

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 8. MEDICIÓN DE LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN.....	295
8.1 Generalidades	295
8.1.1 Definición.....	295
8.1.2 Unidades y escalas	295
8.1.3 Requisitos meteorológicos	296
8.1.3.1 Aplicación de los datos de duración de la insolación	296
8.1.3.2 Correlaciones con otras variables meteorológicas	296
8.1.3.3 Requisitos de los registradores automatizados	297
8.1.4 Métodos de medición.....	297
8.2 Instrumentos y sensores	298
8.2.1 Método pirheliométrico	298
8.2.1.1 Generalidades	298
8.2.1.2 Fuentes de error.....	299
8.2.2 Método piranométrico	299
8.2.2.1 Generalidades	299
8.2.2.2 Fuentes de error.....	300
8.2.3 Heliógrafo de Campbell-Stokes (método de quemado)	300
8.2.3.1 Ajustes	301
8.2.3.2 Evaluación	301
8.2.3.3 Versiones especiales	302
8.2.3.4 Fuentes de error.....	302
8.2.4 Dispositivos de evaluación por contraste.....	302
8.2.5 Dispositivos de barrido y evaluación por contraste	302
8.2.5.1 Generalidades	302
8.2.5.2 Fuentes de error.....	303
8.3 Exposición del heliógrafo	303
8.4 Fuentes generales de error.....	304
8.5 Calibración.....	304
8.5.1 Métodos de exterior	305
8.5.1.1 Comparación de los datos de duración de la insolación	305
8.5.1.2 Comparación de señales analógicas.....	305
8.5.1.3 Método del umbral de irradiancia efectiva media	306
8.5.2 Método de interior	306
8.6 Mantenimiento	306
ANEXO 8.A. ALGORITMO PARA ESTIMAR LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN A PARTIR DE MEDICIONES DE LA IRRADIANCIA GLOBAL DIRECTA.....	308
ANEXO 8.B. ALGORITMO PARA ESTIMAR LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN A PARTIR DE MEDICIONES DE LA IRRADIANCIA GLOBAL A INTERVALOS DE 1 MINUTO.....	309
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	311

CAPÍTULO 8. MEDICIÓN DE LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN

8.1 GENERALIDADES

El término “insolación” está vinculado al brillo del disco solar que rebasa la luz difusa del fondo del cielo o a la aparición de sombras por detrás de los objetos iluminados, fenómeno que el ojo humano puede observar mejor. Así pues, tiene más relación con la radiación visible que con la energía radiada en otras longitudes de onda, aunque ambos aspectos son inseparables. Sin embargo, en la práctica la primera definición se estableció directamente mediante el heliógrafo de Campbell-Stokes (véase la sección 8.2.3), instrumento relativamente sencillo, que detecta la luz solar cuando la energía de los rayos solares, concentrada mediante una lente especial, quema una cartulina negra especial. Dicho registrador fue introducido en las estaciones meteorológicas ya en 1880, y se sigue utilizando en muchas redes. Debido a que no se establecieron normas internacionales para las dimensiones y la cualidad de las partes especiales, la aplicación de diferentes leyes del principio dio como resultado diferentes valores de duración de la insolación.

Para homogeneizar los datos de la red mundial de duración de la insolación, se recomendó como referencia un diseño especial del heliógrafo de Campbell-Stokes, denominado heliógrafo de referencia provisional (HRP) (OMM, 1962). La mejora conseguida mediante esta “definición instrumental” sería efectiva solo durante el período provisional necesario para encontrar una definición física precisa, que permitiera diseñar heliógrafos automáticos y conseguir la aproximación más perfecta posible a la “escala” representada por el HRP. Respecto a esta última condición, se aconsejó decididamente establecer un umbral de la irradiancia solar directa que correspondiera al umbral de combustión de los heliógrafos de Campbell-Stokes. Las investigaciones realizadas en diversas estaciones mostraron que el umbral de irradiancia necesario para quemar la cartulina variaba entre 70 y 280 W m⁻² (Bider, 1958; Baumgartner, 1979). Sin embargo, otros estudios realizados especialmente con el HRP en Francia dieron como resultado un valor medio de 120 W m⁻², que fue finalmente propuesto como umbral de la irradiancia solar directa para determinar la duración efectiva de la insolación¹. En cuanto a la dispersión de los resultados de las pruebas, se acepta un umbral de exactitud del 20% en la especificación de los instrumentos. Como sensor de referencia para detectar el umbral de irradiancia se recomendó un pirheliómetro. Parece necesario fijar el ángulo de visión del pirheliómetro para obtener otros dispositivos de referencia más perfeccionados (véase el capítulo 7 de la parte I (secciones 7.2 y 7.2.1.3)).

8.1.1 Definición

En OMM (2010)² se define la duración de la insolación correspondiente a un período determinado como la suma del tiempo durante el cual la irradiancia solar directa supera 120 W m⁻².

8.1.2 Unidades y escalas

La magnitud física de la duración de la insolación (SD) es, evidentemente, el tiempo. Las unidades que se emplean son el segundo o la hora. Con fines climatológicos, se utilizan expresiones tales como “horas por día” u “horas de insolación diaria”, así como porcentajes de magnitudes, como “duración de la insolación diaria relativa”, en los que la SD puede referirse a la duración de la insolación extraterrestre posible o a la duración de la insolación máxima posible (SD_0 y $SD_{máx}$, respectivamente). El período de medición (día, década, mes, año, etc.) es un dato importante que se agrega a la unidad.

¹ Recomendación 10 (CIMO-VIII), adoptada por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su octava reunión (1981).

² Recomendación 16 (CIMO-X), adoptada por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su décima reunión (1989).

8.1.3 Requisitos meteorológicos

Los requisitos sobre el rendimiento se indican en el capítulo 1 de la parte I. Las horas de insolación deberían medirse con una incertidumbre de $\pm 0,1$ horas y una resolución de 0,1 horas.

Puesto que el número de las transiciones del umbral de radiación solar directa, y lo abrupto de las mismas, determinan la posible incertidumbre de la duración de la insolación, los requisitos meteorológicos de los heliógrafos se relacionan fundamentalmente con las condiciones climatológicas de la nubosidad (OMM, 1985).

Con cielo despejado, solo los valores horarios correspondientes al orto y al ocaso pueden ser erróneos (según la cantidad de polvo), debido a un umbral ajustado incorrectamente o a las dependencias espectrales.

En el caso de las nubes dispersas (cúmulos, estratocúmulos), la transición puede resultar abrupta, y la irradiancia del cielo cubierto medida con el pirheliómetro es generalmente inferior a 80 W m^{-2} , por lo que se necesitarán pocos requisitos de ajuste del umbral. No obstante, el ángulo de visión del sensor podrá influir en el resultado cuando cerca del Sol se encuentre una aglomeración de nubes brillantes.

Se requerirá la máxima precisión cuando las capas de nubes altas (cirros, altoestratos), con pequeñas variaciones del espesor óptico, atenúen la irradiancia solar directa hasta alcanzar unos 120 W m^{-2} . Tanto el ángulo de visión como la precisión del ajuste del umbral resultarán eficaces.

Los requisitos de los heliógrafos varían según el emplazamiento y la estación, y según el tipo de nubes predominantes. La nubosidad se puede describir mediante tres intervalos de duración relativa de la insolación diaria SD/SD_0 (véase la sección 8.1.2), a saber: "cielo cubierto" cuando ($0 \leq SD/SD_0 < 0,3$); "nubes dispersas" cuando ($0,3 \leq SD/SD_0 < 0,7$) y "tiempo bueno" cuando ($0,7 \leq SD/SD_0 \leq 1,0$). En general, los resultados para el cielo cubierto muestran el porcentaje más alto de desviaciones de la referencia.

8.1.3.1 Aplicación de los datos de duración de la insolación

Una de las primeras aplicaciones de los datos de SD consistió en caracterizar el clima de los lugares, especialmente los referentes a centros de reposo. En esa aplicación se tuvo en cuenta también el efecto psicológico que una cantidad considerable de luz solar tiene en el bienestar de los seres humanos. Es utilizada todavía por algunas autoridades locales para promover destinos turísticos.

La descripción de las condiciones de tiempo pasado, por ejemplo de un mes, suele contener la evolución de los datos de SD diarios.

Para esos campos de aplicación, una incertidumbre de alrededor del 10% de los valores de SD medios fue aceptable durante varios decenios.

8.1.3.2 Correlaciones con otras variables meteorológicas

La correlación más importante entre la duración de la insolación y la radiación solar global, G , se expresa mediante la llamada fórmula de Ångström:

$$G/G_0 = a + b \cdot (SD/SD_0) \quad (8.1)$$

donde G/G_0 es el denominado índice de claridad (relacionado con la irradiancia global extraterrestre), y SD/SD_0 es la duración de la insolación correspondiente (relacionada con el valor de SD de radiación extraterrestre posible); y a y b son constantes que tendrán que ser determinadas mensualmente. Se observó que la incertidumbre de las medias mensuales de la irradiancia global diaria obtenida de esta manera, a partir de los datos del heliógrafo de Campbell-Stokes, es inferior al 10% en el verano, y que aumenta hasta un 30% durante el invierno, según información concerniente a estaciones alemanas (Golchert, 1981).

La fórmula de Ångström lleva implícita la correlación inversa entre la nubosidad y la duración de la insolación. Esa relación no se cumple cuando la cubierta nubosa es alta y delgada y, obviamente, tampoco en el caso de campos de nubes que no ocultan el Sol, de manera que el grado de la correlación inversa depende, ante todo, de la magnitud del conjunto de datos estadísticos (Stanghellini, 1981; Angell, 1990). Una mejor exactitud de los datos de SD reducirá la dispersión de los resultados estadísticos, pero incluso los datos perfectos solo pueden generar resultados suficientes sobre una base estadística.

8.1.3.3 **Requisitos de los registradores automatizados**

Debido a que cada vez más lugares disponen de electricidad, la autosuficiencia del heliógrafo de Campbell-Stokes está perdiendo importancia. Además, la necesidad de cambiar la cartulina quemada todos los días plantea problemas en las estaciones meteorológicas automáticas o con escaso personal. Otras razones fundamentales que abogan por la sustitución de los heliógrafos de Campbell-Stokes por nuevos procedimientos de medición automatizados son las de no incurrir en los gastos de las evaluaciones visuales y obtener de los soportes de datos resultados más precisos, que permitan procesar directamente los datos por medios informáticos.

8.1.4 **Métodos de medición**

A continuación se ofrece un resumen de los métodos utilizados para medir la duración de la insolación y los tipos de instrumentos correspondientes:

- a) Método pirheliométrico: se detectan con un pirheliómetro las transiciones de la irradiancia solar directa hasta el umbral de 120 W m^{-2} (de conformidad con la Recomendación 10 (CIMO-VIII)). Los valores de la duración se pueden leer en contadores de tiempo activados por las transiciones ascendentes o descendentes.

Tipo de instrumento: pirheliómetro combinado con un discriminador de umbral electrónico o informatizado, y un contador de tiempo.

- b) Método piranométrico:

- i) Se mide con piranómetros la irradiancia solar global (G) y la difusa (D) para obtener la irradiancia solar directa que se emplea para establecer el valor de umbral de la OMM; lo demás es igual al apartado a) anterior.

Tipo de instrumento: todos los sistemas radiométricos que consisten en dos piranómetros ajustados y un dispositivo de protección contra la luz solar, combinados con un discriminador de umbral electrónico o informatizado y un contador de tiempo.

- ii) Se mide con un piranómetro la irradiancia solar global (G) para estimar la duración de la insolación.

Tipo de instrumento: piranómetro combinado con un dispositivo electrónico o informatizado capaz de calcular valores medios en períodos de 10 minutos y de irradiancia solar global (G) mínima y máxima durante esos períodos o, alternativamente, capaz de calcular valores medios en períodos de 1 minuto de la irradiancia solar global (G).

- c) Método de quemado: se determina el efecto de umbral de la combustión del papel causada por la radiación solar directa enfocada (efecto de calentamiento de la energía solar absorbida). La duración se lee en la traza de combustión.

Tipo de instrumento: heliógrafo de Campbell-Stokes, especialmente la versión HRP recomendada (véase la sección 8.2).

- d) Método por contraste: se determinan los contrastes de insolación producidos entre algunos sensores ubicados en posiciones diferentes con respecto al Sol, con la ayuda de una diferencia específica de las señales de salida de los sensores, que corresponde a un equivalente del umbral recomendado por la OMM (establecido por comparación con valores de *SD* de referencia); lo demás es igual al apartado b) anterior.

Tipo de instrumento: detectores compuestos por varios sensores especialmente diseñados (la mayoría equipados con células fotovoltaicas), combinados con un discriminador electrónico y un contador de tiempo.

- e) Método de barrido: se determina la irradiancia procedente de pequeños sectores del cielo explorados o barridos continuamente, con respecto a un equivalente del umbral de irradiancia recomendado por la OMM (establecido por comparación con valores de *SD* de referencia).

Tipo de instrumento: receptores de un sensor equipados con un dispositivo de barrido especial (por ejemplo, un espejo o un diafragma giratorio), combinados con un discriminador electrónico y un contador de tiempo.

Los métodos de medición de la duración de la insolación que se describen a continuación son ejemplos de cómo aplicar los principios mencionados anteriormente. Los instrumentos utilizados con estos métodos, excepto el heliógrafo de Foster con conmutador, participaron en la Comparación de mediciones automáticas de la duración de la insolación de la OMM efectuada en Hamburgo entre 1988 y 1989, y en la comparación de piranómetros y heliógrafos electrónicos realizada por la Asociación Regional VI en Budapest en 1984 (OMM, 1986).

La descripción del heliógrafo de Campbell-Stokes que figura en la sección 8.2.3 es relativamente detallada, puesto que sigue siendo generalizado su uso en las redes nacionales, y ello exige tener en cuenta las especificaciones y las reglas de evaluación recomendadas por la OMM (téngase presente, no obstante, que este método no está ya recomendado³, puesto que no registra con suficiente coherencia la duración efectiva de la insolación).

En Coulson (1975), Hameed y Pittalwala (1989) y Sonntag y Behrens (1992) se pasa revista a la historia de los heliógrafos.

8.2 INSTRUMENTOS Y SENSORES

8.2.1 Método pirheliométrico

8.2.1.1 Generalidades

Este método, consecuencia directa de la definición de insolación de la OMM (véase la sección 8.1.1), y que, por lo tanto, se recomienda para obtener valores de referencia de la duración de la insolación, necesita un pirheliómetro a prueba de intemperie y un seguidor solar fiable para orientar el radiómetro de manera automática o, al menos, semiautomática con respecto a la posición del Sol. Se puede modificar el método si se utiliza un pirheliómetro cuyo ángulo de visión influye en la irradiancia medida cuando las nubes rodean al Sol.

Se puede controlar el umbral de insolación mediante la comparación continua de la salida del pirheliómetro con el voltaje de umbral equivalente $V_{th} = 120 \text{ W m}^{-2} \cdot R \mu \text{V W}^{-1} \text{ m}^2$, cálculo que se puede efectuar a partir de la capacidad de respuesta R del pirheliómetro. Se detecta una transición del umbral cuando $\Delta V = V - V_{th}$ cambia el signo. El contador de tiempo conectado funciona cuando $\Delta V > 0$.

³ Véase la Recomendación 10 (CIMO-VIII).

8.2.1.2 Fuentes de error

Todavía no se ha llegado a un acuerdo para definir el ángulo de visión (véase el capítulo 7 de la parte I (secciones 7.2 y 7.2.1.3)). Los resultados de dos pirheliómetros con ángulos de visión diferentes pueden arrojar grandes diferencias, en especial cuando el Sol está rodeado de nubes. Además, los errores típicos de los pirheliómetros (efecto de inclinación, dependencia de la temperatura, comportamiento no lineal y desviación nula) dependen del tipo de pirheliómetro. Se registran errores más importantes cuando la alineación con el Sol no es perfecta o la ventana de entrada está cubierta por lluvia o nieve.

8.2.2 Método piranométrico

8.2.2.1 Generalidades

El método piranométrico utilizado para obtener datos sobre la duración de la insolación se basa en la relación fundamental entre la radiación solar directa (I) y las radiaciones solares global (G) y difusa (D):

$$I \cdot \cos \zeta = G - D \quad (8.2)$$

donde ζ es el ángulo solar cenital, siendo $I \cdot \cos \zeta$ la componente horizontal de I . Para que la ecuación 8.2 se cumpla exactamente, el ángulo de visión del piranómetro que está en la sombra y mide D debe ser igual al ángulo de visión del pirheliómetro (véase el capítulo 7 de la parte I). Además, los intervalos espectrales y las constantes de tiempo de los pirheliómetros y de los piranómetros deben coincidir en la mayor medida posible.

Cuando no se disponga de un pirheliómetro que siga al Sol, pero se cuente con medidas de G y D obtenidas por un piranómetro asistido por ordenador, el criterio de insolación de la OMM conforme a la ecuación 8.2 puede expresarse así:

$$(G - D) / \cos \zeta > 120 \text{ W m}^{-2} \quad (8.3)$$

que es aplicable a lecturas instantáneas.

Las modificaciones de este método en estaciones diferentes guardan relación, ante todo, con:

- el tipo de piranómetro seleccionado;
- el dispositivo que produce la sombra (un anillo o un disco de sombra con un dispositivo de seguimiento de la trayectoria solar) y su geometría de sombras (ángulo de sombra);
- la corrección de las pérdidas debidas al anillo de sombra.

Como modificación especial, cabría señalar la sustitución del criterio de la ecuación 8.3 por una fórmula de parametrización obtenida estadísticamente (a fin de evitar la determinación del ángulo solar cenital) para las aplicaciones en los sistemas más simples de adquisición de datos (Sonntag y Behrens, 1992).

Pueden utilizarse diferentes algoritmos, basados en supuestos distintos, para estimar la duración de la insolación a partir de la medición con un solo piranómetro.

El método de Slob y Monna (Slob y Monna, 1991) se basa en los dos supuestos siguientes acerca de la relación entre irradiancia y nubosidad:

- Un cálculo bastante exacto de la irradiancia global potencial en la superficie terrestre, basado en el valor calculado de la irradiación extraterrestre (G_0), teniendo en cuenta la extinción en la atmósfera. El factor de atenuación depende de la elevación solar h y de la turbiedad T de la atmósfera. El cociente entre la irradiancia global medida y ese valor calculado de la irradiancia global con cielo despejado es un buen indicador de la presencia de nubes.

- b) Una diferencia evidente entre los valores mínimo y máximo de la irradiancia global, medida durante un intervalo de 10 minutos, presupone que las nubes ocultan temporalmente el Sol. Por otra parte, cuando no existe tal diferencia no hay insolación, o no la hay continua durante el intervalo de 10 minutos (es decir, $SD = 0$ o $SD = 10$ min).

Basándose en esos supuestos, es posible utilizar un algoritmo (Slob y Monna, 1991) para calcular la SD diaria a partir de la suma de los valores de SD cada 10 minutos. Utilizando ese algoritmo, se determina SD para intervalos sucesivos de 10 minutos (es decir, $SD_{10'} = f \cdot 10$ min, donde f es la fracción del intervalo con insolación, $0 \leq f \leq 1$). El factor de atenuación depende en gran medida de la trayectoria óptica de la luz solar viajando a través de la atmósfera. Dado que esa trayectoria está relacionada con la elevación del Sol, $h = 90^\circ - z$, el algoritmo discrimina entre tres zonas horarias. Aunque por lo general $f = 0$ o bien $f = 1$, se presta especial atención al intervalo $0 < f < 1$. Este algoritmo figura en el anexo 8.A. La incertidumbre se cifra en aproximadamente 0,6 horas para las sumas diarias, aunque estudios recientes (Hinssen y Knap, 2007; OMM, 2012) mostraron que la incertidumbre ampliada ($k = 2$) de los totales diarios puede ser superior a 1 hora.

El método Carpentras se basa en el supuesto de que es posible parametrizar y calcular, a intervalos de 1 minuto, el umbral de la irradiancia (G_{thr}) de G como función de las condiciones locales más frecuentes de turbiedad atmosférica y elevación solar (h). El algoritmo correspondiente de este método figura en el anexo 8.B. La incertidumbre ampliada alcanzable ($k = 2$) para los totales diarios es de aproximadamente 0,7 horas (OMM, 2012).

La aplicación del método Carpentras puede optimizarse utilizando el valor promedio de las irradiancias global y directa a intervalos de 1 minuto (usado como referencia) durante varios años consecutivos (un mínimo de cuatro), lo que permite determinar los coeficientes de parametrización de G_{thr} a intervalos de 1 minuto para la ubicación específica. Con ello se reduce al mínimo el error total relativo del valor de SD diario calculado mediante el método Carpentras durante largos períodos de tiempo (años) utilizando las diferencias acumuladas de SD , y también se facilita una evaluación de la incertidumbre alcanzable del método Carpentras (Morel y otros, 2012).

8.2.2.2 Fuentes de error

Según la ecuación 8.3, los errores de medición de la irradiancia solar global y difusa se propagan al calcular la irradiancia solar directa y se intensifican considerablemente por el aumento de los ángulos solares cenitales. Por tanto, la exactitud de las correcciones por pérdida de energía solar difusa debida al uso de anillos de sombra (OMM, 1984a) y la selección de la calidad del piranómetro resultan importantes a la hora de reducir el nivel de incertidumbre de los resultados.

8.2.3 Heliógrafo de Campbell-Stokes (método de quemado)

El heliógrafo de Campbell-Stokes se compone esencialmente de una superficie esférica de vidrio montada concéntricamente en una sección de un recipiente esférico cuyo diámetro es tal que los rayos del Sol caen perfectamente enfocados sobre una banda sujeta a las ranuras del recipiente. El método de sujeción de la esfera difiere conforme el instrumento se vaya a emplear en latitudes polares, templadas o tropicales. Para conseguir resultados positivos, tanto el segmento esférico como la esfera han de fabricarse con gran precisión, y el diseño de la armadura permitirá centrar la esfera en él con exactitud. El segmento esférico tiene tres pares de ranuras superpuestas para colocar las bandas de registro correspondientes a las distintas estaciones del año (una para los dos equinoccios); sus longitudes y formas se seleccionan de modo que se adapten a la óptica geométrica del sistema. Cabe destacar que el problema antes mencionado de la traza de combustión que se produce bajo condiciones de nubosidad diferentes indica que este instrumento, y desde luego cualquier otro instrumento que emplee este método, no proporciona datos exactos sobre la duración de la insolación.

En el cuadro siguiente se resumen los requisitos y las características principales de un heliógrafo de Campbell-Stokes de la versión HRP.

Características del heliógrafo de Campbell-Stokes (versión HRP)

<i>Esfera de vidrio</i>	<i>Segmento esférico</i>	<i>Bandas de registro</i>
Forma: uniforme	Material: bronce industrial o metal de durabilidad equivalente	Material: cartulina de buena calidad, no muy sensible a la humedad
Diámetro: 10 cm	Radio: 73 mm	Ancho: ajustado, dentro de 0,3 mm
Color: muy tenue o incoloro	Características adicionales:	Grosor: $0,4 \pm 0,05$ mm
Índice de refracción: $1,52 \pm 0,02$	a) Línea de mediodía central grabada transversalmente por la cara interior	Efecto de la humedad: dentro del 2%
Distancia focal: 75 mm para la luz "D" del sodio	b) Ajuste de la inclinación del segmento a la horizontal, según la latitud	Color: oscuro, homogéneo, no se notan diferencias con luz diurna difusa
	c) Base doble con dispositivos para nivelación y ajuste del acimut	Graduaciones: líneas horarias impresas en negro

8.2.3.1 **Ajustes**

Al instalar un heliógrafo se deben efectuar los ajustes siguientes:

- nivelar la base;
- ajustar el segmento esférico, de modo que la línea central de la banda equinoccial se corresponda con el ecuador celeste (la escala de latitud marcada en el soporte del segmento esférico facilita esta operación);
- comprobar que el plano vertical que pasa por el centro de la esfera y la marca de mediodía del segmento esférico estén en el plano del meridiano geográfico (ajuste norte-sur).

La mejor manera de comprobar si un heliógrafo cumple la condición estipulada en c) consiste en observar la marca o traza dejada por el sol del mediodía aparente local en la banda de registro; si el instrumento está orientado y ajustado correctamente, esa marca o traza debe caer exactamente en la línea de mediodía del segmento esférico o de la banda de registro.

8.2.3.2 **Evaluación**

Para conseguir resultados uniformes con los heliógrafos de tipo Campbell-Stokes es especialmente importante seguir estrictamente las instrucciones que se dan a continuación para evaluar los registros (heliogramas) de los HRP. La duración efectiva total de la insolación diaria debería determinarse señalando en el borde de una banda del mismo tipo las longitudes correspondientes a cada marca o traza, y midiendo la longitud total así obtenida del registro a lo largo de la banda, redondeada a la décima de hora más próxima. Al evaluar el heliograma debería procederse como sigue:

- En el caso de una marca o traza de combustión bien definida y de extremos redondos, debería reducirse la longitud en cada extremo en una magnitud igual a la mitad del radio de curvatura de la extremidad de la marca; normalmente, esto corresponderá a una reducción de la longitud total de cada traza de 0,1 horas.
- En el caso de trazas de combustión circulares, la longitud medida debería ser igual a la mitad del diámetro de la traza; si hay más de una traza circular en el heliograma del día,

bastaría considerar dos o tres marcas como equivalentes a 0,1 horas de sol; cuatro, cinco o seis trazas como equivalentes a 0,2 horas de sol; y así sucesivamente, a intervalos de 0,1 horas.

- c) Cuando la traza no es más que una línea estrecha, debería medirse la longitud total de la misma, aunque la banda de registro esté solo ligeramente descolorida.
- d) Cuando la anchura de la traza bien definida se reduzca temporalmente por lo menos un tercio, debería restarse de la longitud total 0,1 horas por cada una de dichas reducciones de anchura, sin que el máximo sustraído rebasa la mitad de la longitud total de la traza.

Para evaluar los errores aleatorios y sistemáticos que se producen al examinar los heliogramas, y a fin de asegurar la objetividad de los resultados de la comparación, se recomienda que las evaluaciones de cada uno de los instrumentos comparados sean efectuadas sucesiva e independientemente por dos o más personas familiarizadas con este tipo de trabajo.

8.2.3.3 **Versiones especiales**

Dado que el heliógrafo de Campbell-Stokes estándar no registra toda la insolación recibida durante los meses de verano en las estaciones situadas en latitudes que superan los 65°, algunos países utilizan versiones modificadas.

Una de las posibilidades consiste en utilizar dos heliógrafos de Campbell-Stokes que funcionen en sentidos opuestos, es decir, instalar uno de la manera habitual, y el otro de cara al norte.

En muchos climas puede ser necesario calentar el sistema para evitar la formación de escarcha y rocío. Las comparaciones efectuadas en climas como los del norte de Europa, entre instrumentos calentados y no calentados, han mostrado que la insolación que no se mide con la versión normal, pero que sí se registra con un sistema calentado, es del orden del 1% de la media mensual en verano y del orden del 5% al 10% en invierno.

8.2.3.4 **Fuentes de error**

Los errores de este registrador se deben, en su mayoría, a que la cartulina o banda de combustión depende de la temperatura y la humedad, y también de la combustión excesiva, especialmente cuando hay nubes dispersas (Ikeda y otros, 1986).

En latitudes medias y altas, los valores correspondientes a la mañana se ven afectados frecuentemente por el rocío o la escarcha.

8.2.4 **Dispositivos de evaluación por contraste**

El heliógrafo de Foster con conmutador es un dispositivo óptico que fue introducido en la red de Estados Unidos de América en 1953 (Foster y Foskett, 1953). Consiste en un par de fotocélulas de selenio, una de las cuales está protegida de la luz solar directa por un anillo de sombra. Las células están corregidas de forma que cuando no hay luz solar directa no se genera ninguna señal. El conmutador se activa cuando la irradiancia solar directa rebasa unos 85 W m⁻² (Hameed y Pittalwala, 1989). La posición del anillo de sombra requiere ajuste solo cuatro veces al año para concordar con los cambios estacionales de la trayectoria aparente del Sol en el cielo.

8.2.5 **Dispositivos de barrido y evaluación por contraste**

8.2.5.1 **Generalidades**

En la Comparación de mediciones automáticas de la duración de la insolación de la OMM, efectuada en el Centro de Radiación de la Asociación Regional VI en Hamburgo (Alemania)

entre 1988 y 1989, se compararon varios sensores optoelectrónicos diferentes, o sea, dispositivos de barrido y evaluación por contraste (véase, por ejemplo, OMM 1984b). En el informe de esta comparación figuran descripciones detalladas de todos los instrumentos y sensores que participaron en ese evento.

8.2.5.2 **Fuentes de error**

La distribución de las nubes en el cielo o la radiación solar reflejada por el entorno pueden afectar los resultados, tanto por los procedimientos diferentes que se utilizan para evaluar el contraste como por los ángulos de visión de las células, que son relativamente grandes. Las células fotovoltaicas de silicón sin filtros presentan típicamente una respuesta máxima en el infrarrojo cercano y una dependencia de los resultados con respecto al espectro de la radiación solar directa.

Dado que los ángulos de visión de este dispositivo (con un campo de visión relativamente pequeño, rectangular y en forma de ranura) difieren considerablemente del ángulo de visión del pirheliómetro de referencia (que tiene un campo de visión circular y simétrico), la distribución de las nubes alrededor del Sol puede causar desviaciones con respecto a los valores de referencia.

Debido al pequeño ángulo de visión, una cúpula de vidrio con impurezas puede ser una fuente específica de incertidumbre. Debería considerarse, asimismo, la capacidad de respuesta espectral del sensor además del error asociado a la elevación solar. En la actualidad se piensa que tan solo uno de los registradores comercializados, que utiliza un detector piroeléctrico, está exento de efectos espectrales.

8.3 **EXPOSICIÓN DEL HELIÓGRAFO**

Los tres aspectos fundamentales que deben observarse para hacer una exposición correcta del heliógrafo son:

- a) Los sensores deberían estar sujetos firmemente a un soporte rígido, a excepción de los sensores SONI (OMM, 1984b) que, por su diseño, pueden instalarse también en boyas.
- b) El sensor debería proporcionar una vista ininterrumpida del Sol en todas las épocas del año y durante todo el período en que se encuentre a más de 3° por encima del horizonte. Esta recomendación se puede modificar en los casos siguientes:
 - i) Las antenas pequeñas u otras obstrucciones de anchura angular pequeña ($\leq 2^\circ$) son aceptables cuando no se puede cambiar de emplazamiento; en este caso, deberían documentarse perfectamente las posiciones, elevaciones y anchuras angulares de las obstrucciones, y sería preciso estimar la pérdida potencial de horas de insolación a unas horas y días determinados mediante cálculos astronómicos del trayecto solar aparente.
 - ii) En regiones montañosas (por ejemplo, en los valles) las obstrucciones naturales son aceptables como factor del clima local y deberían documentarse como se indica en el párrafo anterior.
- c) El emplazamiento no debería estar rodeado de superficies que puedan reflejar una cantidad apreciable de radiación solar directa hacia el sensor. La radiación reflejada puede influir principalmente en los resultados de los dispositivos de medición por contraste. Algunos medios de evitar esas interferencias consistirían en no utilizar pintura blanca o con brillo y en mantener las superficies cercanas limpias de nieve o protegerlas con pantallas.

En los apartados antes mencionados se hace referencia a un ajuste del eje del sensor. Los fabricantes de ciertos sensores recomiendan inclinar el eje según la estación del año.

La clasificación de emplazamientos para las estaciones terrestres de observación en superficie (véase el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.B), de la presente Guía) proporciona más orientación sobre la selección del emplazamiento y la ubicación del heliógrafo en él a fin de optimizar la representatividad.

8.4 FUENTES GENERALES DE ERROR

La incertidumbre de la duración de la insolación registrada por tipos diferentes de instrumentos y métodos fue constatada en forma de desviación de los valores de referencia de la OMM para las condiciones meteorológicas de Hamburgo (Alemania) entre 1988 y 1989.

Los valores de referencia son también algo inciertos debido a la incertidumbre del factor de calibración del pirheliómetro utilizado y a la magnitud de su ángulo de visión (dependencia respecto de la aureola). En el caso de valores únicos, convendría tener también en cuenta la constante de tiempo.

Las fuentes generales de incertidumbre son:

- a) la calibración del registrador (ajuste del umbral de irradiancia equivalente (véase la sección 8.5));
- b) la variación típica de la respuesta del registrador debida a las condiciones meteorológicas (por ejemplo, temperatura, nubosidad y polvo), y a la posición del Sol (por ejemplo, errores de dirección y espectro solar);
- c) el ajuste deficiente y la inestabilidad de partes importantes del instrumento;
- d) la evaluación simplificada o errónea de los valores medidos;
- e) unos procedimientos erróneos para medir el tiempo;
- f) la presencia de polvo y humedad en superficies ópticas y del detector;
- g) unos niveles de mantenimiento bajos.

8.5 CALIBRACIÓN

Antes de exponer algunos métodos de calibración convendría realizar los siguientes comentarios generales:

- a) No se dispone de un método normalizado para calibrar los sensores de *SD*.
- b) En las calibraciones efectuadas al aire libre hay que emplear el método pirheliométrico para obtener datos de referencia.
- c) Debido a las diferencias existentes entre el diseño de los sensores de *SD* y los instrumentos de referencia, y también con respecto a la variabilidad natural de las condiciones de medición, hay que establecer los resultados de la calibración mediante comparaciones de largo período (algunos meses).
- d) En general, la calibración de los sensores de *SD* necesita de un procedimiento específico para ajustar sus valores de umbral (electrónicamente en el caso de los dispositivos optoeléctricos, y mediante programas informáticos en los sistemas piranométricos).
- e) Si se utilizan dispositivos optoeléctricos con salida analógica, la duración del período de calibración debería ser relativamente corta.

- f) El método de interior (en el que se utiliza una lámpara) es recomendable, ante todo, para efectuar las pruebas periódicas de la estabilidad de los instrumentos utilizados en condiciones reales.

8.5.1 Métodos de exterior

8.5.1.1 Comparación de los datos de duración de la insolación

Los valores de referencia SD_{ref} se medirán simultáneamente con los valores de la duración de la insolación SD_{cal} del sensor que se está calibrando. Como instrumento de referencia debería utilizarse un pirheliómetro montado en un dispositivo de seguimiento solar combinado con un discriminador de umbral de irradiancia (véase la sección 8.1.4). Otra posibilidad consiste en utilizar un heliógrafo de una precisión determinada recalibrado regularmente. Puesto que el requisito de exactitud del umbral de insolación de un sensor varía según las condiciones meteorológicas (véase la sección 8.1.3), los resultados de la comparación se obtendrán estadísticamente a partir de series de datos de períodos largos.

Cuando el método se aplica a la serie total de datos de un período (en condiciones de nubosidad típicas), el primer resultado de la calibración es la relación $q_{tot} = \Sigma_{tot} SD_{ref} / \Sigma_{tot} SD_{cal}$.

Para $q > 1$ o $q < 1$, la tensión de umbral equivalente se ajustará a valores menores y mayores, respectivamente. Dado que el grado del ajuste necesario no guarda una correlación grande con q_{tot} , harán falta otros períodos de comparaciones para validar por iteración el acercamiento al umbral ideal mediante la aproximación $q_{tot} = 1$. La duración de un período de calibración total puede ser de tres a seis meses en las latitudes medias de Europa. Por consiguiente, convendría que las instalaciones de calibración de la red de sensores puedan calibrar varios sensores simultáneamente. (El empleo de q_{tot} como factor de corrección de los valores ΣSD arroja resultados fiables solo si los períodos que se evalúan presentan las mismas formas de nubes que las prevalecientes durante el período de calibración. En consecuencia, este método no es recomendable).

Si el método se aplica a series de datos que se seleccionan sobre la base de unas condiciones de medición específicas (por ejemplo, nubosidad, ángulo de elevación solar, duración de la insolación relativa, hora del día), tal vez sea posible, por ejemplo, encontrar estadísticamente factores $q_{sel} = \Sigma_{sel} SD_{ref} / \Sigma_{sel} SD_{cal}$ para tipos de nubosidad diferentes. Esos factores se podrían utilizar también para corregir series de datos cuya nubosidad ha sido claramente especificada.

Por otra parte, se recomienda ajustar la tensión de umbral equivalente, especialmente si se tienen en cuenta los valores de q_{sel} para las condiciones de nubosidad menos propicias (como los cirros o los altoestratos). Se requiere también un procedimiento iterativo para validar el ajuste; según las condiciones meteorológicas prevalecientes, se necesitarán varias semanas o meses para realizar las comparaciones.

8.5.1.2 Comparación de señales analógicas

Este método está restringido a los sensores de SD que tienen una salida analógica que responde linealmente a la irradiancia solar directa recibida, al menos en el intervalo de menos de 500 W m^{-2} . La comparación entre la irradiancia de referencia medida con un pirheliómetro y la salida analógica medida simultáneamente debería efectuarse en horas de cielo despejado o en otros intervalos con irradiancia solar directa ligeramente variable por debajo de 500 W m^{-2} .

El análisis por regresión lineal de esas series de datos genera una recta de mejor ajuste, a partir de la cual se puede obtener la tensión de umbral equivalente a 120 W m^{-2} . Cuando este resultado de calibración se desvíe de la tensión certificada en más de $\pm 20\%$, el umbral del sensor se debería ajustar al valor nuevo.

En el caso de sensores de respuesta espectral pronunciada, se deberían eliminar los datos medidos a ángulos de elevación solar bajos alrededor de 120 W m^{-2} , debido a la fuerte falta de

comportamiento lineal causada por el espectro, a menos que la tensión de umbral en el orto y en el ocaso sea de interés especial. La tensión de umbral equivalente se obtendrá a partir de valores de irradiancia más altos.

8.5.1.3 **Método del umbral de irradiancia efectiva media**

El denominado método del umbral de irradiancia efectiva media (MEIT) se basa en la determinación, hora por hora, del umbral de irradiancia efectiva media I_m del sensor que se calibra.

En el primer paso de este método hay que determinar los valores $SD_{ref}(h_k, I(n))$ de SD a partir de las mediciones pirheliométricas controladas por ordenador para las horas h_k y las irradiancias de umbral ficticio $I(n)$ entre 60 y 240 $W m^{-2}$ (esto significa que $I(n) = (60 + n) W m^{-2}$ con $n = 0, 1, 2, \dots, 180$). En el segundo paso, el valor horario de SD del detector, $SD(h_k)$, se comparará con $SD_{ref}(h_k, I(n))$ para encontrar el valor $n = n_k$ para el cual $SD(h_k)$ es igual a $SD_{ref}(h_k, I(n_k))$, donde $I(n_k)$ representa el valor del MEIT de la hora h_k : $I_m(h_k) = (60 + n_k) W m^{-2}$. Si no se encuentra directamente n_k , tendrá que ser interpolado a partir de valores adyacentes.

En el tercer paso se ajustará la tensión de umbral equivalente del registrador si la desviación relativa entre un valor del MEIT I_m y el umbral ideal de 120 $W m^{-2}$ es superior a $\pm 20\%$. El valor medio debería arrojar, por ejemplo, un promedio mensual debido a la gran dispersión de las desviaciones de los valores horarios del MEIT.

El método no es aplicable a horas en las que predominan las transiciones de umbral rápidas; el gradiente medio de una hora debería ser inferior a 5 $W m^{-2} s^{-1}$. Los valores del MEIT no son representativos del conjunto total de datos correspondientes al período de calibración.

8.5.2 **Método de interior**

Dado que en un recinto interior resulta difícil simular la distribución de los flujos solares directo y difuso, solo se puede recomendar una "calibración de reserva", aplicable a los sensores de SD que tienen una tensión de umbral equivalente ajustable. El equipo de prueba de laboratorio consiste en una fuente de radiación estabilizada (de preferencia con un espectro solar aproximado), un soporte para efectuar un ajuste local preciso del sensor de SD y un sensor de SD (cuidadosamente calibrado en exterior) que se emplea como referencia. Los sensores de referencia y de prueba deberían ser del mismo modelo.

Al comienzo del procedimiento de prueba, se dispone el sensor de referencia precisamente en el haz de la lámpara, de manera que la salida analógica o el "heliógrafo de conmutador" habitual indiquen 120 $W m^{-2}$. A continuación, se sustituye de manera precisa el dispositivo de referencia por el de prueba, cuya tensión de umbral equivalente se ajustará lo necesario para activar el conmutador o para conseguir un equivalente de 120 $W m^{-2}$. Se comprobará la repetibilidad de los resultados intercambiando repetidas veces los instrumentos.

8.6 **MANTENIMIENTO**

El mantenimiento ordinario que efectuarán los técnicos consiste en:

- a) Limpieza: todos los sensores necesitan una limpieza cotidiana de las ventanas de entrada, especialmente los dispositivos de barrido, cuyos ángulos de visión son pequeños. Los instrumentos que no tengan dispositivos para evitar el rocío y la escarcha deberían limpiarse más de una vez en ciertos días.
- b) Comprobación: habría que comprobar diariamente la rotación de las partes (de barrido) especiales, y también los valores de verificación del sistema de adquisición de datos.

- c) Cambios de registro: en el caso de los heliógrafos de Campbell-Stokes se cambiará la cartulina todos los días; en otros dispositivos se reemplazarán periódicamente los registradores de datos apropiados.
- d) Ajustes: hay que efectuar ajustes cuando el fabricante recomienda que se modifique la inclinación del sensor según la estación del año o, eventualmente, después de temporales fuertes.

Los ingenieros o técnicos se encargarán del mantenimiento de las partes especiales de los sensores y de los sistemas de adquisición de datos utilizados, conforme a las instrucciones de los manuales correspondientes.

ANEXO 8.A. ALGORITMO PARA ESTIMAR LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN A PARTIR DE MEDICIONES DE LA IRRADIANCIA GLOBAL DIRECTA

(véase Slob y Monna, 1991)

La estimación del valor de SD diario se basa en la suma de las fracciones f a intervalos de 10 minutos, es decir, $SD = \sum SD_{10'}$, donde $SD_{10'} = f \leq 10$ min. En la práctica, $f = 0$ (insolación nula, cielo cubierto), pero se presta especial atención a los valores tales que $0 < f < 1$ (parcialmente soleado, parcialmente cubierto). Dado que la correlación entre la SD y la irradiación global, medida horizontalmente, depende de la elevación del Sol (h), la discriminación se efectúa en primer lugar en términos de $\sin(h)$.

Son aplicables las variables siguientes:

- h Ángulo de elevación del Sol, en grados
- G Irradiancia global sobre una superficie horizontal, en vatios por metro cuadrado
- I Irradiancia directa sobre una superficie perpendicular a la dirección del Sol, en vatios por metro cuadrado
- D Radiación difusa sobre una superficie horizontal, en vatios por metro cuadrado
- T_L Turbiedad de Linke (adimensional)

Para los valores medidos de G , se verifica:

- G representa un promedio en 10 minutos de la irradiancia global medida
- G_{\min} representa el valor mínimo de la irradiancia global, medido durante el intervalo de 10 minutos
- G_{\max} representa el valor máximo de la irradiancia global, medido durante el intervalo de 10 minutos ($G_{\min} \leq G \leq G_{\max}$)

Ecuaciones utilizadas:

- $G_0 = I_0 \sin(h)$, $I_0 = 1\,367 \text{ W m}^{-2}$ (para la irradiancia extraterrestre)
- $I = I_0 \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))$, $I_0 = 1\,367 \text{ W m}^{-2}$
- $c = (G - D)/(I \sin(h))$, donde
 - $T_L = 4$ y
 - $D = 1,2 G_{\min}$ si $(1,2 G_{\min} < 0,4)$; en caso contrario,
 - $D = 0,4$

Elevación del Sol	$\sin(h) < 0,1$, $h < 5,7^\circ$	$0,1 \leq \sin(h) \leq 0,3$, $5,7^\circ \leq h \leq 17,5^\circ$	$\sin(h) \geq 0,3$, $h \geq 17,5^\circ$							
Otros criterios	No hay otros criterios de decisión	Es $G/G_0 \leq \{0,2 + \sin(h)/3 + \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ con $T_L = 6$?		Es $G_{\max}/G_0 < 0,4$?						
				Si "sí"			Si "no"			
				Es $G_{\min}/G_0 > \{0,3 + \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ con $T_L = 10$?						
				Si "sí"			Si "no"			
				Es $G_{\max}/G_0 > \{0,3 + \exp(-T_L/(0,9 + 9,4 \sin(h)))\}$ y $G_{\max} - G_{\min} < 0,1 G_0$ con $T_L = 10$?						
				Si "sí"		Si "no"				
						$c < 0$	$0 \leq c \leq 1$	$c > 1$		
Resultado	$f = 0$	$f = 0$	$f = 1$	$f = 0$	$f = 1$	$f = 1$	$f = 0$	$f = c$	$f = 1$	

ANEXO 8.B. ALGORITMO PARA ESTIMAR LA DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN A PARTIR DE MEDICIONES DE LA IRRADIANCIA GLOBAL A INTERVALOS DE 1 MINUTO

(método Carpentras; véanse OMM, 1998 y 2012)

Este método, elaborado por el Centro Radiométrico Regional de la OMM de Carpentras (Francia) y descrito por Oliviéri (OMM, 1998), consta de un algoritmo que calcula la *SD* cada minuto mediante la medición de valores medios de la irradiancia global (*G*) a intervalos de 1 minuto en comparación con un valor umbral (G_{thr}) parametrizado por dos coeficientes (*A*, *B*) y la elevación solar *h* (específicamente, $\sin(h)$).

Son aplicables las variables siguientes:

- h* Ángulo de elevación del Sol, en grados (véase el capítulo 7 de la parte I (anexo 7.D))
- G* Irradiancia global sobre una superficie horizontal, en vatios por metro cuadrado (muestreos a intervalos de 1 segundo, promedio a intervalos de 1 minuto)

Ecuaciones utilizadas:

$$G_{thr} = F_c \times \text{Mod}$$

$$\text{Mod} = 1\,080 (\sin(h))^{1,25}$$

$$F_c = A + B \cos(2\pi d/365)$$

donde *Mod* representa la irradiancia global obtenida en un día despejado modelo (sin nubes y con un valor medio de turbiedad); F_c representa un factor cuyo valor empírico es próximo a 0,7; y *d* es el número del día en la secuencia anual.

El factor F_c , que generalmente varía entre 0,5 y 0,8, depende de las condiciones climáticas de la ubicación, y los coeficientes *A* y *B* pueden calcularse empíricamente mediante la comparación a largo plazo entre *SD* y las mediciones del pirheliómetro (Morel y otros, 2012). Alternativamente, la presencia de instrumentos cercanos o, mejor aún, en la misma ubicación para medir la turbiedad atmosférica permite determinar el factor F_c con mayor precisión. Se ha observado que los coeficientes *A* y *B* experimentan variaciones en relación con la latitud (*B* tiende hacia valores negativos para el hemisferio sur, mientras que *A* disminuye con la latitud).

El algoritmo se ejecuta cada minuto y se puede expresar de la siguiente forma:

Elevación del Sol	$h < 3^\circ$	$h \geq 3^\circ$	
Criterios	No hay criterios de decisión	¿Es $G \geq G_{thr}$?	
		Si "sí"	Si "no"
Resultado	<i>SD</i> = 0 min	<i>SD</i> = 1 min	<i>SD</i> = 0 min

La elevación solar se debe calcular cada minuto junto con el ángulo horario solar, la ascensión recta y la declinación geocéntrica según las fórmulas astronómicas que figuran en el capítulo 7 de la parte I (anexo 7.D).

El filtrado de datos ($h \geq 3^\circ$) se aplica antes de realizar el ensayo principal y permite filtrar los errores debidos a la imperfección del modelo, la altura del sol (baja altura) y la refracción atmosférica. Se acepta una tolerancia de 3° sobre el horizonte para el requisito de que los detectores *SD* tengan una visión ininterrumpida del Sol durante todo el año. Los errores debidos

al filtrado de datos para h dan lugar a una ligera subestimación que, al ser sistemática, puede corregirse tras un largo período de mediciones. En OMM (2012) se encontrará una comparación de este método con otros y con datos SD de referencia.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Angell, J. K., 1990: "Variation in United States cloudiness and sunshine duration between 1950 and the drought year of 1988", en *Journal of Climate*, vol. 3, págs. 296 a 308.
- Baumgartner, T., 1979: "Die Schwellenintensität des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes an wolkenlosen Tagen", en *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, núm. 84, Zürich.
- Bider, M., 1958: "Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes", en *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, serie B, vol. 9, núm. 2, págs. 199 a 230.
- Coulson, K. L., 1975: *Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements*. Academic Press, Nueva York, págs. 215 a 233.
- Dyson, P., 2003: *Investigation of the Uncertainty of Sunshine Duration in the Solar and Terrestrial Radiation Network*. Instrument Test Report 674, Oficina de Meteorología de la Commonwealth.
- Foster, N. B. y L. W. Foskett, 1953: "A photoelectric sunshine recorder", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 34, págs. 212 a 215.
- Golchert, H. J., 1981: "Mittlere Monatliche Globalstrahlungsverteilungen in der Bundesrepublik Deutschland", en *Meteorologische Rundschau*, 34, págs. 143 a 151.
- Hameed, S. e I. Pittalwala, 1989: "An investigation of the instrumental effects on the historical sunshine record of the United States", en *Journal of Climate*, vol. 2, págs. 101 a 104.
- Hinssen, Y. B. L. y W. H. Knap, 2007: "Comparison of pyranometric and pyrliometric methods for the determination of sunshine duration", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 24, núm. 5, págs. 835 a 846.
- Ikeda, K., T. Aoshima y Y. Miyake, 1986: "Development of a new sunshine-duration meter", en *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 64, núm. 6, págs. 987 a 993.
- Jaenicke, R. y F. Kasten, 1978: "Estimation of atmospheric turbidity from the burned traces of the Campbell-Stokes sunshine recorder", en *Applied Optics*, vol. 17, págs. 2617 a 2621.
- Morel, J. P., E. Vuerich, J. Oliviéri y S. Mevel, 2012: "Sunshine duration measurements using the Carpentras method". Reunión de la Red de Referencia para las Mediciones de Radiación en Superficie, Postdam (Alemania), 1 a 3 de agosto de 2012.
- Organización Meteorológica Mundial, 1962: *Abridged Final Report of the Third Session of the Commission for Instruments and Methods of Observation* (WMO-No. 116 R. P. 48). Ginebra.
- , 1982: *Informe final abreviado de la octava reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación* (OMM-Nº 590). Ginebra.
- , 1984a: "Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a new correction formula" (K. Dehne), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO)*. Informe Nº 15 sobre instrumentos y métodos de observación. Ginebra.
- , 1984b: "A new sunshine duration sensor" (P. Lindner), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO)*. Informe Nº 15 sobre instrumentos y métodos de observación. Ginebra.
- , 1985: "Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration" (K. Dehne), en *Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III)*. Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Ginebra.
- , 1986: *Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI* (G. Major). Instruments and Observing Methods Report No. 16 (WMO/TD-No. 146). Ginebra.
- , 1990: *Informe final abreviado de la décima reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación* (OMM-Nº 727). Ginebra.
- , 1998: "Sunshine duration measurement using a pyranometer" (J.C. Oliviéri), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*. Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Ginebra.
- , 2010: *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-Nº 544), volumen I. Ginebra.
- , 2012: "Updating and development of methods for worldwide accurate measurements of sunshine duration" (E. Vuerich, J.P. Morel, S. Mevel, J. Oliviéri), en *Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012)*. Instruments and Observing Methods Report No. 109. Ginebra.

- Painter, H. E., 1981: "The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance", en *The Meteorological Magazine*, vol. 110, págs. 102 a 109.
- Slob, W. H. y W. A. A. Monna, 1991: *Bepaling van een directe en diffuse straling en van zonneshijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling*. KNMI TR136, De Bilt.
- Sonntag, D. y K. Behrens, 1992: "Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global-und Himmelsstrahlung", en *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, núm. 181.
- Stanghellini, C., 1981: "A simple method for evaluating sunshine duration by cloudiness observations", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 20, págs. 320 a 323.
-