que dificulta la afección por influencias marítimas atlánticas, lo cual determina que la provincia de Almería sea la más árida y seca de las provincias mediterráneas, caracterizándose por una escasa pluviometría anual pero con gran irregularidad estacional. No obstante, presenta uno de los niveles más altos de insolación, con un promedio anual superior a las 3000 horas de sol, lo cual la convierte en especialmente apropiada para la realización de estudios radiométricos y el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía como la solar.

Se han utilizado medidas de radiación solar global, difusa y directa, en superficie, siendo la duración del espacio de tiempo estudiado de 4 meses. Las medidas de radiación solar global y difusa (en superficie horizontal) son realizadas por piranómetros Kipp & Zonen modelo CM11, mientras que las de radiación directa (en incidencia normal) se adquieren gracias a un pirheliómetro Kipp & Zonen modelo CH1. Ambos se encuentran anclados a un seguidor solar en dos ejes Kipp & Zonen (2AP). El sistema de adquisición de datos consiste en un Compact Field Point de 16 bits de resolución, con tarjetas de adquisición.

Se han analizado 63954 imágenes en total, cubriendo un periodo temporal coincidente con los datos radiativos. Se trata de imágenes de alta resolución (352×288) en color (24-bit) que son guardadas en formato JPEG, para su posterior almacenamiento o estudio. Éstas se realizan con una cámara de cielo autónoma, TSI-880, fabricada por Yankee Environmental Systems (YES) Incorporated, que posee un campo de visión hemisférico. Este dispositivo consiste en una cámara CCD (o dispositivo de cargas eléctricas interconectadas) que fotografía un reflejo hemisférico dotado con rotación automática, que a su vez lleva adherida una 'banda de sombra' para evitar que los componentes ópticos de la cámara sean dañados por la luz reflejada del disco solar.

En el presente trabajo se han utilizado datos (tanto valores de radiación como imágenes) correspondientes a alturas solares superiores a 5° . Además, ambos equipos receptores de los mismos están sincronizados (en tiempo universal

coordinado) para lograr una base de datos homogeneizada, con valores que resulten comparables.

4. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología utilizada para realizar la clasificación en diferentes tipos de nubes, y analizar las características macroscópicas de las mismas, en función de las atenuaciones que producen en la radiación solar directa.

4.1 Tratamiento de datos radiométricos

Diferentes investigadores como Orgill y Holland, 1977, han caracterizado los efectos de la cubierta nubosa utilizando medidas de radiación global, a partir de dos índices adimensionales: La 'fracción difusa' horaria, k , definida como el cociente entre la irradiancia difusa y la irradiancia global, y el 'índice de claridad' horario k_t , definido como el cociente entre la irradiancia global y la irradiancia extraterrestre. El índice de claridad k_t nos da idea de la cantidad de nubes presentes en la atmósfera; y la fracción difusa k nos informa acerca de la turbiedad de la misma. Así, valores elevados de k_t están asociados con cielos despejados, mientras que los valores bajos se asocian a condiciones cubiertas de cielo; por otro lado, en situaciones donde el valor de k sea bajo, encontramos cielos con poca turbiedad. Si combinamos ambos índices se pueden dar distintas situaciones: Para valores altos de k_t y bajos de k , encontramos cielos despejados y con poca turbiedad, mientras que, por el contrario, para valores bajos de k_t y altos de k , el cielo estará cubierto y con elevada turbiedad.

En nuestro estudio vamos a caracterizar la cubierta nubosa según niveles de atenuación de la radiación solar. Para ello utilizaremos el índice de transmitancia atmosférica k_b , definido como el cociente entre la radiación directa y la radiación extraterrestre. Valores altos de k_b están asociados a condiciones de cielo despejado; mientras que valores bajos de k_b pueden deberse, bien a cielos cubiertos, o bien a procesos de dispersión provocados por la presencia de aerosoles.

4.2 Clasificación de imágenes

A partir del conjunto de imágenes se procede a realizar la clasificación de las nubes, pero sólo de aquellas que se encuentren obstruyendo al disco solar en el momento de su captura; razón por la cual nos basamos en el parámetro k_b , pues éste depende de las atenuaciones en la radiación directa que estas nubes provocan.

En la tabla 1 se muestran los criterios en los que nos hemos basado para realizar dicha clasificación; se ha

considerado el nivel del valor de k_b , en función del cual se considera a una nube perteneciente a un tipo o a otro, definiéndose finalmente tres tipos:

Tipo de Nube	Nivel de k_b
1	Bajo
2	Intermedio
3	Alto

Tabla 1.- Niveles de k_b considerados para la clasificación

Las imágenes de la cámara se relacionan con los valores de radiación, agrupando aquellas imágenes en las que las nubes han producido una atenuación de la radiación directa tal, como para pertenecer a un mismo tipo de nube en nuestra clasificación. Finalmente obtenemos 3 grupos de imágenes de cielo, que procedemos a analizar para extraer la información más característica de cada uno, y los posibles rasgos o particularidades, que de forma iterativa se puedan apreciar en los mismos.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se va a clasificar la cubierta nubosa en función de la atenuación que provoca en la radiación solar directa, y también se analizará la periodicidad de los diferentes episodios nubosos.

Tipo 1 (Valores de K_b bajos)

La atenuación producida por este tipo de nubes, se debe fundamentalmente a la presencia de nubes muy opacas que obstruyen el disco solar, o bien a la existencia de aerosoles a primeras horas de la mañana.

La primera situación se puede observar en la figura 1. Generalmente se trata de cielos completamente cubiertos, donde las nubes poseen un tono grisáceo y un aspecto que denota una elevada opacidad, propia de nubes bajas o de desarrollo vertical.



Fig. 1.- Imagen correspondiente al tipo de nube 1 (situación de cielo completamente cubierto).

Además, este tipo está presente en la totalidad de los días, en los primeros momentos de la mañana y al atardecer. Esto se debe básicamente a que en estos casos el disco solar aún se encuentra a una altura sobre el horizonte muy baja, viéndose por tanto la radiación fuertemente atenuada por aerosoles propios de la zona donde se desarrolla el trabajo. Se puede observar en la figura 2, donde se denota cierta

dispersión como consecuencia de la presencia de aerosoles.

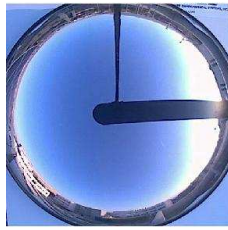


Fig. 2.- Imagen correspondiente al tipo de nube 1 (primeros momentos del día)

No obstante, en ocasiones encontramos nubes que igualmente se caracterizan por provocar una gran opacidad en la radiación, pero que no son propias de cielos totalmente cubiertos (como las mencionadas), sino que, en días despejados, de forma esporádica y durante breves periodos de tiempo, a lo largo de su transcurso, la nube que se desplaza aislada, se posiciona obstruyendo el disco solar por unos momentos, provocando atenuaciones en la radiación bastante considerables. Estas son nubes de color blanco y aspecto algodonoso por lo general, aunque en ocasiones también adquieren aspecto lenticular.

Tipo 2 (Valor de K_b intermedio)

Habitualmente se trata de nubes de reducida opacidad, generalmente finas y de considerable altura, resultando leve la atenuación que producen en la radiación; se pueden observar en la figura que sigue.



Fig. 3.- Imagen correspondiente al tipo de nube 3.

En otros casos se trata de condiciones de cielo aparentemente despejadas, donde no se aprecia ningún borde de nube con nitidez, pero sin embargo son situaciones en las que se denota una gran turbiedad en la atmósfera, que se hace palpable gracias a la gran dispersión observada en las proximidades del disco solar, y a los valores de atenuación de la radiación (figura 4).

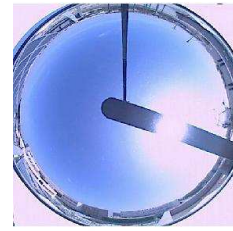


Fig. 4.- Imagen correspondiente al tipo de nube 3.

En numerosas ocasiones este tipo de condiciones de cielo se corresponden con situaciones de tránsito de masas nubosas de considerable opacidad obstruyendo el disco solar, que en algunas zonas se ven adelgazadas, produciéndose por tanto una disminución en la atenuación de la radiación provocada por las mismas, y siendo consideradas en esos revés periodos de tiempo, como pertenecientes al tipo 2.

Tipo 3 (Valor K_b alto)

Las nubes correspondientes a este tipo normalmente se dan en los momentos más céntricos del día (ni en las primeras ni en las últimas horas del día), raramente aparecen en otras ocasiones.

Para este tipo de nubes, es posible que se produzcan distintas situaciones:

- Cielos completamente despejados en ocasiones con cierta turbiedad apreciable en torno al disco solar. La figura 5 muestra una imagen típica de este tipo de situaciones.

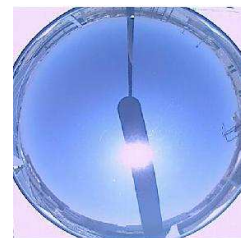


Fig. 5.- Imagen correspondiente al tipo 4.

- Cielos completamente despejados con algunas nubes altas muy finas (con aspecto de cirros) con cuya presencia la radiación prácticamente no se ve atenuada.

- Situaciones de tránsito de nubes. A pesar de que generalmente las nubes actúan reduciendo la radiación solar en superficie, hay determinadas situaciones en las que éstas pueden provocar valores en los niveles de radiación por encima de los esperados para cielo despejado. Este fenómeno, conocido como “efecto lente” o “efecto lupa” tiene lugar durante el transcurso de determinadas nubes blancas muy fracturadas, relativamente altas y cuyo borde aparece bien perfilado (Fig. 6).

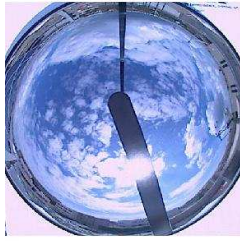


Fig. 6.- Imagen correspondiente al tipo de nube 4. Nubes fracturadas (“efecto lupa”)

Antes y después de que el disco solar sea obstruido, se alcanzan elevados valores puntuales de la radiación global, ya que la directa no es atenuada, (puesto que aún no se ha ocultado el sol) y la difusa se ve aumentada por la proyección de la radiación que realiza el borde de la nube, provocándose estas alzas de breves periodos de duración en la radiación global, los cuales no serían detectados si el periodo de muestreo fuera superior al utilizado, con datos horarios o diarios.

Hora UTC	Rad. Global	Rad. difusa	Rad. Directa Normal	k_t	k
11:44	1041.34	398.28	829.42	0.98	0.38

Tabla 1.- Datos radiativos correspondientes a la figura 7.

Se ha analizado la duración de los episodios correspondientes a cada tipo de nube, y la frecuencia de ocurrencia de los mismos.

Por una parte se extrae que los episodios de mayor duración corresponden al tipo 1 (máxima atenuación), ascendiendo su permanencia incluso a cerca de 10 horas en alguna ocasión; esto se debe a que se suelen producir situaciones de cielo completamente cubierto, y una vez esto ocurre se prolonga bastante en el tiempo, no suele tratarse de apariciones esporádicas de nubes que desaparecen rápidamente.

Algo similar ocurre con bajas atenuaciones de la radiación, cuyo periodo de ocurrencia continuada alcanza igualmente elevados valores. Es decir, se dan situaciones donde los niveles de atenuación producidos por las condiciones de cielo en determinados días no varían durante un periodo extremadamente prolongado de tiempo.

Por otra parte, también se puede apreciar la elevada cantidad de episodios correspondientes al tipo 2 de tan sólo uno o dos minutos de duración; como se ha comentado, suelen ser situaciones de paso, que rara vez se prolongan en el tiempo.

Para tener una visión general sobre la presencia de cada tipo en el periodo de estudio en la localidad donde se localiza la investigación, se ha analizado y

representado la proporción de los datos que corresponde a cada tipo. Se denota una clara relevancia del tipo 2, con cerca de un 50% del total correspondiente a este tipo; es decir, la mayoría de las atenuaciones en la radiación directa que han tenido lugar en el periodo de muestreo (con alturas solares superiores a los 5°), se corresponden con valores de k_b intermedios. Le sigue en abundancia, encontrándose más o menos equiparados, el tipo 1.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una clasificación en diferentes tipos de nubes, en función de la atenuación producida por las mismas en la radiación solar directa en incidencia normal. Dicha atenuación es cuantificada gracias a un índice adimensional k_b , definido como el cociente entre la radiación solar directa y la radiación solar extraterrestre. Para realizar la clasificación se han utilizado datos de radiación solar e imágenes de cámara de cielo.

Como se ha podido observar, k_b puede resultar un índice muy representativo de la atenuación producida por las distintas nubes, permitiendo caracterizar visualmente (gracias a las imágenes de la cámara de cielo) a aquellas nubes, que, al encontrarse obstruyendo el disco solar, implican cierta atenuación en la radiación solar directa.

Además se ha realizado un estudio de la permanencia en el tiempo de cada tipo de nube clasificado, y la frecuencia de ocurrencia de los mismos. Así como se ha analizado el porcentaje de datos correspondiente a cada nivel de atenuación para el periodo de tiempo y la zona de estudio considerados.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa GEMASOLAR 2006 S.L. la financiación de este trabajo.

7. REFERENCIAS

Orgill J.F. y Holland, K., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy* 19, 357-359

McKenzie, R., Bodeker, G., Liley, J., Sturman, A., & Paulin, K., 1998. Cloud cover measured by satellite and from the ground: relationship to UV radiation at the surface. *International Journal of Remote Sensing*. 103

Sèze, G., Vanbauce, C., Burie, J. C., Parol, F., and Couvert, P., 1999. Cloud cover observed simultaneously from folder and Meteosat. *Physics*

and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 24, 921-926

Romanov, P., O'Neill, N. T., Royer, A., and McArthur, B. L. J., 1999. Simultaneous Retrieval of Aerosol Refractive Index and Particle Size Distribution from Ground-Based Measurements of Direct and Scattered Solar Radiation. *Applied Optics*, 38(36), 7305-7320.

Pfister, G., McKenzie, R. L., Liley, J. B., Thomas, A., Forgan, B. W., and Long, C. N., 2003. Cloud Coverage Based on All-Sky Imaging and Its Impact on Surface Solar Irradiance. *Journal of Applied Meteorology*, 42(10), 1421-1434.

Sabburg, J. M. and Long, C. N., 2004. Improved sky imaging for studies of enhanced UV irradiance. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 4, 6213-6238.

Kassianov, E., Long, C. N., and Christy, J., 2005. Cloud-Base-Height Estimation from Paired Ground-Based Hemispherical Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 44(8), 1221-1233.

Long, C. N., Sabburg, J. M., Calbó, J., and Pagès, D., 2006. Retrieving Cloud Characteristics from Ground-Based Daytime Color All-Sky Images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(5), 633-652.

Mefti, A., Adane, A., and Bouroubi, M., 2007. Satellite approach based on cloud cover classification: Estimation of hourly global solar radiation from meteosat images. *Energy Conversion and Management*, 49(4), 652-659.