

## **EVALUACIÓN DE LA DEPENDENCIA DE LAS CALIBRACIONES DE PIRANÓMETROS CON LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES**

**Ferrera-Cobos F.<sup>\*</sup>, Zarzalejo L. F.<sup>\*\*</sup>, Valenzuela R. X.<sup>\*\*</sup>, Ramírez L.<sup>\*\*</sup>,  
Hanrieder N.<sup>\*\*\*</sup>, Wilbert S.<sup>\*\*\*</sup>, Liria J.<sup>\*\*\*\*</sup>, García G.<sup>\*\*\*\*</sup>, González S.<sup>\*\*\*\*</sup>.**

<sup>\*</sup> Universidad Complutense de Madrid (UCM). Avda. Séneca, 2, 28040 Madrid, España.

<sup>\*\*</sup> Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).  
División de Energías Renovables. Avda. Complutense 40, 28040 Madrid, España.

<sup>\*\*\*</sup> German Aerospace Center (DLR). Institute of Solar Research. Ctra. de Senés km 4,  
04200 Tabernas, España.

<sup>\*\*\*\*</sup> Plataforma Solar de Almería (PSA). Ctra. de Senés, km. 4.5, 04200 Tabernas, España.

### **RESUMEN**

Este trabajo aborda el estudio de la influencia de dos condiciones experimentales sobre las constantes de calibración de piranómetros. Las condiciones experimentales estudiadas son el ángulo de elevación solar y la velocidad del viento. Los resultados sugieren que la influencia sobre las constantes de calibración puede describirse mediante una dependencia lineal respecto del ángulo de elevación solar y la velocidad del viento, individualmente. El estudio llevado a cabo también evidencia que la influencia de ambos factores puede caracterizarse como una dependencia conjunta. Los resultados del análisis de variación (ANOVA) realizado subrayan las diferencias entre las calibraciones realizadas con ángulos de elevación solar bajos, medios y altos.

**PALABRAS CLAVE:** Calibraciones, Energía Solar, Recurso Solar, Metrología

### **ABSTRACT**

This work addresses the study of the influence of two experimental conditions on the calibration constants of pyranometers. The experimental conditions studied were the solar elevation angle and the wind speed. The results suggest that the influence on the calibration constants can be described by a linear dependence with respect to the solar elevation angle and the wind speed, individually. The study carried out also shows that the influence of both factors can be characterized as a joint dependence. The results of the analysis of variance (ANOVA) performed underline the differences between the calibrations performed with low, medium and high solar elevation angles.

**KEYWORDS:** Calibrations, Solar Energy, Solar Resource, Metrology

## INTRODUCCIÓN

Una adecuada calibración de piranómetros constituye el primer paso para una medida fiable de la radiación solar. Teniendo en cuenta que existen distintos protocolos de calibración de piranómetros normalizados, la principal motivación de este trabajo es mejorar el conocimiento y la comprensión de los factores que afectan a la determinación de la sensibilidad de piranómetros durante una campaña de calibración al aire libre. Profundizar en el conocimiento de estos factores propicia que los resultados de las calibraciones sean más fiables, así como una aplicación más adecuada de las calibraciones obtenidas.

Diversos autores han abordado en los últimos años la influencia de las condiciones experimentales o climatológicas sobre las calibraciones de piranómetros. Por ejemplo, (Olano et al., 2015) encontraron pequeñas diferencias dependiendo de las condiciones de cielo bajo las cuales se realizarán las calibraciones. En (Dooraghi et al., 2014) se estudia la implementación de una constante de calibración como una función del ángulo cenital, con buenos resultados para cielos despejados o parcialmente cubiertos. La influencia del ángulo cenital sobre las calibraciones de piranómetros también fue abordada por (Habte et al., 2017, 2016).

Durante el último lustro y dentro del marco del proyecto Sfera 2 se han realizado campañas de calibración e intercomparación de piranómetros y pirheliómetros en las instalaciones de la Plataforma solar de Almería (PSA-CIEMAT) en Tabernas, Almería. En junio de 2017 se llevó a cabo la última campaña de calibración en la que participaron 13 piranómetros. A partir de los datos obtenidos en esta campaña, se procede al estudio y análisis de la influencia que tienen las condiciones experimentales sobre los resultados de la calibración. En este trabajo concretamente se va a abordar la influencia del ángulo de elevación solar y la velocidad de viento.

## CAMPAÑA JUNIO 2017 EN LA PSA

Esta campaña de calibración se llevó a cabo del 26/06/2017 al 13/07/2017 en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA) en Almería, España. Puesto que se va a emplear el método de calibración piranómetro vs pirheliómetro (ISO, 1993) se van a utilizar dos bancos de calibración. El primero consiste en un sistema de seguimiento solar donde se sitúan dos radiómetros de cavidad absoluta PMO6-CC (ACR) (WRC, 2009) con números de serie 807 y 106 que se usarán como pirheliómetros de referencia para la calibración. En una bancada horizontal se sitúan los piranómetros a calibrar. El piranómetro de referencia Kipp & Zonen CMP22 con número de serie 110288 se dispuso en un seguidor Kipp & Zonen 2-AP (Kipp & Zonen, 2005). Los datos se almacenan en una tarjeta modelo IMP 35951C y en un datalogger Campbell Scientific CR3000 (Campbell Scientific Inc., 2013). En la Tabla 1 se detallan los piranómetros que participaron en esta campaña.

## DATOS AUXILIARES

Los datos auxiliares fueron proporcionados por una estación meteorológica en la PSA, que está operada por el Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR). Los instrumentos de estación meteorológica se muestran en la Tabla 2. Esta estación nos proporciona datos de dirección y velocidad del viento, presión barométrica y humedad relativa, registrados en períodos de 10 segundos. Más detalles sobre la estación se encuentran en (Pozo-Vázquez et al., 2011).

**Tabla 1. Piranómetros participantes en la campaña de calibración realizada en la PSA en Junio de 2017**

Pirheliómetro	Tipo de Pirheliómetro	Fabricante	Modelo	Número de Serie	Sensibilidad previa ( $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )
1	Termopila	Kipp & Zonen	CMP22	140048	9.28
2	Termopila	Kipp & Zonen	CM21	970440	17.64
3	Termopila	Kipp & Zonen	CM11	976431	5.12
4	Termopila	Kipp & Zonen	CMP21	150613	8.24
5	Termopila	Kipp & Zonen	CMP11	070357	8.58
6	Termopila	Kipp & Zonen	CMP22	080038	9.72
7	Termopila	Kipp & Zonen	CMP11	140944	8.60
8	Termopila	Kipp & Zonen	CMP21	080040	10.52
9	Termopila	Kipp & Zonen	CMP21	110867	9.10
10	Termopila	Kipp & Zonen	CMP21	110877	8.61
11	Termopila	Kipp & Zonen	CM21	010902	10.90
12	Termopila	Kipp & Zonen	CM21	010903	11.10
13	Termopila	Kipp & Zonen	CM11	976451	5.11

**Tabla 2. Instrumentos presentes en la estación meteorológica**

Instrumento	Fabricante	Modelo	Medida
Veleta	NRG	200	Dirección del viento
Anemómetro	Thies Klima	4.3351.00.161	Velocidad del viento
Barómetro	Setra	278	Presión atmosférica
Termómetro	Campbell Scientific	CS215	Temperatura ambiente y humedad relativa

## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

Para el procedimiento de calibración de los pirheliómetros se ha seguido las indicaciones de la normativa 9846:1993(E) (ISO, 1993). Se ha empleado el procedimiento de sombreado continuo, este consiste en que el piranómetro de referencia esta sombreado continuamente para medir la irradiancia difusa horizontal (DHI) y junto con la medida de irradiancia directa normal (DNI) del pirheliómetro patrón calcular la irradiancia global horizontal (GHI) de referencia. A continuación se resumen las principales pautas del procedimiento de calibración:

- Condiciones de irradiancia: DNI por encima de  $300 \text{ Wm}^{-2}$ . La irradiancia horizontal directa debe ser superior al 80% de la GHI.
- Turbidez atmosférica: los valores de turbidez de Linke han de estar por debajo de 6.
- Condiciones del viento: consideramos aceptable una velocidad del viento inferior a  $5 \text{ ms}^{-1}$  si proviene de la dirección del azimut solar como otros autores han considerado previamente (Michalsky et al., 2011; Reda et al., 2014; Wilbert et al., 2010); no hay restricciones para vientos procedentes de otras direcciones.
- Procedimiento de medición: consiste en al menos 20 series de 20 minutos de duración cada una.
- La determinación del factor de calibración y la constante de calibración en  $\mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$  se realiza empleando las Ecs (1) y (2).

$$C(k) = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1, i \neq j}^m V_G(i)}{\sum_{i=1, i \neq j}^m [V_B(i) \cdot F_B \cos \eta(i) + V_D(i) \cdot F_D]} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C(k) \quad (2)$$

En donde  $i$  indica la posición de cada registro dentro de su serie,  $k$  es la posición de cada serie dentro del total de series,  $n$  es el número total de series,  $j$  indica los registros eliminados de cada serie,  $m$  el número total de registros válidos,  $V_G$  el voltaje medido por el piranómetro a calibrar,  $V_D$  el voltaje medido por el piranómetro patrón,  $V_B$  el voltaje medido por el pirheliómetro patrón,  $F_B$  la constante de calibración del pirheliómetro patrón,  $F_D$  la constante de calibración del piranómetro patrón y  $\eta$  es el ángulo de incidencia solar. El cálculo de la incertidumbre de calibración se realizó utilizando (JCGM, 1995; Reda, 2011).

## RESULTADOS

Para caracterizar las influencias de las condiciones experimentales se han realizado diversos análisis. En primer lugar se ha estudiado las influencias de las condiciones individualmente, por lo cual se ha realizado una regresión lineal para comprobar la hipótesis de que la influencia de ambas condiciones experimentales se puede modelar mediante una dependencia lineal. Por otra parte se ha comprobado mediante una regresión múltiple que la dependencia conjunta del ángulo de elevación solar y la velocidad del viento se puede describir mediante una codependencia de ambos factores. Posteriormente se ha realizado un análisis ANOVA (analysis of variance) para estudiar las diferencias entre las calibraciones realizadas con ángulos de elevación solar bajos, medios y altos; y las realizadas con velocidades de viento bajas y altas.

### INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ELEVACIÓN SOLAR

Para comprobar la hipótesis de dependencia lineal se realiza un ajuste lineal según la ec (3):

$$C = a + b\gamma \quad (3)$$

En donde  $C$  es la constante de calibración en  $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ , y  $\gamma$  es el ángulo de elevación solar en grados. Como muestra la Tabla 3, en 12 de los 13 piranómetros se cumple la hipótesis de dependencia lineal ya que el p-valor de ajuste es inferior al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

### INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

En este caso también se recurre a un ajuste lineal como muestra la Ec. (4) para estudiar la dependencia de las calibraciones con la velocidad del viento.

$$C = c + dv \quad (4)$$

Nuevamente  $C$  es la constante de calibración en  $\mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$ , y  $v$  es la velocidad del viento en  $\text{ms}^{-1}$ . La hipótesis de dependencia lineal se cumple para 10 de los 13 piranómetros, como muestra la Tabla 4, puesto que para ellos se obtiene un  $p$ -valor inferior a  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 3. Resultados del ajuste con  $\gamma$ . Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis**

<b>Modelo</b>	<b>Número de Serie</b>	<b>P-valor</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
<u>CMP22</u>	<u>140048</u>	<u>0.0014</u>	<u>9.32</u>	<u>0.0004</u>
CM21	970440	0.0000	17.65	0.0029
<u>CM11</u>	<u>976431</u>	<u>0.0000</u>	<u>5.15</u>	<u>0.0016</u>
<u>CMP21</u>	<u>150613</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.15</u>	<u>0.0029</u>
<u>CMP11</u>	<u>070357</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.48</u>	<u>0.0023</u>
CMP22	080038	0.0000	9.68	0.0024
<u>CMP11</u>	<u>140944</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.51</u>	<u>0.0026</u>
<u>CMP21</u>	<u>080040</u>	<u>0.0000</u>	<u>10.56</u>	<u>0.0041</u>
<u>CM21</u>	<u>010902</u>	<u>0.0018</u>	<u>11.08</u>	<u>0.0008</u>
CM21	010903	0.4379	11.34	-0.0002
<u>CM11</u>	<u>976451</u>	<u>0.0000</u>	<u>4.87</u>	<u>0.0024</u>
<u>CMP21</u>	<u>110867</u>	<u>0.0000</u>	<u>9.09</u>	<u>0.0012</u>
<u>CMP22</u>	<u>110877</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.59</u>	<u>0.0012</u>

**Tabla 4. Resultados del ajuste para  $v$ . Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis.**

<b>Modelo</b>	<b>Número de Serie</b>	<b>P-valor</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
CMP22	140048	0.0664	9.35	-0.0015
CM21	970440	0.0001	17.74	0.0140
<u>CM11</u>	<u>976431</u>	<u>0.0000</u>	<u>5.21</u>	<u>0.0062</u>
<u>CMP21</u>	<u>150613</u>	<u>0.0001</u>	<u>8.25</u>	<u>0.0099</u>
<u>CMP11</u>	<u>070357</u>	<u>0.0006</u>	<u>8.57</u>	<u>0.0070</u>
<u>CMP22</u>	<u>080038</u>	<u>0.0234</u>	<u>9.78</u>	<u>0.0054</u>
<u>CMP11</u>	<u>140944</u>	<u>0.0004</u>	<u>8.61</u>	<u>0.0085</u>
CMP21	080040	0.0766	10.75	0.0080
<u>CM21</u>	<u>010902</u>	<u>0.0288</u>	<u>11.15</u>	<u>-0.0038</u>
<u>CM21</u>	<u>010903</u>	<u>0.0006</u>	<u>11.36</u>	<u>-0.0042</u>
<u>CM11</u>	<u>976451</u>	<u>0.0000</u>	<u>4.94</u>	<u>0.0116</u>
CMP21	110867	0.4324	9.15	0.0010
<u>CMP22</u>	<u>110877</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.63</u>	<u>0.0053</u>

## INFLUENCIA CONJUNTA DE AMBOS FACTORES

Se han realizado dos análisis. Para estudiar la influencia conjunta se ha recurrido a una regresión múltiple con el ángulo de elevación solar y la velocidad de viento como variables. Además se ha llevado a cabo un análisis ANOVA para estudiar la similitud estadística entre las calibraciones realizadas bajo distintas condiciones de elevación solar, velocidad de viento y si la interacción de ambos factores es estadísticamente significativa.

### REGRESION MULTIPLE

Se ha llevado a cabo una regresión múltiple de la forma que indica la Ec. (5).

$$C = e_1\gamma + e_2v + e_3\gamma v + f \quad (5)$$

En donde  $C$  es la constante de calibración en  $\mu V/(Wm^{-2})$ ,  $\gamma$  es el ángulo de elevación solar en grados y  $v$  es la velocidad de del viento en  $ms^{-1}$ . En la Tabla 5 se muestran los resultados del ajuste. En ella se puede observar que todos los pirheliómetros cumplen la hipótesis pues presentan p-valores por debajo del nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , y cumplen la Ec. (5).

**Tabla 5. Resultados de la regresión múltiple. Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis.**

Modelo	Número de Serie	p_val	$f$	$e_1$	$e_2$	$e_3$
CMP22	140048	0.0000	9.30	0.0012	0.0009	-0.0001
CM21	970440	0.0000	17.51	0.0049	0.0335	-0.0005
CM11	976431	0.0000	5.12	0.0021	0.0069	-0.0001
CMP21	150613	0.0000	8.07	0.0044	0.0166	-0.0003
CMP11	070357	0.0000	8.42	0.0036	0.0113	-0.0002
CMP22	080038	0.0000	9.62	0.0039	0.0098	-0.0002
CMP11	140944	0.0000	8.44	0.0041	0.0142	-0.0003
CMP21	080040	0.0000	10.52	0.0058	0.0016	-0.0002
CM21	010902	0.0000	11.07	0.0019	-0.0064	-0.0001
CM21	010903	0.0014	11.38	-0.0003	-0.0122	0.0001
CM11	976451	0.0000	4.78	0.0036	0.0211	-0.0003
CMP21	110867	0.0000	9.08	0.0018	-0.0006	-0.0001
CMP22	110877	0.0000	8.56	0.0016	0.0069	-0.0001

## ANÁLISIS ANOVA

Para realizar el análisis ANOVA se ha dividido el rango de variables en varios grupos. El ángulo de elevación solar se ha dividido en tres grupos, "bajo" (ángulo elevación solar  $\leq 40^\circ$ ), "medio" ( $40^\circ \leq$  ángulo elevación solar  $\leq 50^\circ$ ) y "alto" (ángulo elevación solar  $\geq 50^\circ$ ). Mientras que la velocidad del viento se ha dividido en dos grupos, 'bajo' (velocidad del viento  $\leq 5$  m / s) y 'alto' (velocidad del viento  $> 5$  m / s). Los resultados se muestran en la Tabla 6. El nivel de significancia del estudio es  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 6. Resultados del análisis ANOVA.**

Modelo	Número de Serie	P-valor Elevacion solar	P-valor Velocidad viento	P-valor Cruzada
CMP22	140048	0.0000	0.0000	0.6670
CM21	970440	0.0000	0.3314	0.9745
CM11	976431	0.0000	0.6155	0.6173
CMP21	150613	0.0000	0.3904	0.5731
CMP11	070357	0.0000	0.2885	0.9283
CMP22	080038	0.0000	0.0018	0.3134
CMP11	140944	0.0000	0.2397	0.7749
CMP21	080040	0.0000	0.8742	0.2187
CM21	010902	0.0000	0.0048	0.6157
CM21	010903	0.0000	0.0000	0.3514
CM11	976451	0.4709	0.0007	0.1079
CMP21	110867	0.0000	0.0190	0.8102
CMP22	110877	0.0000	0.0000	0.0888

## CONCLUSIONES

Se ha realizado una campaña de calibración de piranómetros. Con los resultados obtenidos en ella se ha estudiado la influencia que ejercen dos condiciones experimentales como el ángulo de elevación solar y la velocidad de viento ejercen sobre los resultados de calibración. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo son sólo representativos de los piranómetros que han participado en esta campaña.

Los resultados muestran que en 12 de los 13 piranómetros participantes, la influencia del ángulo de elevación solar puede describirse mediante una dependencia lineal, y las variaciones que introduce son del orden del 0.1%. Del mismo modo, para 10 de los 13 piranómetros que han participado en la campaña, la influencia de la velocidad de viento también puede modelarse por una dependencia lineal y esta influencia también es del orden de centésimas de  $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ .

Los resultados han mostrado que el mejor modelo es la influencia conjunta de ambos factores experimentales, ya que para la totalidad de los piranómetros participantes se puede describir la dependencia de la constante de calibración por una expresión conjunta del ángulo de elevación solar y la velocidad del viento como la Ec. (5). La influencia de ambas condiciones experimentales se puede cuantificar en el orden del 0.1%.

Los resultados del análisis ANOVA evidencian que para 12 de los 13 piranómetros las calibraciones obtenidas con ángulos de elevación solar bajos, medios y altos son estadísticamente grupos distintos y por tanto las diferencias entre ellas son significativas. Sin embargo no ocurre lo mismo con las velocidades del viento bajas o altas, ni con la interacción conjunta de ambos factores.

Los resultados obtenidos subrayan el diferente comportamiento de cada piranómetro frente a las condiciones experimentales, y abren la puerta a nuevos estudios para seguir profundizando en el conocimiento de los factores experimentales que afectan a la calibración de los piranómetros.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación que condujo a estos resultados ha recibido financiación del 7th Framework Programme de la Unión Europea (FP7/2007-2013) en virtud del acuerdo de subvención nº 312643 (SFERA 2).

Los autores desean agradecer a los técnicos de PSA, especialmente Antonio Campos, Jesús Valero y Juan Rafael López, por su colaboración durante la campaña de calibración así como por el mantenimiento y cuidado de las instalaciones de calibración.

## REFERENCIAS

- Campbell Scientific Inc., 2013. CR3000 Micrologger Operator 's Manual.
- Dooraghi, M., Habte, A., Reda, I., Sengupta, M., Gotseff, P., Andreas, A., 2014. Quantifying the impact of incidence-angle dependence on solar radiometric calibration. 2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. 2662–2667. doi:10.1109/PVSC.2014.6925477
- Habte, A., Sengupta, M., Andreas, A., Reda, I., Robinson, J., 2017. Radiometer calibration methods and resulting irradiance differences. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 25, 614–622. doi:10.1002/pip.2812
- Habte, A., Sengupta, M., Andreas, A., Wilcox, S., Stoffel, T., 2016. Intercomparison of 51 radiometers for determining global horizontal irradiance and direct normal irradiance measurements. *Sol. Energy* 133, 372–393. doi:10.1016/j.solener.2016.03.065
- ISO, 1993. Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrliometer.
- JCGM, 1995. Guide to the expression of uncertainty of measurement: point/counterpoint.
- Kipp & Zonen, 2005. 2 AP Instruction Manual.
- Michalsky, J., Dutton, E.G., Nelson, D., Wendell, J., Wilcox, S., Andreas, A., Gotseff, P., Myers, D., Reda, I., Stoffel, T., Behrens, K., Carlund, T., Finsterle, W., Halliwell, D., 2011. An extensive comparison of commercial pyrliometers under a wide range of routine observing conditions. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 28, 752–766. doi:10.1175/2010JTECHA1518.1
- Olano, X., Sallaberry, F., García De Jalón, A., Gastón, M., 2015. The influence of sky conditions on the standardized calibration of pyranometers and on the measurement of global solar irradiation. *Sol. Energy* 121, 116–122. doi:10.1016/j.solener.2015.07.031
- Pozo-Vázquez, D., Wilbert, S., Gueymard, C., Alados-Arboledas, L., Santos-Alamillos, F., Granados-Munoz, M., 2011. Interannual variability of long time series of DNI and GHI at PSA, Spain. *Proc SolarPACES Conf* 1–8.
- Reda, I., 2011. Method to Calculate Uncertainties in Measuring Shortwave Solar Irradiance Using Thermopile and Semiconductor Solar Radiometers.
- Reda, I., Dooraghi, M., Habte, A., Reda, I., Dooraghi, M., Habte, A., 2014. NREL Pyrliometer Comparisons : NREL Pyrliometer Comparisons : September 22 – 26 , 2014 ( NPC-2014 ).
- Wilbert, S., Janotte, N., Pitz-Paal, R., van Wely, L., Geuder, N., 2010. Reduced uncertainties of field pyrliometers through improved sensor calibration. *SolarPaces Conf.* 1–8.
- WRC, 2009. PMO6-CC Operating Manual.