

# CALIBRACIÓN DE UN RADIÓMETRO FOTOVOLTAICO SEGMENTADA EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA

**Raúl Righini, Rosana Aristegui, Santiago Fioretti**

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-  
Universidad Nacional de Luján (UNLu)  
Tel. 02323-440241–e-mail: raulrighini@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** La calibración de radiómetros en general (y de fotovoltaicos en particular) debe ser revisada en aras de lograr que sea más representativa de las condiciones reales de funcionamiento del instrumento en cuestión. Se aborda en este trabajo la calibración segmentada, usándose tres constantes de calibración para un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA. Las constantes son particulares de bandas específicas de irradiancia. La calibración aquí ensayada usando varios meses de datos para ello y dos meses de mediciones para el testeo de la misma, presenta una mejora respecto al desempeño del radiómetro del orden del 6%.

**Palabra clave:** Calibración, radiómetro solar, fotovoltaico, segmentación en irradiancia.

## INTRODUCCIÓN

La calibración de un radiómetro es una actividad pautada, en líneas generales, por algunas de las normas específicas internacionalmente adoptadas como estándares de calibración. Podemos citar como ejemplo las normas ISO 9847 o ISO 9846. Ellas apuntan, en primera instancia, a la obtención de la sensibilidad del instrumento, sensibilidad que permite transformar su variable de salida (habitualmente un voltaje) en irradiancia en el rango electromagnético en que la radiación solar incidente en la superficie terrestre se distribuye.

Dicho de otra forma, la sensibilidad de un determinado radiómetro es  $\mu$ , donde la relación entre la diferencia de voltaje ( $\Delta V$ ) entregado por el radiómetro y la irradiancia ( $\Phi$ ) que se pretende medir es:

$$\Phi = \frac{\Delta V}{\mu} \quad (1)$$

Las unidades de la sensibilidad  $\mu$  habitualmente están dadas en  $\frac{\text{microvoltios}}{\frac{W}{m^2}}$

La norma ISO 9847 especifica que, en relación con la precisión y exactitud de la determinación de las sensibilidades de calibración de un radiómetro calibrado en exteriores contra uno de referencia, debe ser tal que el desvío estándar sea menor al 0,5% (cerca del mediodía). Esta condición resulta restrictiva en condiciones de cobertura nubosa variable. También la norma restringe las mediciones durante días con cielos cubiertos a condiciones en que la media horaria de irradiación solar global sea mayor a 100 W/m<sup>2</sup>. Este tipo de indicaciones va, en opinión de los autores, decantando las mediciones a aquellas que fueron realizadas bajo condiciones de cielos despejados con poca variabilidad horaria.

1 Por otra parte, el tratamiento de los datos obtenidos requiere descartar a aquellos que impliquen un  
2 desvío excesivo de la sensibilidad individual que determinan, respecto al valor promedio global de la  
3 sensibilidad.

4  
5 Esta manera de proceder presenta ventajas, fundamentalmente en lo que hace al establecimiento de una  
6 normativa general del procedimiento de calibración, a la estandarización de las condiciones en que los  
7 datos de irradiación son obtenidos y a la evaluación de las incertezas. Su objetivo es doble: por un lado,  
8 determinar el procedimiento y, por otro, pautar la forma de obtener una **única** sensibilidad (o constante  
9 de calibración) que permita la conversión adecuada del voltaje en irradiancia.

10  
11 No obstante, hay ciertas desventajas inherentes a esta manera de proceder que pueden sintetizarse en lo  
12 siguiente: la calibración bajo ciertas condiciones sumamente favorables y el descarte de datos  
13 relacionados con desvíos elevados, condicionan la sensibilidad obtenida a ser representativa de sólo un  
14 grupo particular de situaciones de irradiancia.

15  
16 En efecto, calibrar con el Sol en ángulos cenitales relativamente menores, bajo condiciones de poca  
17 variabilidad de irradiancia, descartando datos que presenten mucha desviación, determina que la  
18 calibración del radiómetro puede no ser representativa de todas las condiciones en las que el mismo se  
19 empleará. Sin embargo, el radiómetro se usará, generalmente, para medir bajo distintas coberturas de  
20 cielo: despejado o cubierto total o parcialmente, con ángulos cenitales altos y pequeños, bajo  
21 temperaturas cambiantes, por citar solamente algunas de las variables posibles.

22  
23 El presente artículo pretende presentar una vía posible para adaptar el procedimiento de calibración con  
24 vistas a considerar de manera más efectiva las condiciones de uso de un radiómetro fotovoltaico,  
25 posibilitando una prestación mejor.

26  
27 Para ello, la primera modificación básica a analizar es tratar de usar, en vez de una sola sensibilidad para  
28 la calibración, varias de ellas. Cada una de estas sensibilidades se aplicará en un rango determinado de  
29 irradiancias (o valores de voltaje) del instrumental. De esta manera la selectividad indicada por la  
30 normativa para las condiciones de cielo bajo las cuales se calibra será reemplazada por una selectividad  
31 en la elección de la constante de calibración, representativa de las condiciones de irradiancia bajo las  
32 cuales se emplea el instrumento.

33  
34 Esta propuesta para el procedimiento de calibración forma parte de una primera aproximación en el  
35 empleo de inteligencia artificial para la evaluación de la irradiancia solar, usando múltiples variables de  
36 entrada (voltaje del radiómetro como fundamental, pero también aquellas relacionadas, por ejemplo,  
37 con la posición del Sol) (James et al., 2013; Hastie et al., 2009; Zimmerman et al., 2018, Rooster 2005).  
38 Abordar una calibración, usando distintos juegos de constantes según el rango de irradiancia, constituye  
39 un primer paso en ese sentido.

## 40 **MATERIALES Y MÉTODO**

41  
42 Se calibró un radiómetro fotovoltaico fabricado por CNEA N° G2021 04 (Bolzi et al. 1999; Bolzi et al.  
43 2002), usando como referencia un radiómetro piranométrico CMP21, N° 149433, de la firma  
44 Kipp&Zonen. Ambos equipos se encuentran midiendo simultáneamente desde el 14 de diciembre de  
45 2022 en la estación Luján de medición de radiación solar que el GERSolar administra en su predio de  
46 la UNLu (latitud= -34,58815; longitud= -59,06277). La salida de voltaje de ambos equipos es medida  
47 una vez por segundo, y los promedios minutales son almacenados en una tarjeta SD y simultáneamente  
48 grabados en una hoja de cálculo de Google Sheet, pudiéndoselos visualizar en tiempo real desde  
49 cualquier sitio que posea conexión a internet. El adquisidor de datos es el adquisidor DatIn, desarrollado  
50 por el GERSolar, de excelentes prestaciones.

51  
52 Para realizar las calibraciones del radiómetro fotovoltaico y evaluar las diferencias entre sus mediciones  
53 y las del CMP21, se emplearon datos comprendidos en el período que se extiende entre el 14 de  
54 diciembre de 2022 y el 31 de marzo de 2023. Para testear los resultados de las calibraciones se usaron  
55 mediciones de ambos equipos realizadas entre el 1 de abril de 2023 y el 8 de junio de 2023. Cabe resaltar

56 que ninguno de los datos usados para testear las calibraciones fue empleado para calibrar. De esta  
57 manera la evaluación de desempeño, en el presente artículo, se realizó bajo la mecánica habitual de uso  
58 de los radiómetros calibrados: se los calibra y luego se mide con ellos. Evaluar de esta forma resulta, a  
59 nuestro juicio, más adecuada que otra mecánica usual, consistente en evaluar resultados calibrando con  
60 parte de los datos disponibles, dejando un porcentaje de ellos para el testeo de los modelos y luego  
61 promediando los resultados de múltiples selecciones de los conjuntos de datos tomados al azar. Proceder  
62 así conlleva el riesgo de apartarse del mecanismo habitual de calibración, por un lado. Por el otro,  
63 realizar la evaluación con una serie de datos que no hayan participado nunca del proceso de calibración  
64 y, además, pertenezcan a un período temporal distinto de aquellos usados para la determinación de la (o  
65 las) sensibilidad (sensibilidades) asegura un testeo de los resultados con un radiómetro bajo sus  
66 condiciones habituales de uso.

67  
68 En principio, se analizaron los cocientes entre los voltajes entregados por ambos radiómetros: el  
69 piranométrico (CMP21) y el fotovoltaico (CNEA).

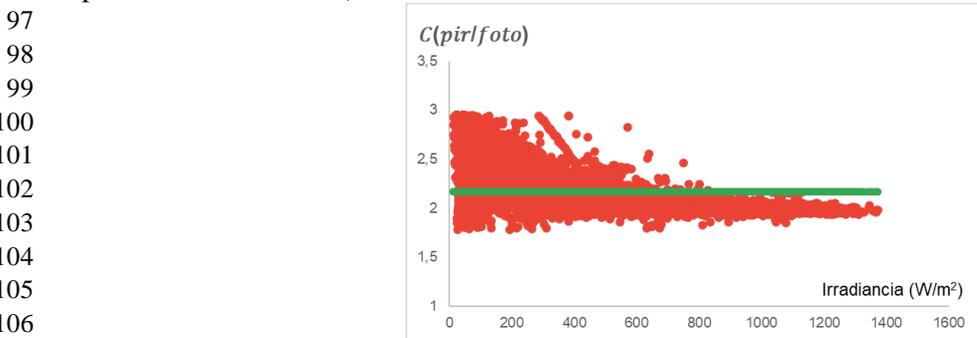
70  
71 
$$C_{pir/foto} = \frac{\text{Voltaje CMP21}}{\text{Voltaje fotovoltaico}} \quad (2)$$

72  
73 Descartando valores extremos, representativos de situaciones correspondientes a muy bajos niveles de  
74 irradiancia solar, ese cociente varía entre 37 y 1,78. Los valores más altos del cociente corresponden a  
75 valores de irradiancia que son, en general, menores a 20 W. Aquí es esperable ese tipo de  
76 comportamiento, pues la respuesta de ambos radiómetros es significativamente diferente para  
77 irradiancias bajas. Por lo que, consideramos solamente aquellos valores del cociente que se  
78 correspondan a valores de irradiancia superiores a 50 W. Ese valor de corte implica descartar valores  
79 asociados a alturas solares menores a los 7° (para los cuales la irradiancia solar es baja), o a situaciones  
80 de muy baja irradiancia. Dado que los errores relativos (que surgen de la comparación entre lo medido  
81 por el piranómetro de referencia y el fotovoltaico) son elevados y representan un aporte de energía  
82 menor, resulta conveniente descartarlos, pues de ser considerados, su peso en la determinación de la  
83 constante asociada a bajas irradiancias sería elevado y la ganancia por considerarlos, pequeña.

84  
85 Considerando ese universo para los datos analizados, encontramos que el cociente definido  
86 anteriormente se encuentra en el intervalo: (2,95; 1,78). Los valores más bajos del cociente se  
87 corresponden con valores altos de irradiancia (alrededor de 1000 W). El valor promedio del cociente es  
88 de 2,17 (promediando sobre todos los datos).

89  
90 Es decir que los desvíos máximos del cociente respecto al valor promedio general son de  
91 aproximadamente (para sus valores mínimos y máximos) 17,8 % y 36,22%, respectivamente.

92  
93 Este desvío, por lo tanto, no puede atribuirse a errores en la medición del voltaje del adquisidor de datos,  
94 o los errores asociados a los propios radiómetros. Da cuenta, en cambio, de un funcionamiento  
95 diferenciado del radiómetro fotovoltaico (tomando como parámetro de referencia el radiómetro  
96 piranométrico CMP21) en función de la irradiancia incidente sobre el mismo.



108  
109 *Figura 1: Cociente entre voltajes de los radiómetros CMP21 y Fotovoltaico, en rojo. En verde se muestra el*  
110 *valor medio de la serie de datos*

111 Es por eso que la alternativa de realizar una calibración segmentada, determinando sensibilidades  
112 diferenciadas para diferentes rangos de voltajes de salida del fotovoltaico de CNEA, se revela como una  
113 solución para mejorar la calibración y, por ende, el desempeño del radiómetro.  
114

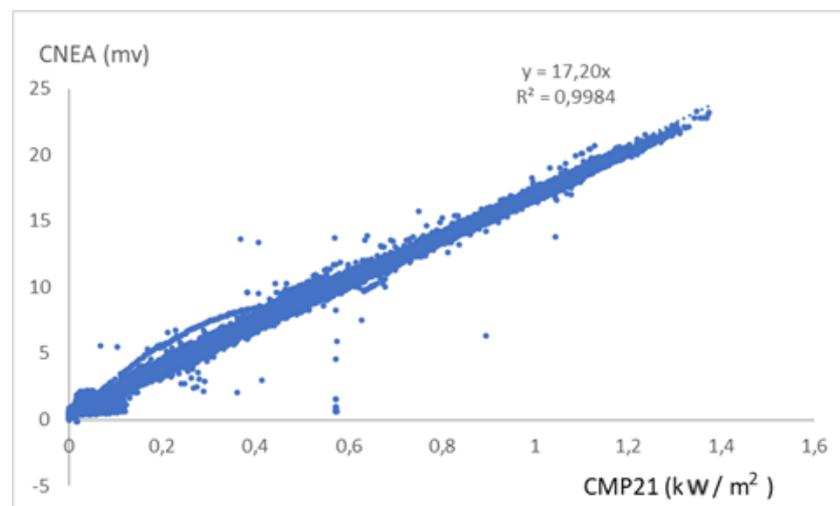
## 115 RESULTADOS

116 Para proceder a comparar los métodos, se realizó en primer lugar una calibración considerando una  
117 única sensibilidad para todo el conjunto de valores. La sensibilidad determinada por este procedimiento  
118 (la que denominaremos  $\mu_{estandar}$ )  
119

$$120 \mu_{estandar} = 17,2 \frac{\text{microvoltios}}{\frac{w}{m^2}} \quad (3)$$

121  
122 determinada con un error del 1,5%.  
123

124 En la figura 2 se muestran los datos simultáneos: por un lado el voltaje promedio minutal medido para  
125 el radiómetro fotovoltaico de CNEA ; por el otro la irradiancia promedio minutal medida por el CMP21.  
126



127  
128

129 *Figura 2: Calibración usual del radiómetro fotovoltaico de CNEA frente al CMP21*

130  
131 El desvío medio de los valores de irradiancia (definido como el promedio de la diferencia absoluta  
132 porcentual entre valores medidos por el CMP 21 y el sensor fotovoltaico) determinados para el  
133 fotovoltaico mediante la constante de calibración obtenida, fue de 21,7%, mientras que el sesgo  
134 promedio (la diferencia porcentual entre valores medidos por el CMP21 y el sensor fotovoltaico) fue de  
135 -20,8%. Esto se calculó para los propios datos usados para la calibración (con todos, sin hacer la  
136 selección que el procedimiento de calibración pauta). Mientras que el mismo desvío, calculado ahora  
137 con los datos usados para testear (desde el 1 de abril hasta el 8 de junio) fue de 26,8% y el sesgo -26,3%.  
138 Es posible que estos números parezcan demasiado altos, pero hay que considerar que los desvíos  
139 mayores ocurren en condiciones de muy baja irradiancia. En esas condiciones una diferencia entre la  
140 medición del CMP21 y el radiómetro fotovoltaico puede, porcentualmente, ser muy grande. Dado que  
141 los desvíos presentados son promedios sobre todo los valores, su peso en él es elevado. No obstante, su  
142 aporte energético es muy bajo, aportando poco a las horas de mayor irradiancia y a la radiación diaria.  
143

144 Tomando esos valores como parámetros de referencia para la comparación, se procedió a realizar una  
145 calibración segmentada, determinando tres bandas de irradiancia para obtener tres constantes de  
146 calibración para el radiómetro fotovoltaico.  
147

148 Las bandas de irradiancia (seleccionadas por una inspección visual de los datos) fueron:

149  
 150 Banda 1: (0 W/m<sup>2</sup>; 400 W/m<sup>2</sup> )  
 151 Banda 2: (400 W/m<sup>2</sup>; 610 W/m<sup>2</sup>)  
 152 Banda 3: (610 W/m<sup>2</sup>; )

153  
 154 Cada uno de esos valores de irradiancia se corresponde con un voltaje específico del radiómetro  
 155 fotovoltaico, por lo que también las bandas pueden ser dadas en función del voltaje del fotovoltaico de  
 156 CNEA. Los valores elegidos como límites para la segmentación se seleccionaron arbitrariamente. Se  
 157 trata de una decisión tomada por inspección visual del conjunto de datos considerados para la  
 158 calibración. Para fundamentar esos valores elegidos de manera matemática, es necesario realizar un  
 159 procedimiento de cálculo que estamos implementando para ser presentado en un trabajo futuro.

160  
 161 Realizando, entonces, tres calibraciones (una por banda) se obtuvieron las siguientes sensibilidades:  
 162

163  $\mu$  Banda 1= 18,36  $\frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$

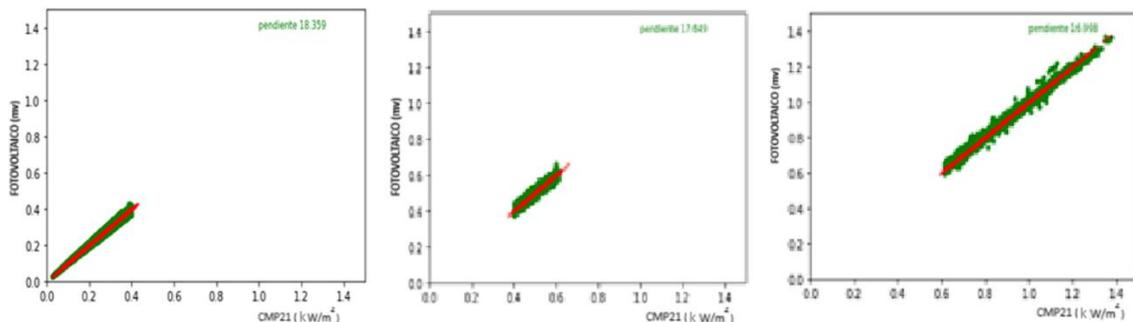
164  $\mu$  Banda 2= 17,65  $\frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$

165  $\mu$  Banda 3= 16,99  $\frac{\text{microvoltios}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$

166 Todas las constantes fueron determinadas con un error del 1,5%.

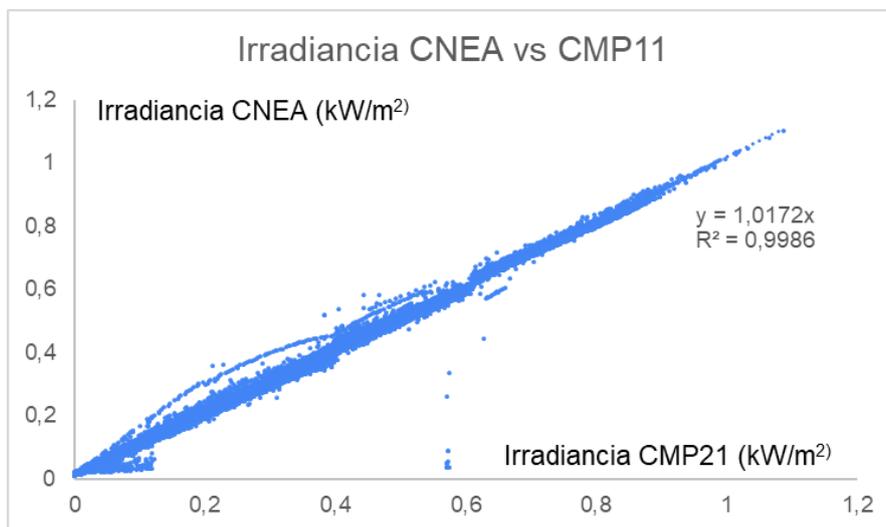
167  
 168 La figura N° 3 muestra los gráficos de las calibraciones segmentadas por bandas de irradiancia. La figura  
 169 N° 4 el gráfico comparativo entre las irradiancias medidas con el CMP21 y las calculadas con el  
 170 radiómetro fotovoltaico, aplicando la calibración segmentada a los datos de testeo.

171



172  
 173  
 174

Figura 3: Gráficos correspondientes a las calibraciones en las tres bandas seleccionadas.



175  
 176

Figura 4: Irradiancia del radiómetro fotovoltaico calibrado segmentadamente frente al CMP21

177 La comparación entre el desempeño de la calibración usual del fotovoltaico con sólo una constante de  
178 calibración y la calibración segmentada, revela un error menor para esta última. La comparación se  
179 realizó, con los datos reservados para testear.

180

181 En efecto, usando esos datos, mientras que el error medio para la energía calculada para el fotovoltaico  
182 con la calibración usual, tal como se mostró anteriormente, fue del 26,8% y su sesgo -26,3%, mientras  
183 que, los errores medio y el sesgo, para la calibración segmentada, fueron 20,7% y -19,6 %,   
184 respectivamente.

185

186 Estas diferencias son significativas y justifican, a nuestro juicio, el procedimiento llevado adelante.

187

188 Se repitió el procedimiento y las comparaciones respectivas, con la estación que el GERSolar opera en  
189 Armgstrong. Los datos analizados corresponden a mediciones simultáneas de dos radiómetros: un  
190 CMP11 y un fotovoltaico de CNEA, bajos las mismas condiciones de almacenamiento de datos que se  
191 dieron en la estación Luján. Se aplicaron allí también tres constantes de calibración para comparar el  
192 desempeño del radiómetro fotovoltaico calibrado con ellas frente a una calibración usual. Se calibró con  
193 datos minutales entre el 31 de marzo de 2023 y el 30 de abril de 2023. Se testeó con datos tomados entre  
194 el 1 de mayo y el 4 de julio de 2023. Se repitió aquí un comportamiento similar del radiómetro  
195 fotovoltaico comparado con el piranométrico. La calibración segmentada mejoró un 2% el error  
196 promedio y el sesgo con los datos de la propia calibración, pero no aportó diferencias significativas con  
197 la calibración usual cuando se analizaron los datos de testeó. No podemos determinar, hasta el momento,  
198 las causas de este comportamiento. No queda claro aún con el volumen de datos que se analizaron si  
199 esto se debe a alguna situación particular relacionado con la radiación solar en ese sitio en el período de  
200 testeó seleccionado, o a alguna característica **propia** del radiómetro que se encontraba midiendo  
201 simultáneamente con el CMP11. Se ve para el cociente entre los voltajes de los radiómetros CMP21 y  
202 Fotovoltaico instalados en Armstrong, un comportamiento similar al mostrado en la figura N°2 para la  
203 estación Luján, pero, según se explicó, no hay una mejora del comportamiento del fotovoltaico mediante  
204 su calibración segmentada. Un seguimiento durante un período más prolongado ayudará a determinar la  
205 causa de estas diferencias. De igual manera, la determinación de los límites de la segmentación mediante  
206 un proceso de cálculo no arbitrario permitirá entender mejor las condiciones requeridas para su  
207 aplicabilidad.

208

## 209 **CONCLUSIONES**

210

211 La respuesta (en voltaje) a la irradiancia de un sensor solarimétrico fotovoltaico como el construido por  
212 CNEA presenta una variabilidad tal que permite inferir un funcionamiento diferenciado en función de  
213 dicha irradiancia.

214

215 En tal sentido, una calibración segmentada en irradiancia se presenta como una alternativa válida para  
216 mejorar la prestación de un radiómetro fotovoltaico y constituye un primer paso en el empleo del  
217 aprendizaje de máquina en el cálculo de la irradiancia brindada por un radiómetro en función de  
218 múltiples variables. En el ensayo realizado, reservando datos que no se usaron para la calibración para  
219 el testeó del procedimiento, se encontró una disminución significativa (aproximadamente el 6%) del  
220 error medio en el desvío (respecto al radiómetro CMP21 tomado como referencia) comparada con una  
221 calibración usual que emplea sólo una constante con los equipos presentes en la estación Luján. La  
222 mejora fue menor con datos provenientes de un sensor fotovoltaico y uno piranométrico en la estación  
223 Armgstrong.

224

225 El uso de varias constantes de calibración no supone ninguna complicación grave en el cálculo de la  
226 irradiancia del sensor ni en el tratamiento de los datos, habida cuenta de las capacidades computacionales  
227 existentes hoy día, de la facilidad de programación de los adquirentes de datos o de la existencia de  
228 microcontroladores programables de forma sencilla, para realizar los cálculos con tres constantes en  
229 lugar de una.

230

231 El precio a pagar en ese sentido, es muy bajo frente a la mejora en las capacidades de medición del  
232 radiómetro en cuestión.

233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277

No puede obviarse, como conclusión más general, la necesidad, a nuestro juicio, de hacer una revisión crítica de los procedimientos de calibración recomendados, habida cuenta del avance tecnológico presente, las facilidades computacionales actuales y la necesidad de abordar los nuevos mecanismos de aprendizaje de máquina aplicados al instrumental destinado a medir la radiación solar.

## REFERENCIAS

- Bolzi C.G., Durán J.C., Dursi O., Renzini G. y Grossi Gallegos H. (1999) Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA. AVERMA 1 pág. 4.8.
- Bolzi C.G., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, 11.01.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York: springer.
- Norma ISO 9846 (1992). Solar Energy: Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning (Vol. 112, p. 18). New York: springer.
- Norma ISO 9847 (1992). Solar Energy: Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.
- Rooster R. (2005) High performance calibrations under cloudy sky conditions. Developments in solar engineering, Vol 56, N° 3. Pp 211-223.
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P., Gu, J., Haurlyliuk, A., Robinson, E. S., ... & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. Atmospheric Measurement Techniques, 11(1), 291-313.

## CALIBRATION OF A SEGMENTED PHOTOVOLTAIC RADIOMETER ACCORDING TO IRRADIANCE

**ABSTRACT:** The calibration of radiometers in general (and of photovoltaics in particular) should be reviewed in order to make it more representative of the actual operating conditions of the instrument in question. Segmented calibration is addressed in this work, using three calibration constants for a photovoltaic radiometer manufactured by CNEA. The constants are specific to specific irradiance bands. The calibration tested here using several months of data for it and two months of measurements for testing it, presents an improvement with respect to the performance of the radiometer of the order of 6%.

**Keywords:** Calibration, solar radiometer, photovoltaic, irradiance segmentation