



Efectos de la altura solar, la nubosidad y la temperatura en las medidas de los piranómetros de silicio

A. Raïch, J. A. González y J. Calbó

Grupo de Física Ambiental, Departament de Física i Institut de Medi Ambient, Universitat de Girona, Campus Montilivi, EPS-II, 17071 Girona

Recibido: 24-I-2007 – Aceptado: 20-VII-2007 – **Versión Traducida**

Correspondencia a: jose.gonzalez@udg.es

Resumen

El objetivo del estudio que presentamos ha sido el de mejorar el acuerdo entre las medidas de irradiancia global tomadas con un piranómetro termoelectrico CM11 de Kipp & Zonen, y varios piranómetros fotovoltaicos o de silicio Li200SA de Li-Cor. Como la respuesta angular de los sensores se aparta en general de la respuesta cosinus ideal, se proponen unas correcciones a tal efecto. Se han analizado los datos minuales correspondientes a un ciclo anual de medidas de irradiancia tomadas por los dos tipos de piranómetros en la estación radiométrica de la Universitat de Girona. Las correcciones propuestas por la respuesta angular de los instrumentos se basan en bibliografía previa, y también en simulaciones realizadas con un modelo espectral de transferencia radiativa multicapa. La simulación ha permitido obtener correcciones para compensar las distintas respuestas angulares y espectrales de los dos tipos de instrumentos. Para cielos serenos, las correcciones angulares y espectrales mejoran notablemente el acuerdo entre las medidas de los dos tipos de piranómetros. También se propone una corrección del efecto de la temperatura sobre la medida de los piranómetros de silicio, obtenida empíricamente. A pesar de que las correcciones se han obtenido para cielos serenos, han sido también aplicadas a condiciones de cielo nublado, caracterizadas objetivamente mediante un algoritmo basado en medidas de irradiancia global y difusa. Finalmente se ha comprobado que las correcciones también mejoran el acuerdo entre las medidas de los tipos de sensores independientemente de la extensión de la cubierta de nubes.

1 Introducción

La radiación solar de onda corta (de 280 a 4000 nm) representa la fuente de energía más importante de nuestro planeta. Esta energía llega al conjunto formado por la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera, produciendo una larga serie de fenómenos que la afectan. Los comportamientos de los sistemas climático y ecológico se ven impulsados y modulados en todas las escalas, desde la más local a la más global, por la entrada de energía vinculada a la radiación.

En consecuencia, el conocimiento preciso de los niveles radiativos solares en onda corta, en cualquier punto del sistema atmósfera-océano-superficie, es vital. La validación de los modelos de transferencia radiativa en la atmósfera (tanto de los más rigurosos, como los parametrizados o los que se incorporan a los modelos climáticos) con las medidas experimentales, requiere una información extensa y cuidada.

Por lo tanto, se ha ido extendiendo, de manera inicialmente descoordinada entre los distintos países, una red global de sensores de radiación destinados preferentemente a la cuantificación de este recurso energético. Como ejemplo de esto, desde los años 80 en Cataluña se dispone de una red radiométrica que pertenece al Institut Català d'Energia, que actualiza periódicamente el Atlas Solar de Cataluña (ICAEN, 2001). El interés creciente para mejorar el conocimiento del papel de la radiación en el sistema natural también ha llevado al desarrollo de grandes proyectos para su medida, sea en estaciones en superficie, o con instrumentos en satélites, o, raramente, en aviones, barcos o por otros medios.

Como ejemplos más divulgados de estos esfuerzos está el proyecto ARM (Atmospheric Radiation Measurement; Ackerman y Stokes, 2003) dedicado a la medida cuidadosa de los niveles radiativos en la superficie terrestre, crucial para determinar la validez y precisión de los modelos de



transferencia radiativa aplicados a las distintas situaciones atmosféricas reales: nubes, turbidez, vapor de agua, etc. Otro ejemplo lo constituye la red BSRN (Baseline Surface Radiation Network, propuesta por el World Climate Research Program; Ohmura et al., 1998) para la realización de medidas precisas en superficie, para la validación de las medidas de satélite, de los códigos de radiación en los modelos climáticos, y para la monitorización de los posibles cambios a largo plazo en la irradiancia (Perez et al., 2001).

En los últimos años, la confección de bases de datos radiativos de calidad ha sido un objetivo global y prioritario, al mismo tiempo que se ha intentado ir coordinando las diferentes redes de medida. Por otro lado, siendo la radiación solar un fenómeno deslocalizado y de una alta variabilidad espacial y temporal, hace falta que la red de sensores sea lo más extensa posible, sobre todo para cubrir esas regiones que presentan una diversidad geográfica y climática más alta. El coste de los sensores de calidad y del mantenimiento de las estaciones ha sido históricamente una limitación para la consecución de una mayor extensión de la red.

La magnitud radiométrica más relevante a la práctica en la cuantificación de la radiación solar es la irradiancia global en superficie horizontal (E_g). Ésta se considera, en la superficie terrestre, como la composición de dos irradiancias: la directa (E_b) que proviene directamente del disco solar, y la difusa (E_d), procediendo del resto de direcciones de la bóveda celeste. Ambas se relacionan según la expresión:

$$E_g = E_b \cos(SZA) + E_d \quad (1)$$

donde SZA es el ángulo cenital solar.

El BSRN estima que la mejor medida de la irradiancia global horizontal se obtiene sumando la componente directa medida con un radiómetro de cavidad y la componente difusa medida con un piranómetro de primera clase con un disco sombreador. Con este método, la repetibilidad de la medida se encuentra alrededor de los 10 W m^{-2} , mejor que la que se puede obtener midiendo la irradiancia global con un solo piranómetro (Perez et al., 2001). No obstante, en las estaciones radiométricas es más habitual la utilización de piranómetros para la medida de la irradiancia global, dadas las dificultades inherentes del primer método, como por ejemplo el coste de los instrumentos, los calibrajés, y la necesidad de un sistema de seguimiento solar. Entre otras características, el piranómetro ideal tendría que presentar una respuesta angular que reprodujera correctamente el efecto de la proyección del haz en la superficie horizontal (respuesta cosinus). Como los instrumentos reales sólo aproximan esta respuesta, hace falta caracterizarlos cuidadosamente para obtener medidas de calidad.

Los piranómetros más utilizados actualmente son sensores de tipo termopila o bien celdas solares. Los primeros aprovechan el efecto termoelectrico para generar tensiones de acuerdo con la diferencia de temperaturas entre dos superficies con distinta capacidad de absorción de la radiación. Como ejemplos de piranómetros termoelectricos encontramos el Eppley PSP y el CM11 de Kipp & Zonen,

que están clasificados como de primera clase según los criterios de la Organización Meteorológica Mundial. En el segundo caso se utiliza el efecto fotovoltaico en los semiconductores (normalmente, silicio) para obtener una corriente tanto más fuerte cuanto más intensa sea la radiación. Estos piranómetros de sensor de silicio son utilizados ampliamente en estaciones meteorológicas debido a su precio más económico, hasta el punto que uno de sus fabricantes, Li-Cor, produjo más de 31000 unidades en 1997 (King et al., 1998). La utilización de las celdas solares como piranómetros fue propuesta por Kerr et al. (1967), que también proponía la incorporación de un difusor acrílico con un perfil conveniente para mejorar su respuesta angular. Los inconvenientes principales de estos instrumentos son la respuesta espectral (mucho menos uniforme y más limitada que la de los termoelectricos), la dependencia de su respuesta con la temperatura y el envejecimiento inicial, que se refleja en un cambio gradual de la sensibilidad del instrumento.

Respecto al primer inconveniente, hay que decir que el espectro de radiación depende básicamente de las condiciones atmosféricas, de la altura solar y de las propiedades ópticas de las superficies que rodean el lugar de medida (el albedo, en particular). La estructura espectral de la irradiancia global no sufre cambios tan importantes (por ejemplo entre condiciones de cielos serenos y de cielos nublados) en la banda visible como los que se dan en la banda infrarroja. No obstante, el mismo fabricante de piranómetros de silicio Li-Cor, fundamentándose en los estudios de Federer y Tanner (1965) y Kerr et al. (1967), reconoce que la respuesta en condiciones nubladas puede ser un 10% superior a la respuesta para cielos serenos, debido a las diferencias entre los espectros de la radiación de los dos casos.

Presentamos aquí los resultados principales de un estudio (Raich, 2006) que se ha propuesto comparar las medidas de la irradiancia global solar tomadas con sensores fotovoltaicos o de silicio con las medidas con piranómetros termoelectricos, que se han tomado como referencia. Se han propuesto y aplicado unas correcciones que reducen el efecto de las diferencias entre las respuestas angulares y espectrales de los instrumentos. Finalmente, se han estudiado los efectos de la temperatura y de la nubosidad sobre la razón entre ambas medidas ya corregidas:

$$r = \frac{E_g^{PV}}{E_g^{TP}} \quad (2)$$

donde E_g^{PV} y E_g^{TP} representan las irradiancias globales medidas respectivamente por el piranómetro fotovoltaico y por el termoelectrico, y r su cociente o ratio.

2 Metodología

2.1 Preparación de la base de datos

Para este estudio hemos dispuesto de dos piranómetros termoelectricos del modelo CM11 de la casa Kipp & Zo-

nen (uno para la medida de la irradiancia global y otro con banda parasol para la medida de la irradiancia difusa), y de tres piranómetros fotovoltaicos del modelo Li-200SA de la casa Li-Cor, dos de los cuales llevaban incorporados sendos termopares para la monitorización de la temperatura del sensor. Estos instrumentos se encuentran en el terrado del edificio PII de la Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona ($41^{\circ} 58' 18.19''$ N, $2^{\circ} 49' 3.57''$ E, 100 m s.n.m). Las medidas se hacen a cada segundo, de manera automatizada, mediante la conexión de los sensores a unos dispositivos de adquisición de datos (*datalogger* Campbell CR10). En el interior de la caja de los *dataloggers* se encuentra la resistencia *shunt* (con un coeficiente de temperatura medido en el laboratorio inferior a $1.4 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ por debajo de los 50°C) que transforma las intensidades proporcionadas por los piranómetros fotovoltaicos en voltajes medibles. Las medidas se promedian o se integran en distintos intervalos (en el caso de las irradiancias y de las temperaturas cada minuto), y periódicamente se vuelcan a un sistema informático, en el cual se va construyendo una base de datos. Algunos datos se presentan en tiempo real en la Web (<http://copernic.udg.es/cat/meteorologica.php>).

La base de datos estudiada se inicia en agosto del año 2000 (fecha en que empezó la grabación de cada minuto) y se concluye en julio del 2001 (fecha en que se retiraron de la estación los dos piranómetros fotovoltaicos que incorporaban los sensores de temperatura). Las medidas incluidas en la base de datos corresponden a registros de irradiancias globales (como se ha dicho, una obtenida de un CM11 y tres, de sendos Li200SA), difusa, y sus respectivas desviaciones estándar dentro del intervalo de grabación. La irradiancia difusa se medía con un CM11 con banda parasol de tipo Eppley que se ajustaba entre 1 y 3 veces por semana. La incertidumbre asociada a la irradiancia difusa medida de esta manera es del orden del 5% (Drummond, 1964). Otras variables incluidas en la base de datos son las temperaturas de los dos sensores fotovoltaicos y la temperatura interior de la caja donde se encuentran los *dataloggers* (todas estas temperaturas se medían con una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$), así como la temperatura y humedad relativa ambiental entre otros datos meteorológicos.

En cuanto al procesamiento de los datos, antes que nada se procedió a corregir las medidas de irradiancia difusa mediante un método de corrección por la parte del cielo apantallada por la banda parasol. El método escogido fue el de LeBaron et al. (1990), que propone una corrección que además de la geometría de la banda parasol, tiene en cuenta la altura solar y las condiciones del cielo.

La dificultad de establecer un criterio objetivo para escoger los períodos de cielo sereno a partir de la inspección visual de las gráficas de la irradiancia en función del tiempo es bien conocida. Por otro lado, el hecho de no disponer de un registro completo de la cubierta de nubes (*cloud fraction*, *cf*), ya sea a partir de observaciones visuales o mediante la cámara fotográfica hemisférica que posteriormente se instaló en la estación (Long et al., 2006), limi-

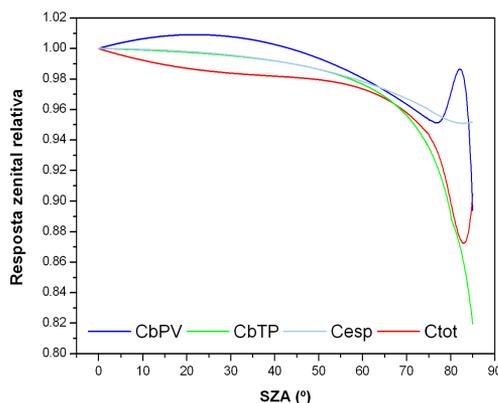


Figura 1. Respuestas angulares, relativas a la incidencia normal, de la componente directa de los piranómetros CM11 y Li200SA (*CbTP*, en verde y *CbPV*, en azul marino), a partir de los datos de Michalsky et al. (1995). En azul claro, la corrección espectral por el Li200SA, relativa a la del CM11, obtenida a partir de las simulaciones con un modelo de transferencia radiativa. En rojo la corrección total (*Ctot*) que se aplica a la ratio entre las medidas del Li200SA y del CM11. *SZA* es el ángulo cenital solar.

taba seriamente la proyección del estudio para cielos nublados. Para resolver esta limitación, se aplicó a la base de datos el método propuesto por Long y Ackerman (2000) abreviadamente LA de ahora en adelante. Con este método, a partir de las medidas de irradiancia global y difusa minutales y aplicando una serie de 4 tests se obtienen registros de 15 minutos con valores medios de irradiancia global y difusa y del resto de variables incluidas en los archivos, y lo que es más importante, una estimación de la cubierta de nubes. Eso sí, el método está limitado a los períodos con $SZA \leq 80^{\circ}$.

El valor del ángulo cenital utilizado en cada registro de 15 minutos es el central del período, calculado a partir de las fórmulas descritas en Iqbal (1983), y éste es el que se ha utilizado en todas las correcciones posteriores. El valor de *SZA* obtenido al aplicar LA (media de los cosinus de los *SZA* de los datos minutales del intervalo) no es lo suficientemente preciso en determinados períodos del día ni para determinadas estaciones del año en que el *SZA* cambia rápidamente.

Finalmente se compactaron los archivos diarios en un anual y se aplicó un filtrado final para eliminar algunos valores de la ratio claramente anómalos. Estos valores anómalos correspondían mayoritariamente a medidas excepcionalmente bajas de alguno de los piranómetros (circunstancias producidas por sombras ocasionales provocadas por el mantenimiento de la estación o por la presencia de algún pájaro). Este filtrado afectó sólo un 0.4% del total de valores analizados.

2.2 Obtención de las correcciones angular y espectral

Las diferencias entre los instrumentos, que se quieren corregir, provienen de su respuesta angular (respuesta cosinus) y de su respuesta espectral (distinta sensibilidad en cada una de las longitudes de onda de la radiación recibida). En primer lugar se abordan las correcciones angulares para cada uno de los piranómetros.

Por eso, antes que nada se consideró la respuesta de los instrumentos en dos condiciones ideales: suponiendo que sólo recibieran radiación directa o sólo radiación difusa. Los factores de corrección a aplicar en cada caso se pudieron determinar a partir de la información publicada por Michalsky et al. (1995). Concretamente, en el caso del instrumento termoelectrico CM11 y el fotovoltaico Li200SA sometidos a radiación directa pura, las expresiones analíticas que describen respectivamente su respuesta en función del ángulo cenital ($CbTP$ y $CbPV$) se extrajeron de los gráficos de la Figura 1. Para los mismos instrumentos, pero sometidos a irradiación difusa isotropa pura, el factor de corrección que hay que aplicar es constante (respectivamente $CdTP = 0.9789$ y $CdPV = 0.9900$).

Paralelamente, se simularon numéricamente las medidas efectuadas por los piranómetros de manera que fueran comparables entre ellas, utilizando un modelo de transferencia radiativa espectral y multicapa, concretamente el SBDART versión 1.5 (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) desarrollado por Ricchiazzi et al. (1998), que resuelve la ecuación de transferencia radiativa integrándola numéricamente con el algoritmo DISORT, y considerando cada capa atmosférica horizontalmente homogénea. Algunas de las variables de entrada de este modelo se mantuvieron constantes en todas las simulaciones: modelo de atmósfera (se ha empleado la atmósfera US62), altitud (0 m), humedad relativa (50%), aerosol (rural), perfil de nubes (cielo sereno), funciones de filtro para simular respuestas espectrales de los instrumentos (hemos introducido uno que corresponde a la respuesta del Li200SA, mientras que no se aplica ningún filtro para el CM11), longitudes de onda (para el CM11 desde 300 nm hasta 2800 nm y para el Li200SA desde 400 nm hasta 1100 nm, ambos con incrementos de 4 nm). Otras condiciones se han ido variando: albedo (desde 0 hasta 0.30, en incrementos de 0.05), columna de ozono (desde 0.25 hasta 0.45 atm-cm, en incrementos de 0.05 atm-cm), columna de agua precipitable (desde 0.5 hasta 4 cm, en incrementos de 0.5 cm), opacidad de los aerosoles a 550 nm (desde 0 hasta 0.6, en incrementos de 0.1) y ángulo cenital (desde 0 hasta 85°, en incrementos de 5°).

Para obtener las correcciones globales de los dos piranómetros hay que combinar los dos factores anteriores. Por eso se consideró la redistribución de Hay-Davies, ver Duffie y Beckman (1991) de la radiación difusa, es decir, que una parte, la circumsolar, de la difusa recibe la misma corrección angular que la directa, mientras que el resto se trata como isotropo. La componente circumsolar de la difusa

es esa parte que ha sido dispersada en direcciones muy cercanas a la del rayo solar, y que por lo tanto presenta un ángulo de incidencia sobre los sensores muy cercano al de la componente directa.

Entonces, se calculan las irradiancias globales corregidas, siempre en base a las simulaciones, de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} E_{global,corregida}^{PV} &= (E_{directa}^{PV} + A_i \cdot E_{difusa}^{PV}) CbPV + \\ &\quad (1 - A_i) E_{difusa}^{PV} \cdot CdPV \\ E_{global,corregida}^{TP} &= (E_{directa}^{TP} + A_i \cdot E_{difusa}^{TP}) CbTP + \\ &\quad (1 - A_i) E_{difusa}^{TP} \cdot CdTP \end{aligned} \quad (3)$$

donde A_i es el índice de anisotropía definido por Hay-Davies, $A_i = \frac{E_{directa}^{TP}}{E_{sc} \cos(SZA)}$ y $E_{dir,dif}^{PV,TP}$ son los valores simulados de irradiación directa y difusa. La constante solar, E_{sc} , toma el valor 1367 W m^{-2} . Finalmente los coeficientes de corrección angular de las irradiancias globales de los dos instrumentos ($CgTP$ y $CgPV$ respectivamente) se obtienen dividiendo los valores simulados de irradiación global por los valores corregidos obtenidos de la expresión (3). Éstos son los coeficientes que se utilizaron para corregir las medidas reales de irradiación global.

Una vez corregidas las respuestas angulares de los instrumentos, hay que pasar a considerar su distinta respuesta espectral. Considerando el CM11 como referencia y utilizando las simulaciones anteriores con SBDART, se determina el factor de corrección espectral ($Cesp$), que dependerá del SZA , que hay que aplicar a las medidas del Li200SA para que reproduzcan las de los CM11 (ver Fig. 1). Combinando las correcciones presentadas se puede encontrar la corrección total ($Ctot = \frac{CgTP \cdot Cesp}{CgPV}$), de manera que dividiendo la ratio r (ver Ec. 2) por $Ctot$, se obtendrá la ratio corregida para las distintas respuestas cosinus y espectrales. Esta corrección total se presenta también en la Figura 1, donde se manifiesta la dependencia con el ángulo cenital. Al aplicarla, la ratio tendría que valer 1, en caso de que se tuvieran todos los piranómetros calibrados correctamente, y suponiendo que no hubiera variaciones atribuibles a otros factores que puedan afectar la ratio (como por ejemplo la temperatura de los sensores o la nubosidad).

3 Resultados

Se presentan a continuación los resultados de aplicar la corrección total de la ratio ($Ctot$) a la base de datos, para después averiguar los efectos de la temperatura y de la nubosidad en la ratio entre las medidas de los dos tipos de piranómetros.

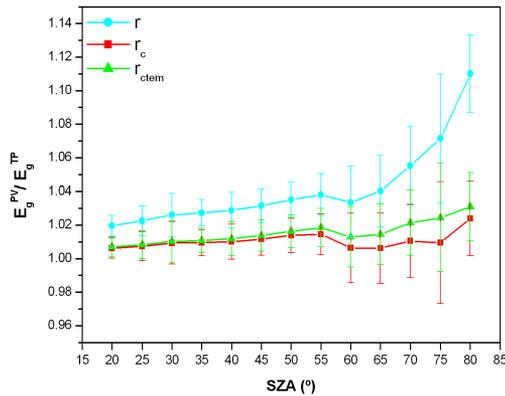


Figura 2. Efecto sobre las ratios originales en condiciones de cielo sereno (azul claro) de las correcciones angular y espectral (rojo) y de la corrección de la temperatura (verde). Las barras representan las desviaciones estándar dentro de cada intervalo de SZA. Se presentan los efectos por el piranómetro 3.

Tabla 1. Desviación estándar de las ratios de los registros de cielos serenos (r_c es la ratio corregida angularmente y espectralmente, r_{ctem} incorpora la corrección de temperatura).

Li200SA	r	r_c	r_{ctem}
1	0.034	0.029	0.028
2	0.023	0.020	0.019
3	0.022	0.018	0.016

3.1 Análisis para cielos serenos

Para obtener los casos correspondientes a cielos serenos a partir de la base de datos de registros del ciclo anual 2000-2001 de Girona (formada por 13792 registros de 15 mn que se había obtenido al aplicar a los datos minutales el algoritmo de LA) se ha establecido un umbral sobre la cubierta de nubes de $cf \leq 0.02$. Así se ha obtenido un subconjunto de 2659 registros, a los cuales se ha aplicado la C_{tot} a la ratio de las irradiancias globales de los dos instrumentos.

La repercusión de esta corrección angular y espectral (C_{tot}) sobre los datos originales se puede observar en la Figura 2, donde se manifiesta que a partir de 60° su contribución es significativa. En la Fig. 2 se presentan los resultados para un solo piranómetro fotovoltaico, pero el resultado de aplicar las correcciones es similar en los otros dos casos. Cuantitativamente, por medio de la desviación estándar (SD) de las ratios, en la Tabla 1 se puede valorar la disminución en este índice, después de aplicar la corrección, que resulta ser del orden del 17% (de promedio para los tres piranómetros fotovoltaicos), aunque como se observa en la Fig. 2, la mejora relativa es más notable para ángulos cenitales grandes.

En la Figura 3 se observa la dependencia de la ratio (después de haber sido aplicada la corrección angular y espectral C_{tot} a los datos de cielos serenos) respecto a la temperatura medida en los propios Li200SA. Esta dependencia es atribuible a los piranómetros de silicio, ya que se ha considerado la medida del CM11 como referencia puesto que tiene un mecanismo eficaz de compensación de la temperatura, discrepancias $<1\%$ entre -10 y $+40^\circ\text{C}$, Manual CM11 Kipp y Zonen (2006). Se observa para los tres piranómetros de silicio una dependencia con la temperatura no lineal y que el coeficiente de temperatura depende fuertemente del intervalo de temperatura elegido. Así, para temperaturas menores a 20°C , a ratio presenta fuertes incrementos de hasta $3.0 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; de 20 a 30°C los incrementos son cada vez más moderados; y para temperaturas superiores a 35°C se alcanza una saturación. El Manual Li-Cor (2006) especifica un coeficiente de temperatura máximo para el Li200SA de $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, mientras que para nuestra base de datos, si se hace un promedio de los coeficientes entre 10°C i 45°C se obtiene un coeficiente de temperatura de $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, muy de acuerdo con las especificaciones si se presupone una dependencia lineal. King et al. (1998) dan un valor de $0.82 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para el coeficiente del Li200SA y Michalisky et al. (1987) de $0.6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, siempre a partir de medidas en laboratorio. Estas discrepancias no tienen nada de extraño teniendo en cuenta el comportamiento del Li200SA con la temperatura: crecimiento lineal para temperaturas bajas y estabilización por encima de los 30°C . También hay que apuntar que este comportamiento se ha confirmado con las evoluciones diarias de las ratios y en otros ciclos anuales.

Para obtener una corrección empírica de los efectos de la temperatura del sensor Li200SA se normalizan los valores de las ratios corregidas angularmente y espectralmente presentados en la Figura 3, dividiéndolos por el valor correspondiente al intervalo de 35°C (donde la temperatura ya tiene un efecto despreciable). Después, esta ratio normalizada se ajusta a una función del tipo: $1 - e^{\frac{-(t-t_0)}{t_1}}$, donde t es la temperatura del sensor, y t_0 y t_1 dos parámetros de la función. Una función de este tipo describe adecuadamente el comportamiento, ya comentado, de la ratio en función de la temperatura. La función ajustada se presenta también en la Figura 3, y el efecto de la aplicación de esta corrección de temperatura, para uno de los sensores, se presenta en la Figura 2. Después de aplicarla, la SD de las ratios previamente corregidas angularmente y espectralmente mejora adicionalmente un 7% de media (ver Tabla 1).

Para el caso más general en que sólo se disponga de registros de temperatura ambiental, se ha ajustado una expresión empírica que relaciona la temperatura del sensor (t) con la temperatura del aire (t_{aire}) y la irradiancia medida por Li200SA (E_g^{PV}):

$$t = 0.99327 t_{aire} - 0.00001 (E_g^{PV})^2 + 0.02041 E_g^{PV} + 1.45113 \quad (4)$$

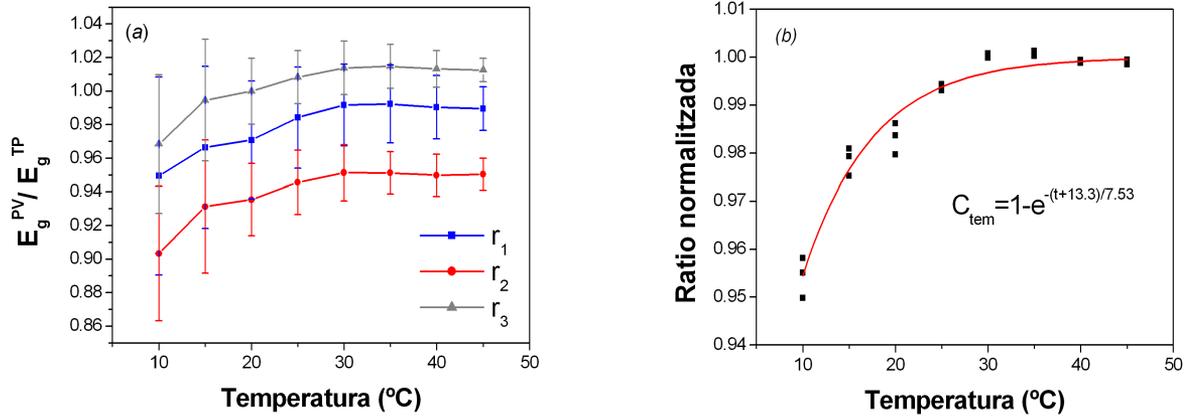


Figura 3. (a) Para cielos serenos, dependencia con la temperatura de la respuesta (habiendo aplicado la corrección angular y espectral) de los piranómetros Li200SA y las respectivas desviaciones estándares; (b) función ajustada a partir de las ratios normalizadas, C_{tem} , donde t es la temperatura medida en el mismo sensor.

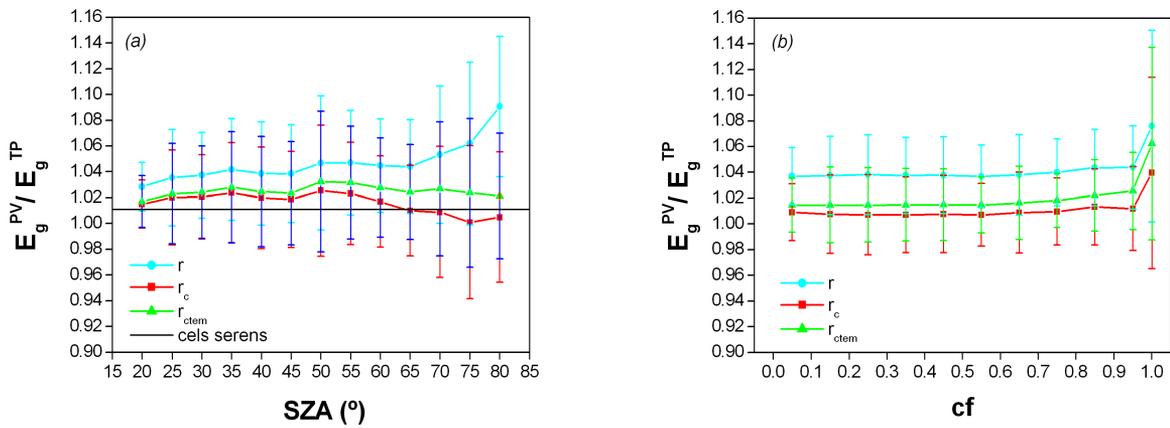


Figura 4. (a) Comportamiento de las correcciones en función del ángulo cenital para cielos con todo tipo de nubosidad. Se pone de manifiesto el papel más destacado de la corrección de la temperatura para ángulos cenitales grandes. La línea horizontal representa la ratio media para cielos serenos; (b) Ídem pero en función de la cubierta de nubes (cf). Destaca el incremento de un 4% en la ratio y la duplicación de la desviación estándar para el caso de cf estrictamente igual a 1, es decir, para cielos totalmente cubiertos. En ambos casos, se presentan los resultados para el piranómetro 3.

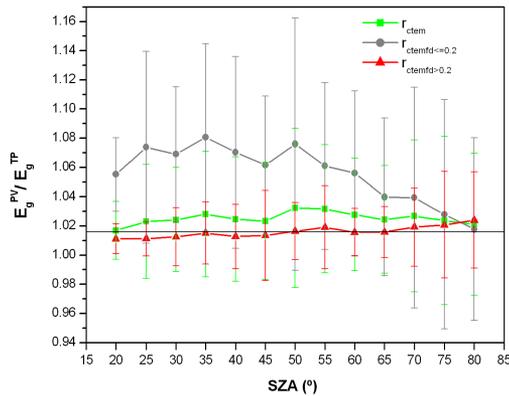


Figura 5. Ratio corregida en función de SZA . En color gris oscuro, los valores para condiciones de fracción directa $fd \leq 0.2$ (sol tapado); en rojo, los valores para $fd > 0.2$; en verde, los valores que incluyen todas las condiciones. La línea horizontal representa la ratio media para cielos serenos. Los resultados se presentan para el piranómetro 3.

3.2 Análisis para cielos nublados

El mismo análisis explicado en el apartado anterior se ha repetido para todos los datos, independientemente del estado del cielo, es decir, de la cubierta de nubes. Los resultados, para uno de los piranómetros, se presentan en la Figura 4. Como era de esperar, dado el comportamiento del Li200SA (coeficientes de temperatura más altos para temperaturas más bajas), el efecto de la corrección de la temperatura es más manifiesto para ángulos cenitales grandes (que corresponde a los momentos de sol naciente y poniente, y a las situaciones invernales en general, que es cuando la temperatura habitualmente es menor). La SD no mejora, dado que el incremento de dispersión que introducen las nubes supera en mucho la mejora global introducida por el conjunto de correcciones para cielos serenos (que como hemos dicho más arriba, es de un 24%).

Finalmente, para ver cómo se comportan las correcciones angulares y espectrales en función de la cubierta de nubes se ha hecho un estudio para intervalos de cf con incrementos de 0.1 y separando los estrictamente iguales a 1). Los resultados también se presentan en la Figura 4 y se puede constatar que la corrección total se mantiene en todo el rango de valores cf excepto en los estrictamente iguales a 1 (cielos totalmente cubiertos) donde las ratios aumentan del orden de un 4%, y la dispersión se duplica respecto a los anteriores intervalos (características que ya estaban presentes en los datos originales antes de aplicar ningún tipo de corrección). Esta discrepancia se atribuye a una contribución importante de la irradiancia difusa que no se ha tenido en cuenta en el modelado (que era para cielos serenos) y que en estas circunstancias, de cielo totalmente

cubierto, se manifiesta mucho más claramente que para cielos parcialmente nublados.

Así, en la Figura 5, se observa que para registros con una fracción directa menor o igual a 0.2 (situación en que la componente difusa es casi la única existente) la irradiancia medida por el Li200SA se incrementa en más de un 4% respecto a los valores medidos para la totalidad de los datos de cielos variables, en ángulos cenitales menores a 60° , para ir disminuyendo para ángulos cenitales superiores. Para reforzar esta afirmación se ha representado también el conjunto complementario (datos con la fracción directa superior a 0.2) que en conjunto se comportan como los registros de cielos serenos, a pesar de que incluyen condiciones de cielo ampliamente heterogéneas (pero siempre con el sol visible, es decir, con presencia del haz directo).

4 Conclusiones

Se han presentado unas expresiones que corrigen las respuestas angular y espectral, así como el efecto de la temperatura, del sensor fotovoltaico Li200SA respecto al sensor termoelectrónico CM11, para condiciones de cielo sereno. Las correcciones de las respuestas angular y espectral de los dos instrumentos son funciones analíticas respecto al ángulo cenital solar. La aplicación de éstas ha permitido poner al descubierto la dependencia con la temperatura de la respuesta del Li200SA: por debajo de 20°C tiende a un comportamiento asintótico lineal y por encima de los 35°C se estabiliza. Este comportamiento tan ligado al intervalo de temperaturas estudiado explica la gran variabilidad de los coeficientes de temperatura del Li200SA presentes en la literatura científica. Una posible aplicación tecnológica para contrarrestar la característica irradiancia global-temperatura sería mantener los sensores Li200SA y en general todos los sensores fotovoltaicos a una temperatura constante de 35°C , sobre todo en climas más fríos que el mediterráneo.

La repercusión de las dos correcciones (angular y espectral) y la de la temperatura del Li200SA es una clara mejora en las medidas, concretamente, la SD de la ratio disminuye un 24% para las situaciones de cielo sereno. Para cielos nublados la corrección angular y espectral se comporta muy bien para todas las situaciones de cubierta de nubes, a excepción del caso de cielo totalmente cubierto, en que, incluso después de aplicar las correcciones, la irradiancia global medida por el Li200SA es un 4% más alta que la medida por el CM11. Este comportamiento particular por los cielos totalmente cubiertos va asociado también a una duplicación de la dispersión. La repercusión de la corrección de la temperatura parece ser mayor en cielos nublados pero este incremento en la mejora sólo se pone de manifiesto en medidas elevadas y queda enmascarado por el aumento de dispersión introducido por la nubosidad, sobre todo para situaciones con ángulos cenitales grandes (por eso no se reflejan en la SD de los datos correspondientes a todos los tipos de cielo).

Sería interesante para trabajos posteriores estudiar el efecto de la integración temporal sobre los resultados, dado que las respuestas temporales de las dos familias de

instrumentos son bien distintas (20 s para el CM11 y 10 μ s para el Li200SA). El estudio presente se ha fundamentado en períodos de 15 min, en los cuales se podrían perder algunas características de la radiación, especialmente en condiciones de cielos parcialmente nublados. También quedaría pendiente una justificación a partir de modelos físicos de la característica irradiancia-temperatura del Li200SA que permitiría generalizar los resultados a todos los piranómetros fotovoltaicos. Finalmente, habría que establecer cómo se traduce la mejora en el acuerdo entre irradiaciones diarias (integraciones temporales de la irradiancia), que constituyen una información muy relevante en aplicaciones energéticas.

Agradecimientos. Este artículo es un resumen del Trabajo de Investigación que el primer autor defendió en julio de 2007 en el marco del Programa de Doctorado de Medio Ambiente de la Universitat de Girona. Esta investigación ha sido posible gracias a la ayuda y colaboración de los dos directores de este trabajo: Dr. Josep A. González y Dr. Josep Calbó, y se ha desarrollado dentro del Grupo de Física Ambiental de la UdG en el marco del proyecto NUCCLIER, MEC CGL 2004-02325 (<http://copernic.udg.es/gfa/nuclier/nuclier.htm>).

Referencias

- Ackerman, T. y Stokes, G. M., 2003: *The Atmospheric Radiation Measurement program*, Phys Today, **56**, 38–4.
- Drummond, A. J., 1964: *Comments on "Sky radiation measurement and corrections"*, J Appl Meteorol, **3**, 810–811.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A., 1991: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Federer, C. A. y Tanner, C. B., 1965: *A simple integrating pyranometer for measuring daily solar radiation*, Journal of Geophysics, **70**, 2301–2306.
- ICAEN, 2001: *Atlas de radiació solar de Catalunya*, Edició 2000, Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Icqb, M., 1983: *An introduction to solar radiation*, Academic, New York.
- Kerr, J. P., Thurtell, C. B., y Tanner, C. B., 1967: *An integrating pyranometer for climatological observer stations and mesoscale networks*, J Appl Meteorol, **6**, 688–694.
- King, D. L., Boyson, W. E., y Hansen, B. R., 1998: *Improved accuracy for low-cost solar irradiance sensors*, Sandia National Laboratories.
- Kipp y Zonen, 2006: *Manual CM 11*, www.kippzonen.com/pages.
- LeBaron, B. A., Michalsky, J. J., y Perez, R., 1990: *A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions*, Sol Energy, **44**, 249–256.
- Li-Cor, 2006: *Manual Li-200SA*, www.licor.com/env/Products/Sensors/200/li200_description.jsp.
- Long, C. N. y Ackerman, T. P., 2000: *Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects*, Journal of Geophysics, **105**, 15 609–15 626.
- Long, C. N., Sabburg, J. M., Calbó, J., y Pagès, D., 2006: *Retrieving Cloud Characteristics from Ground-Based Daytime Color All-Sky Images*, J Atmos Ocean Tech, **23**, 633–652.
- Michalsky, J. J., Harrison, L., y LeBaron, B. A., 1987: *Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyranometer*, Sol Energy, **39**, 87–96.
- Michalsky, J. J., Harrison, L. C., y Berkheiser, W. E., 1995: *Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors*, Sol Energy, **54**, 397–402.
- Ohmura, A., Gilgen, H., Hegner, H., Müller, G., Wild, M., Dutton, E. G., Forgan, B., Fröhlich, C., Philipona, R., Heimo, A., König-Langlo, G., McArthur, B., Pinker, R., Whitlock, C. H., y Dehne, K., 1998: *Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research*, B Am Meteorol Soc, **79**, 2115–2136.
- Perez, R., Aguiar, R., Collares-Pereira, M., Dumortier, D., Estrada-Cajigal, V., Gueymard, C., Ineichen, P., Littlefair, P., Lund, H., Michalsky, J., Olseth, J., Renne, D., Rymes, M., Skartveit, A., Vignola, F., y Zelenka, A., 2001: *Solar resource assessment: A review*. In: *Solar Energy - The state of the art*. (ISES Position Papers), James & James Science Publishers, London, pp. 497–562.
- Raïch, A., 2006: *Comparació de les mesures d'irradiancia de piranòmetres termoelectrics i de silici. Efectes de l'altura solar, de la nuvolositat i de la temperatura*, Treball de Recerca del Doctorat de Medi Ambient, Universitat de Girona.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, G., y Sowle, D., 1998: *SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plano-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere*, B Am Meteorol Soc, **79**, 2101–2114.