

Metrología en Irradiancia Solar. Instrumentación, Calibración y Trazabilidad

F. Fabero, J.L. Balenzategui, J. Cuenca, E. Mejuto, M. Molero y J.P. Silva

CIEMAT - PVLab, Av. Complutense, 40, 28040 Madrid
Tel.: 91 3466745 - Correo electrónico: fernando.fabero@ciemat.es

RESUMEN: En este trabajo se presentan los aspectos más relevantes y la problemática actual relacionados con la medida de la magnitud irradiancia solar. Se describen los equipos más utilizados actualmente para su medida tanto para la irradiancia solar hemisférica global (piranómetros), como para la irradiancia solar directa (pirheliómetros y radiómetros de cavidad ACR) así como los procedimientos normalizados de calibración de estos instrumentos frente a patrones del mismo o superior nivel metrológico. Un comentario aparte merece la trazabilidad de las medidas de irradiancia solar a magnitudes propias del SI. Actualmente, la trazabilidad en la escala de irradiancia solar se define por consenso a partir de la llamada Referencia Radiométrica Mundial (WRR) donde el patrón de irradiancia lo constituye la irradiancia solar directa medida por un selecto grupo de ACRs que forman el llamado Grupo Estándar Mundial (WSG). Los esfuerzos que se están dedicando conjuntamente entre la Organización Mundial de Meteorología (WMO) y el CIPM para la convergencia de ambas escalas SI y WRR también se recogen aquí.

1. INTRODUCCIÓN

Sin duda el Sol es el responsable de que la vida se desarrolle y se mantenga en nuestro planeta: alrededor del 99.9 % de toda la energía que se recibe en la Tierra procede de él. La mayoría de las fuentes energéticas que utilizamos en el mundo actual, tanto renovables como no renovables, tienen su origen de manera más o menos directa en la radiación solar siendo ésta probablemente la fuente de energía de mayor influencia para el sistema climático de la Tierra y para su balance energético. Se mide y se estudia (a través de varias magnitudes físicas), entre otros campos de la ciencia en astronomía y física del espacio, medicina, agricultura, arquitectura, climatología y meteorología y también, y sobre todo en los últimos tiempos, en la generación energética con fuentes renovables.

En particular, la irradiancia solar es una magnitud fundamental para la investigación básica, la producción industrial y las aplicaciones de la energía solar (instalaciones térmicas en concentración, de alta y baja temperatura, instalaciones de autoconsumo y grandes plantas fotovoltaicas, tratamiento de aguas y detoxificación solar, desalación, aplicaciones ACS domésticas, edificación y climatización de edificios, y un largo etcétera) por cuanto todas las evaluaciones de eficiencia, la determinación del rendimiento de células y módulos solares fotovoltaicos, los ensayos de verificación y cualificación, calibración, evaluación de producción de las instalaciones, rendimiento energético, evolución tecnológica, ..., están basadas en la fiabilidad de unidades y patrones de medida adecuadamente trazados al SI. Incluso la fiabilidad de los programas de modelado, dimensionado y simulación está basada en última instancia en la calidad de los valores de recurso solar que se utilizan como datos de entrada.

Para una mayor claridad la Figura 1 muestra las principales formas de aprovechamiento de la energía solar que requieren una adecuada medida del recurso solar. Aparte de estas aplicaciones de tipo energético quedarían las puramente climatológicas que también precisan de esa medida.

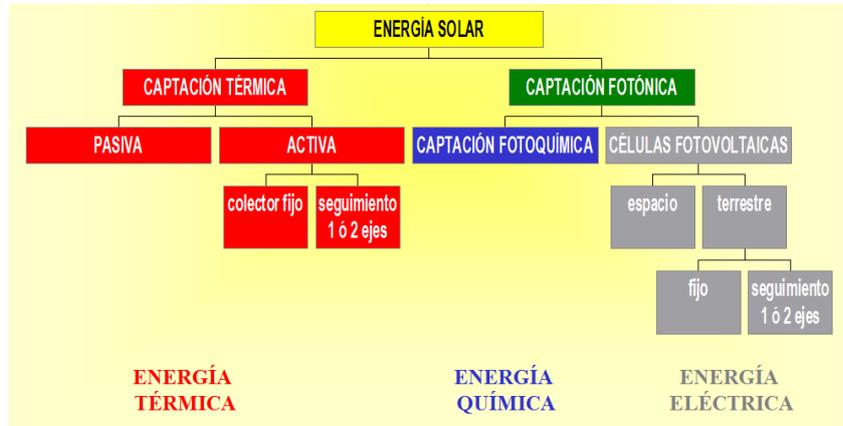


Figura 1. Distintas formas de captación de la radiación solar para aprovechamiento energético.

En este trabajo se presentan algunos aspectos básicos de la irradiancia solar que permitirán comprender de mejor manera cómo medirla y como diseminar esta magnitud desde los patrones primarios hasta los instrumentos de campo utilizados habitualmente en todas las aplicaciones que se han mencionado anteriormente.

2. COMPONENTES ESPACIALES DE LA IRRADIANCIA SOLAR. INSTRUMENTACIÓN PARA SU MEDIDA

La irradiancia solar se define como la densidad superficial de potencia (o flujo radiante) de la radiación electromagnética emitida por el Sol que se recibe en un punto de una superficie dada. Sus unidades en el SI son $W \cdot m^{-2}$. De forma aún más general, la irradiancia es el flujo radiante por unidad de área que incide en, atraviesa por o emerge de un punto en dicha superficie [1]. La Figura 2 muestra de forma visual las componentes espaciales de la irradiancia solar incidente sobre una superficie, a saber:

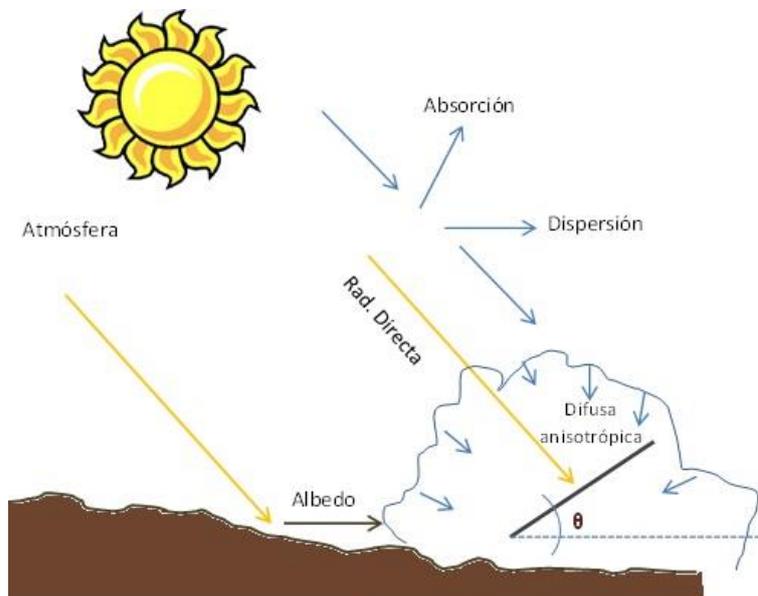


Figura 2. Componentes espaciales de la radiación solar incidente en una superficie.

- a) La componente directa, formada por los rayos que inciden en la superficie sin haber sufrido ninguna desviación en su trayectoria desde el Sol. Son los que provienen directamente del círculo solar iluminado según puede verse en el cielo.
- b) La componente difusa, formada por todos aquellos rayos que han sido dispersados por la atmósfera. Esta componente puede suponer aproximadamente un 15% de la radiación total en días soleados, pero en los días nublados supone un porcentaje mucho mayor llegando hasta un 100% en días totalmente nublados. La presencia de humo, vapor de agua no condensado, aerosoles, polvo en suspensión, etc., también provoca niveles de difusa elevados. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben ya que son capaces de ver toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben mucha menos porque solo ven la mitad de la misma.
- c) Por último la componente reflejada o albedo, formada por los rayos solares que inciden en la superficie que provienen de la reflexión del suelo. La magnitud del albedo depende del coeficiente de reflexión de la superficie que refleje los rayos solares. Las superficies horizontales no reciben este tipo de radiación solar mientras que esta componente reflejada va aumentando progresivamente con el ángulo de inclinación de la superficie receptora.

Los instrumentos utilizados para la medida de la radiación solar aprovechan el cambio de valor de una determinada propiedad física provocado en ellos por efecto de la energía radiante del Sol. Al medirse este cambio se puede cuantificar la radiación solar incidente. Desde el punto de vista metrológico los instrumentos más interesantes son de dos tipos:

1. Radiómetros de sustitución eléctrica. En estos instrumentos la energía radiante se convierte en calor al incidir sobre una superficie metálica altamente conductora que está recubierta de una pintura negra de muy alta absorbancia. Al cuantificar este calor producido mediante potencia eléctrica se obtiene el valor de la irradiancia solar incidente. Dentro de este tipo se encuentran los llamados "Absolute Cavity Radiometer" ACR o radiómetros de cavidad que se describirán más adelante. Constituyen actualmente el nivel más alto en cuanto a la escala metrológica de irradiancia solar.
2. Instrumentos termoeléctricos o termopilas. En estos instrumentos están basados en el efecto Seebeck y para determinar la irradiancia solar se mide la tensión entre dos hilos de cobre y de constantán que están unidos en dos zonas a distinta temperatura dentro del instrumento, una expuesta a la radiación solar sobre una superficie negra muy absorbente y la otra, oculta de la radiación, idealmente a temperatura ambiente y constituyendo la unión fría. Como la tensión obtenida por una única pareja de cables es muy pequeña se conectan muchas de estas uniones en serie para obtener mayor tensión de salida en el instrumento. Dentro de este tipo se encuentran los llamados piranómetros (para medir radiación global) y pirheliómetros (para medir radiación directa) que también se describirán a continuación.

Existen aún otros instrumentos (células solares, fotodiodos) ampliamente utilizados, sobre todo en instalaciones fotovoltaicas, que son dispositivos de tipo fotoeléctrico y que generan una señal de corriente o tensión proporcional a la irradiancia solar. Estos sensores van a quedar fuera del alcance de este texto pues, al ser instrumentos espectralmente selectivos, involucran una variable de tipo espectral que queda fuera de este trabajo.

Se describen a continuación estos instrumentos:

1. Radiómetros de cavidad - ACR

Como ya se ha comentado anteriormente los instrumentos que constituyen el nivel metrológico más alto para la medida de la irradiancia solar directa, que es donde se origina la escala de irradiancia solar, son los llamados radiómetros de cavidad o ACR. Funcionan bajo el principio de sustitución eléctrica mediante el cual el calor producido por la radiación solar se hace equivalente al calor producido mediante una corriente eléctrica. Estos instrumentos se construyen con 2 cavidades gemelas (ver Figura 3), una de ellas (llamada primaria) se expone intermitentemente a la radiación solar y la segunda (llamada de referencia o de compensación) opera a temperatura ambiente en oscuridad. La realización de la unidad de irradiancia, $W \cdot m^{-2}$, en un ACR se basa en la realización de otras dos magnitudes: área (m^2) y potencia (W). El área se obtiene midiendo de forma muy precisa el diámetro de la apertura de entrada a la cavidad y la potencia se calcula de forma indirecta midiendo la temperatura que alcanza la cavidad cuando se ilumina con luz solar e igualando esta temperatura mediante la aplicación de una potencia eléctrica en condiciones de oscuridad. Un diseño extremadamente cuidadoso de la cavidad, del circuito de calentamiento eléctrico, de los sensores de temperatura y sus circuitos de medida es la clave para que el principio de sustitución antes comentado se materialice adecuadamente.

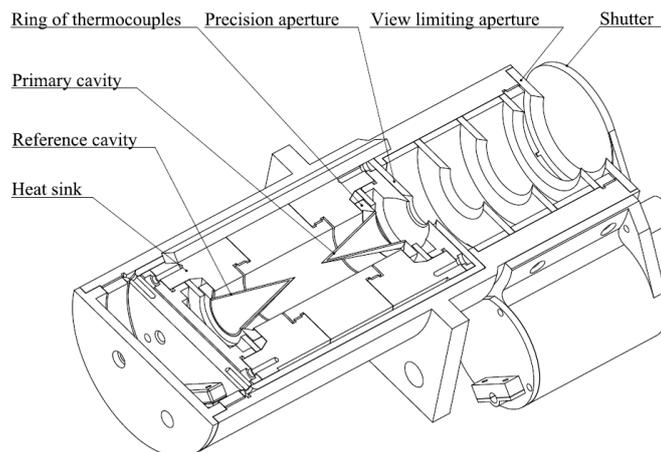


Figura 3. Corte longitudinal de un radiómetro de cavidad ACR. La luz solar penetra por la apertura frontal (zona del shutter) y calienta la cavidad primaria mientras la cavidad de referencia permanece en oscuridad tras cerrar el obturador. La posterior aplicación de una potencia eléctrica reproduce el calor generado por efecto de la radiación solar. La figura original puede encontrarse en [2].

Más detalles sobre la caracterización de estos radiómetros puede obtenerse en [3]

2. Piranómetros

Para la medida de la irradiancia solar hemisférica total (o global, y también para medir el albedo o reflejada) pueden utilizarse unos instrumentos llamados piranómetros. En la Figura 4 se recogen las distintas partes de las que se compone un piranómetro típico así como una fotografía de un piranómetro comercial. Pueden distinguirse:

- a) Dos cúpulas de un material transparente en mayor o menor grado a la radiación solar (habitualmente vidrio o cristal cuarzo) entre las cuáles se ha hecho el vacío. El objetivo de estas 2 cúpulas es, por un lado recoger la luz hemisférica procedente del plano superior del piranómetro y dirigirla hacia el absorbente de acuerdo a la ley coseno (la doble cúpula

también minimiza el efecto de los procesos de convección de aire). Por otro lado, las cúpulas protegen al absorbente del efecto de la intemperie.

b) Un absorbente con geometría circular, habitualmente un material conductor del calor pintado con pintura negra o con un recubrimiento de muy alta absorción, que se calienta por efecto de la radiación solar y sobre el que se posicionan las uniones calientes de los termopares que forman el piranómetro. La unión fría de estos termopares se realiza sobre el cuerpo metálico del mismo.

c) Una carcasa reflectante, habitualmente fabricada con plástico de color blanco, que protege el cuerpo metálico del piranómetro del calentamiento por efecto de la radiación solar.

d) Unos tornillos de nivelación y un nivel de burbuja para fijar la horizontalidad del piranómetro, en el caso de que sea necesario.

e) Un contenedor con material desecante (habitualmente gel de sílice) para evitar la penetración de humedad.

f) Los cables de salida que llevan la señal de tensión proporcional a la radiación solar incidente.



Figura 4. Partes constituyentes de un piranómetro sobre la fotografía de un piranómetro comercial y detalle de la parte receptora de la radiación solar.

3. Pirheliómetros

Se utilizan para la medida de la irradiancia solar directa. Un pirheliómetro tiene el mismo principio de funcionamiento que un piranómetro, pero en este caso la superficie receptora de la radiación solar se encuentra situada en el interior de un tubo que presenta en el otro lado una apertura protegida por un material transparente (habitualmente vidrio o cristal de cuarzo) de forma que el ángulo de apertura permitido para la radiación solar incidente sea de 5° . Con esto se consigue que solamente alcance la superficie receptora la luz que proviene del círculo solar. En la Figura 5 se presentan las partes típicas que pueden encontrarse en un pirheliómetro:

a) La ventana cubierta de material transparente por donde incide la radiación solar.

b) La superficie receptora de la radiación solar, similar a la de un piranómetro pero habitualmente de menor área.

c) Una serie de pantallas o diafragmas interiores que coliman la luz incidente de forma que el ángulo de visión de la superficie receptora sea de 5° .

d) Un testigo de alineamiento para verificar el seguimiento en 2 ejes de la posición del sol.

e) Los cables de salida que llevan la señal de tensión proporcional a la radiación solar (directa) incidente.

f) Opcionalmente, una rueda de filtros ópticos que seleccionan las longitudes de onda que alcanzan la superficie receptora y un contenedor con material desecante.

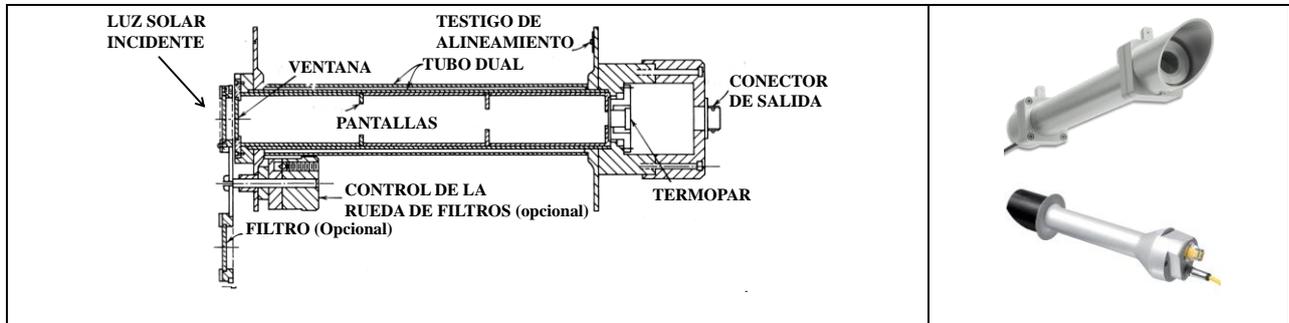


Figura 5. Partes constituyentes de un pirheliómetro y fotografías frontal y posterior de pirheliómetros comerciales.

Por último, comentar que los pirheliómetros necesitan instalarse en un dispositivo que permita hacer seguimiento solar de forma continuada, manteniendo al sensor siempre orientado al Sol.

4. Dispositivos que permiten la medida de la radiación difusa

La medida de la radiación solar difusa requiere de algún dispositivo que elimine de la radiación solar incidente aquella parte que proviene directamente del círculo solar (componente directa). Los primeros equipos que cumplían esta función eran las llamadas bandas de sombra, una de las cuáles puede observarse en la Figura 6 (izquierda). En ellas se ocultaba la fracción de cielo que contenía la radiación solar directa mediante una banda metálica que proyectaba sombra sobre la parte fotosensible del equipo de medida, normalmente un piranómetro. En la actualidad los equipos más utilizados para la medida de la irradiancia solar difusa son los que se presentan en la Figura 6 (derecha). Realmente son seguidores solares a los que se han incorporado unas esferas o discos cuya misión es ocultar perfecta y únicamente el círculo solar. Sobre el cuerpo del seguidor se adaptan soportes que permiten la colocación de uno o varios pirheliómetros con lo que se posibilita también la medida de la irradiancia solar directa. Una plataforma horizontal que permite la ubicación de uno o varios sensores adicionales que miden irradiancia solar global completa el equipo. De esta forma un único instrumento facilita la medida de todas las componentes espaciales (global, directa y difusa) de la radiación solar. En la actualidad estos equipos incorporan tecnología GPS y ellos mismos son capaces de incorporar automáticamente todos los datos necesarios para el seguimiento solar, con lo que la única labor del usuario es proporcionar la alimentación eléctrica. Digamos que la radiación difusa es un elemento fundamental a la hora de calibrar piranómetros frente a pirheliómetros según la norma ISO 9846 [4].

Una descripción más detallada de toda la instrumentación descrita en este apartado puede encontrarse en [5] y en las referencias allí recogidas.



Figura 6. Medida de la radiación solar difusa. Fotografía de una banda de sombra (izquierda) y de un seguidor solar con dispositivo de sombreado incorporado (derecha).

3. ESCALA METROLÓGICA DE LA IRRADIANCIA SOLAR. RETOS RELEVANTES

La Figura 7 muestra el camino de trazabilidad de la magnitud irradiancia solar tal y como se reconoce actualmente. Según esta figura la trazabilidad en la escala de irradiancia solar viene definida, por consenso, a partir de la llamada Referencia Radiométrica Mundial (WRR) donde el patrón de irradiancia lo constituye la irradiancia solar directa medida por un selecto grupo de ACRs que forman el llamado Grupo Estándar Mundial (WSG). Estos se intercomparan cada 5 años por designación de la WMO en el PMOD/WRC (World Radiation Center) en Davos (Suiza) en las llamadas IPC (International Pyrheliometer Comparisons). A estas IPC acuden también ACRs desde todas las partes del mundo que obtienen de esta forma trazabilidad para sus centros regionales de calibración. La última IPC (XIII) se realizó en 2021 (atrasada 1 año por la pandemia del Covid-19).

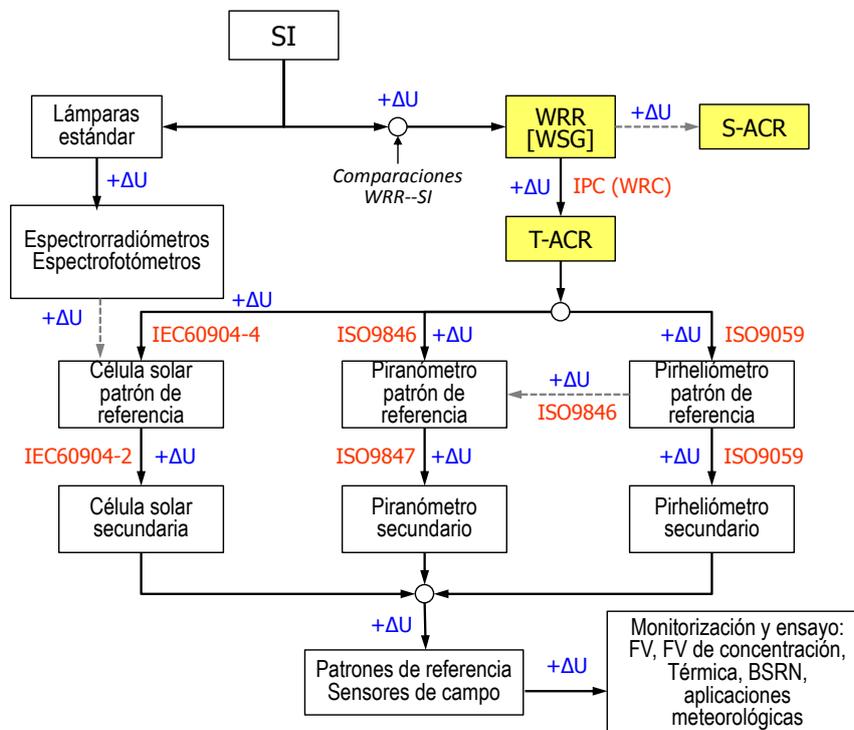


Figura 7. Ruta de trazabilidad para las medidas de irradiancia solar y sus sensores asociados. Los recuadros en color amarillo involucran ACRs, S- para uso en el espacio, T- para uso terrestre. Para completar esta figura también se incluye el camino de trazabilidad para sensores espectralmente selectivos (células solares y otros) no considerados en este trabajo. Se indican en color rojo las principales normas de aplicación en la transferencia de la escala de irradiancia. Las normas ISO que aparecen se encuentran referenciadas en [4]

Los principales retos a corto plazo para el desarrollo de la ruta de trazabilidad de la Figura 7 son:

1. El primero y más relevante es la convergencia de la escala WRR en la escala SI. El hecho de tener depositado el patrón primario de una magnitud en un determinado "artefacto" (en este caso en el WSG) no es nuevo en el campo metroológico (recordemos por ejemplo las definiciones iniciales del patrón de longitud o del patrón de masa). En

este sentido se están obteniendo grandes progresos a nivel técnico que aventuran una convergencia próxima (véase [6] y referencias allí incluidas).

2. Evaluar de forma correcta y uniforme las contribuciones de incertidumbre ΔU para cada transferencia en la ruta de trazabilidad.
3. Actualizar las normas de calibración ISO 9059, ISO 9846, ISO 9847 [4] algunas de ellas no se revisan desde los años 90 del pasado siglo, que permiten la diseminación de la magnitud hacia instrumentos de medida. También es importante incluir en este apartado la norma ISO 9060 que define y clasifica los instrumentos para medir radiación solar hemisférica y directa. Digamos que la norma ISO 9847 espera tener una nueva edición publicada durante 2022 y las normas ISO 9059 e ISO 9846 esperan sus nuevas ediciones para 2024.

Por último, digamos que es importante destacar que el desarrollo metrológico de la magnitud irradiancia solar a nivel nacional debe basarse en los siguientes pilares:

1. Por un lado UNE, la Asociación Española de Normalización, como marco en el que se desarrolla el proceso normativo ISO e IEC sobre los procedimientos de calibración y transferencia de la escala metrológica.
2. Por otro lado ENAC, la Entidad Nacional de Acreditación, y los Laboratorios Acreditados por ENAC, como responsables de que la aplicación de las normas de calibración que permiten diseminar la magnitud se produzca de forma adecuada.
3. Y finalmente CEM, el Centro Español de Metrología, como garante último y fundamental para que todo el proceso metrológico sea el correcto.

4. REFERENCIAS

- [1] McCluney R., Introduction to Radiometry and Photometry. 2nd Ed. Artech House (1994), IBoston-London
- [2] Fang W, Wang H, Li H, Wang Y (2014) Total solar irradiance monitor for Chinese FY-3A and FY-3B satellites - instrument design. Sol Phys. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0595-6>
- [3] J.L. Balenzategui, J. De Lucas, M. Molero, J. Cuenca, F. Fabero, A. González-Leiton, J.P. Silva, E. Mejuto. Caracterización de radiómetros de cavidad para la medida de la irradiancia solar con trazabilidad al WRR/SI. Actas de este Congreso.
- [4] ISO 9059: Calibration of field pyrhemometers by comparison to a reference pyrhemometer; ISO 9060: Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation; ISO 9846: Calibration of a pyranometer using a pyrhemometer; ISO 9847: Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.I
- [5] J.L. Balenzategui, F. Fabero, J.P. Silva, S. Wilbert. Solar resources mapping: Fundamentals and Applications. Capítulo 2. Solar Radiation Measurement and Solar Radiometers - Springer, 2018. ISBN 978-3-319-97484-2.
- [6] Characterization of Absolute Cavity Radiometers for traceability to SI of solar irradiance J.L. Balenzategui, J. De Lucas, J. Cuenca, A. González-Leiton, M. Molero, F. Fabero, J.P. Silva, E. Mejuto, R. Muñoz, A. Arce, E. Prieto. Enviado a publicación a *Measurement Science and Technology*. Manuscript ID: MST-114644.