

ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SENSOR PAR DESARROLLADO POR CNEA

M.J. Denegri¹, R. Righini, H. Grossi Gallegos

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

RESUMEN: Se analiza el funcionamiento de un radiómetro para medir radiación fotosintéticamente activa (PAR) fabricado por CNEA en relación a un equipo comercial de medición PAR. Se estudia el comportamiento de su constante de calibración para diferentes alturas solares, cobertura de nubes, y épocas del año. Se concluye que su comportamiento es comparable al de un sensor comercial, manteniéndose la estabilidad de la constante de calibración en todas las situaciones analizadas.

Palabras Clave: Radiación fotosintéticamente activa, medición directa

INTRODUCCIÓN

La radiación solar está íntimamente vinculada con el crecimiento y la productividad de las plantas, especialmente en la fracción del espectro comprendida entre 400 y 700 nm, definida como radiación fotosintéticamente activa (PAR). La conversión de la radiación PAR incidente y absorbida en energía química libre por la fotosíntesis, es vital en los sistemas biológicos.

La radiación fotosintéticamente activa, a su vez, puede considerarse compuesta por tres bandas, delimitadas por diferentes longitudes de onda (Larcher, 1977):

- Una banda en la que existe una fuerte absorción de luz por la clorofila, con alto efecto morfogénico, entre 400 y 510 nm.
- Una porción del espectro en la cual la clorofila absorbe muy débilmente la radiación, sin presentar efectos morfogénicos, entre 510 y 610 nm.
- Una banda en la cual la absorción de la clorofila es muy importante, en la cual se presentan fuertes efectos morfogénicos y ontogénicos, entre 610 y 720 nm.

De la medición del PAR puede obtenerse información que permita, por ejemplo estimar el balance energético de un determinado sistema biológico, o el crecimiento de un cultivo en particular (Magrin et al., 1991).

Si bien la radiación PAR es una de las informaciones requeridas para estudiar y modelar el crecimiento de los cultivos, no es frecuente contar con mediciones directas de esta variable, ya que no es una de las medidas de rutina en las estaciones meteorológicas. En general suele disponerse del dato de irradiación global (medida o estimada).

Para la medición directa del PAR existen sensores desarrollados a tal efecto, como el LI-190SA fabricado por LI-COR, y el PAR Lite, de la empresa KIPP & ZONEN. En ambos casos se utiliza como sensor un fotodiodo de silicio al que se modifica su respuesta y se le agrega un filtro para proporcionar una respuesta "cuántica" en el rango de longitudes de onda que van de 400 a 700 nm (Righini y Grossi Gallegos, 2005).

Aaslyng et al. (1999) construyeron y testearon un sensor que consistió de un fotodiodo de GaAsP y un disco difusor de acrilato blanco. Examinaron la respuesta al coseno, sensibilidad espectral y estabilidad de la calibración a largo plazo, y estas características satisficieron los requerimientos de un sensor PAR. La correlación con un sensor comercial estándar fue superior a 0.97.

A partir del año 1998 la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha desarrollado radiómetros fotovoltaicos de bajo costo. Utilizando celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino, ha construido equipos para medir la radiación solar global, los cuales fueron calibrados por el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSOLAR) de la Universidad Nacional de Luján. Estos equipos se encuentran actualmente distribuidos en distintos laboratorios del país, y se continúan desarrollando en función de la demanda de instituciones públicas y privadas (Bolzi et al., 2008). Dentro de ese tipo de desarrollo instrumental se han construido, además, radiómetros destinados a medir la energía fotosintéticamente activa proveniente del Sol.

Los radiómetros PAR desarrollados por CNEA utilizan filtros comerciales que permiten el paso de la radiación solar en la banda de longitudes de onda que delimitan la radiación PAR. Una celda de silicio transforma la radiación en un voltaje (cuyo rango varía entre 0 y alrededor de 12 mV). Mediante un procedimiento de calibración esa señal puede convertirse en una

¹ Becaria de formación de la ANPCyT

medición de la radiación PAR que está llegando al instrumento, y por medio de un data logger, ese valor puede integrarse para medir la energía total incidente en un período de tiempo preestablecido.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de un radiómetro PAR de CNEA, analizándose su constante de calibración en distintas situaciones: en función de la altura solar, del índice de claridad (kt) y de la época del año.

MATERIALES Y MÉTODO

El sensor PAR frente usado para la determinación de las constantes de calibración fue un sensor PAR Lite, de la firma Kipp & Zonen. Todas las calibraciones se hicieron empleando integrales diarias, horarias, y valores integrados cada diez minutos por un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR1000, que mide el voltaje proveniente del sensor una vez por segundo y almacena la integral de la señal cada diez minutos.

La respuesta espectral del radiómetro PAR de CNEA utilizando un filtro comercial se obtuvo a partir de la respuesta espectral medida de un sensor de silicio y la transmitancia del filtro (Figura 1).

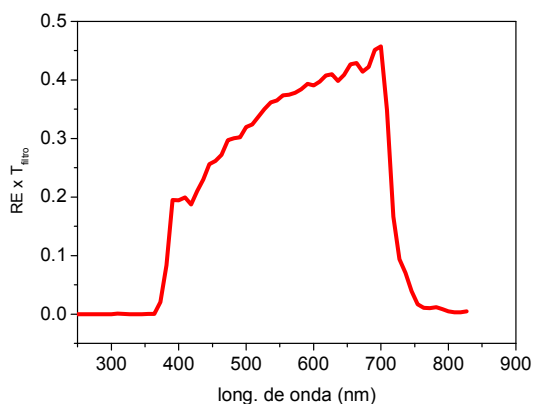


Figura 1: Respuesta espectral del radiómetro PAR de CNEA a partir de un filtro comercial.

La información utilizada para las calibraciones corresponde al período comprendido entre el 25 de septiembre de 2008 y el 9 de junio de 2009 (258 días).

Para el estudio de las correlaciones bajo distintas condiciones de cobertura de nubes, se dividieron los datos en tres categorías en función del índice de claridad kt. Se consideró como condición de cielo descubierto un $kt \geq 0.7$, el cielo cubierto estuvo caracterizado por valores de $kt < 0.3$ y el resto de los casos quedaron comprendidos en el intervalo intermedio.

El estudio de posibles variaciones estacionales en los valores de la constante de calibración se realizó analizando valores en cuatro períodos caracterizados por la declinación solar. Así se analizaron datos separando en: Noviembre, Diciembre y Enero (asociado al solsticio de verano); Mayo, Junio y Julio (asociado al solsticio de invierno); Agosto, Septiembre y Octubre; Febrero, Marzo y Abril (asociados a los equinoccios).

El análisis en función de la altura solar fue hecho considerando intervalos de 10° .

Luego, para cada categoría del índice de claridad kt se volvió a realizar un análisis para estudiar posibles variaciones en la constante en función de las estaciones y del ángulo de elevación solar. De igual manera se comparó la constante para las distintas alturas solares en función de la época del año.

En todos los casos el flujo registrado por los instrumentos se mide en micromoles de fotones o microEinteins por metro cuadrado y por segundo, definido como:

$$1 \text{ E} = N_A \cdot h \cdot f = 1 \text{ mol de fotones}$$

en donde $N_A = 6.023 \times 10^{23}$ es el número de Avogadro, $h = 6.625 \times 10^{-34}$ la constante de Planck y f la frecuencia de la radiación incidente.

RESULTADOS

Cálculo de la constante del PAR CNEA en base diaria, horaria y cada diez minutos

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan las correlaciones establecidas entre los valores registrados con el sensor PAR LITE y el PAR CNEA trabajando en base diaria, horaria y cada diez minutos.

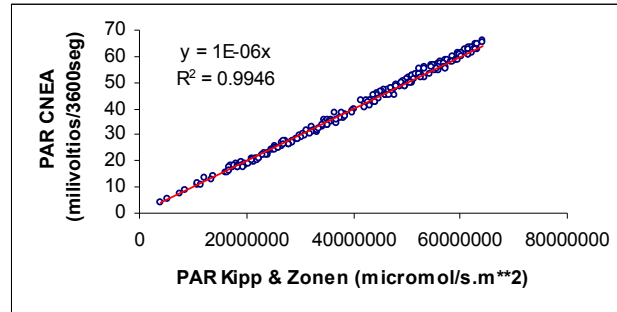


Figura 2: Valores diarios de las integrales del sensor PAR CNEA en función del flujo de fotones en el rango PAR.

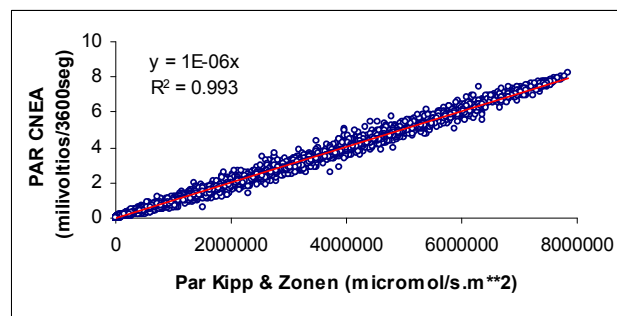


Figura 3: Valores horarios de las integrales del sensor PAR CNEA en función del flujo de fotones en el rango PAR.

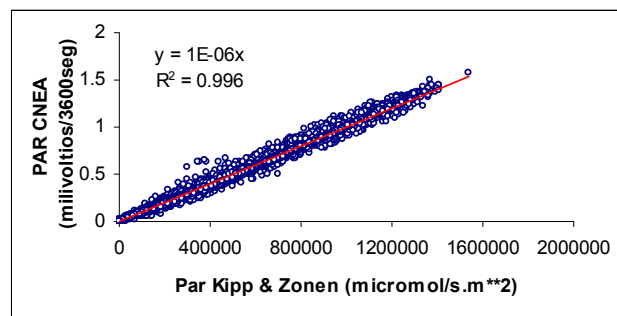


Figura 4: Valores cada diez minutos de las integrales del sensor PAR CNEA en función del flujo de fotones en el rango PAR.

A partir de cada uno de estos gráficos se calcularon las constantes de calibración para el sensor PAR CNEA, cuyos valores se muestran en la Figura 5.

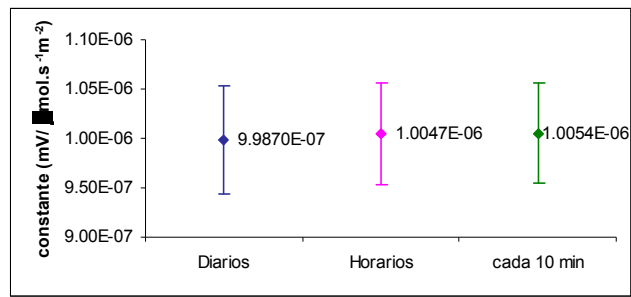


Figura 5: Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, calculadas con las integrales diarias (azul), horarias (rosa) y cada diez minutos (verde).

Las diferencias entre las constantes no son significativas, ya que son menores que los errores absolutos del cálculo de cada una de ellas (5.5, 5.1 y 5.0% para los cálculos en base diaria, horaria y cada diez minutos respectivamente). Se desprende de este hecho que el comportamiento del sensor PAR CNEA es el mismo, ya sea que se lo utilice para calcular integrales diarias, horarias o cada diez minutos. Se trata de un comportamiento deseable para un radiómetro.

Análisis de las constantes en función del índice de cobertura de nubes (kt)

En la Figura 6 se presentan, para las tres categorías del índice de claridad, los valores de la constante de calibración obtenidos para el sensor PAR CNEA, acompañados de los errores absolutos de la pendiente.

El valor de la constante de calibración en condiciones de cielo parcialmente cubierto, es inferior al obtenido para las condiciones de cielo cubierto o despejado, en las tres escalas de tiempo empleadas, pero esta diferencia no es significativa si se consideran los errores absolutos de la pendiente, que se encuentran en el orden del 6.5% cuando se trabaja en base diaria, 5.5% en base horaria y 5.0% cuando se usan las integrales cada diez minutos.

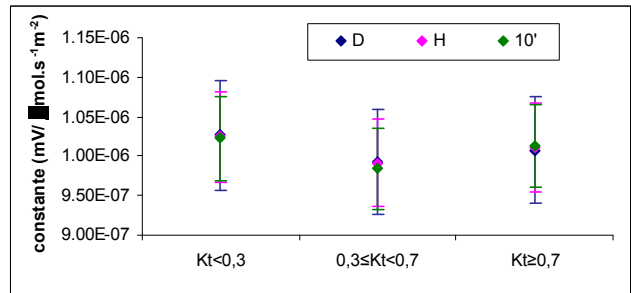


Figura 6: Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, en función del índice de claridad kt, calculadas en base diaria (azul), horaria (rosa) y cada diez minutos (verde).

Análisis de las constantes en función de la estación del año

En la Figura 7 se presentan los valores estacionales de las constantes, representadas con su error, que fue del 5% al trabajar con datos horarios o cada diez minutos, y del 6% con datos diarios.

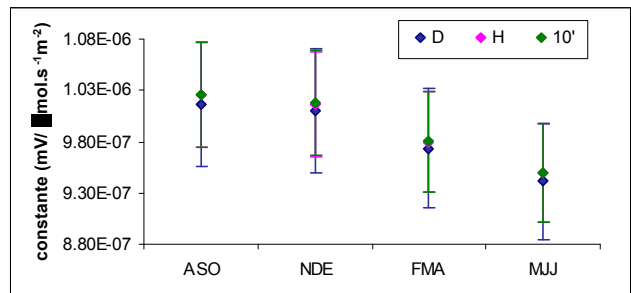


Figura 7: Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, para cada una de las estaciones, calculadas en base diaria (azul), horaria (rosa) y cada diez minutos (verde).

Se observa una disminución en el valor de la constante de calibración desde la primavera hacia el invierno, pero esta diferencia no es importante si consideramos los errores de medición y estadístico, ya que los errores absolutos son superiores a cualquier variación estacional que pueda detectarse en las constantes de ajuste.

Análisis de las constantes en función de la altura solar

En la Figura 8 se presentan los valores de la constante en función de la altura solar (α).

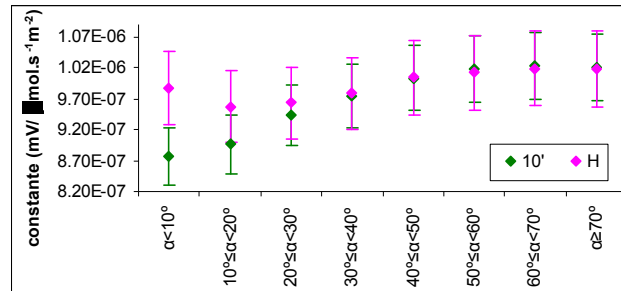


Figura 8: Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar calculados con las integrales horarias (rosa) y cada diez minutos (verde).

Si se miran los resultados obtenidos para la constante de calibración calculada empleando integrales cada diez minutos, se observa que hay un incremento en el valor de la constante con el aumento del ángulo de altura solar hasta los 50° y luego se estabiliza. El valor de la constante para ángulos menores a 20° difiere significativamente de la constante calculada para alturas solares mayores a 50°. Este comportamiento no se aprecia en los resultados obtenidos con las integrales horarias. El error absoluto de la pendiente es del orden 5% para los valores cada diez minutos y varía entre 6% para los valores horarios.

Análisis de las constantes en función del índice de claridad y de la estación del año

Para cada categoría del índice de claridad se volvió a realizar un análisis por separado para los cuatro trimestres, de manera de considerar posibles variaciones estacionales en la constante de cada una de esas categorías.

En las Figuras 9 a 11 se muestran los valores de la constante de calibración con sus errores para cada categoría de kt en las cuatro estaciones. En ellas puede observarse, que hay una disminución en el valor de la constante desde la primavera hacia el invierno (al igual que en la figura 6), pero estas diferencias no son importantes si consideramos los errores de medición y estadístico. Al trabajar con las integrales diarias, algunas categorías quedan con muy pocos valores y el error de la pendiente crece de manera importante.

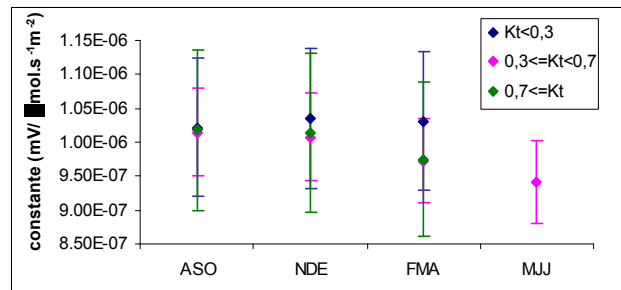


Figura 9: Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, en función de la época del año calculados con las integrales diarias. En azul calculadas con los días con cielo cubierto ($kt < 0.3$), en rosa con los días parcialmente cubiertos ($0.3 \leq kt < 0.7$), y en verde con los días despejados ($kt \geq 0.7$).

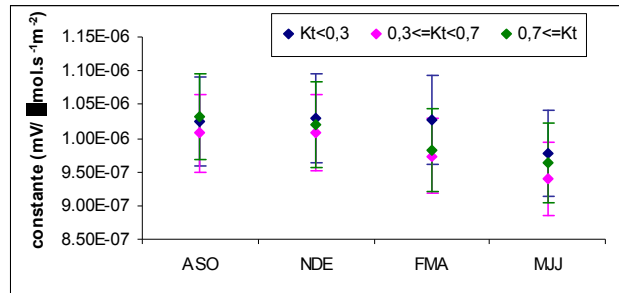


Figura 10: Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, en función de la época del año calculados con las integrales horarias. En azul calculadas con los días con cielo cubierto ($kt < 0.3$), en rosa con los días parcialmente cubiertos ($0.3 \leq kt < 0.7$), y en verde con los días despejados ($kt \geq 0.7$).

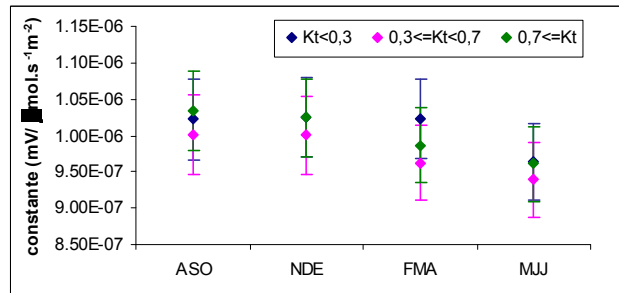


Figura 11: Valores de las constantes de calibración, representadas con su error, en función de la época del año calculados con las integrales cada diez minutos. En azul calculadas con los días con cielo cubierto ($kt < 0.3$), en rosa con los días parcialmente cubiertos ($0.3 \leq kt < 0.7$), y en verde con los días despejados ($kt \geq 0.7$).

Análisis de las constantes en función del índice de claridad y de la altura solar

En las Figuras 12 y 13 se presentan los valores de la constante en función de la altura solar para las tres categorías del índice de claridad, en base horaria y cada diez minutos respectivamente. Al trabajar con las integrales horarias, algunas categorías quedan con pocos valores y el error de la pendiente aumenta notablemente.

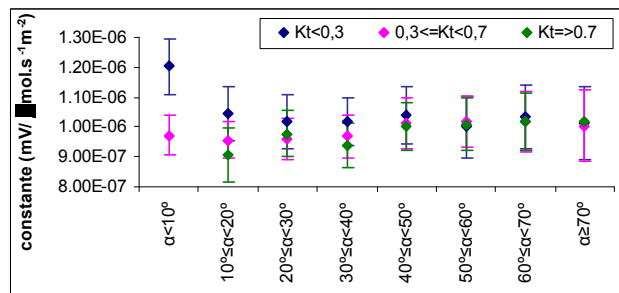


Figura 12: Valores de la constante de calibración en función de la altura solar, representadas con su error, para las tres categorías del índice de claridad ($kt < 0.3$ en azul, $0.3 \leq kt < 0.7$ en rosa y $kt \geq 0.7$ en verde) calculados con las integrales horarias.

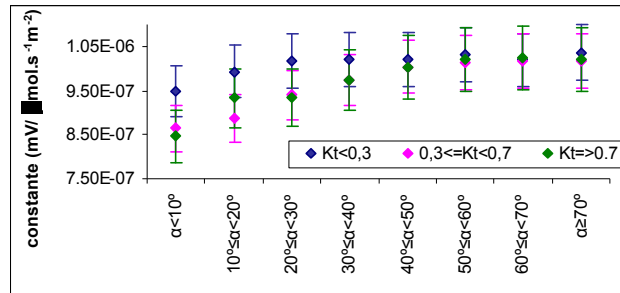


Figura 13: Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar para las tres categorías del índice de claridad ($kt < 0.3$ en azul, $0.3 \leq kt < 0.7$ en rosa y $kt \geq 0.7$ en verde) calculados con las integrales cada diez minutos.

No se observan diferencias para las distintas condiciones de cielo, salvo en las constantes para ángulos menores a 10° calculadas con las integrales horarias. Bajo condiciones de cielo parcialmente nublado, en la Figura 13 se aprecia una diferencia entre las constantes de calibración para ángulos solares inferiores a 20° y superiores a 40° .

Análisis de las constantes en función de la estación del año y de la altura solar

En las Figuras 14 y 15 se muestran las variaciones de la constante en función de la altura solar para las cuatro estaciones calculadas en base horaria y cada diez minutos respectivamente.

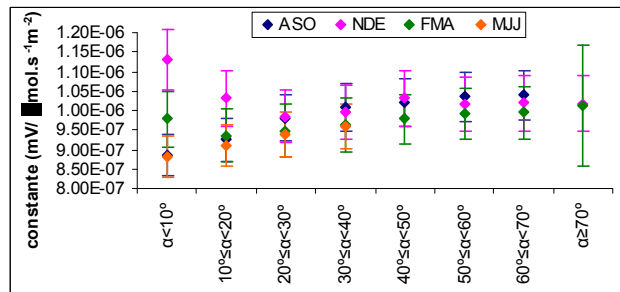


Figura 14: Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar para las cuatro estaciones calculados con las integrales diarias.

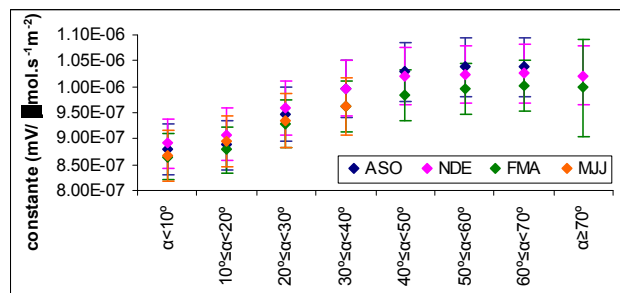


Figura 15: Valores de la constante de calibración, representadas con su error, en función de la altura solar para las cuatro estaciones calculados con las integrales cada diez minutos.

En la Figura 15 puede verse que no hay cambios importantes de la constante entre estaciones, y que en el trimestre agosto-septiembre-octubre es cuando se registra de manera más clara la diferencia en el valor de la constante para los ángulos menores a 20° y mayores a 40° ; mientras que en la Figura 14 esta diferencia no se aprecia, pero si se ve que para alturas solares menores a 10° la constante difiere entre verano e invierno.

DISCUSIÓN

De la serie de cálculos realizados para determinar la constante del sensor de CNEA, analizando el funcionamiento del equipo bajo diferentes condiciones de integración, cobertura de nubes, alturas solares, y épocas del año, puede concluirse que el funcionamiento de dicho sensor fue aceptable en todos los casos estudiados.

Respecto a la correlación entre las integrales registradas por el medidor comercial PAR Lite de la firma Kipp & Zonen y las registradas por el sensor de CNEA, ya sea en base diaria, horaria o cada diez minutos, se hallaron coeficientes de correlación con valores superiores a 0.99. Esto significa que el radiómetro PAR de CNEA tiene un comportamiento similar al sensor comercial. Respecto al funcionamiento bajo diferentes condiciones de cobertura de nubes y alturas solares, el coeficiente de correlación lineal se mantiene con valores igualmente altos en todas las épocas del año estudiadas.

El valor encontrado para la constante de calibración no presentó diferencias significativas en función de las condiciones de cobertura de cielo ni de la época del año, lo que permite afirmar que la constante de calibración presenta condiciones de estabilidad deseables para un sensor de medición. La única diferencia se encontró en función de la altura solar (sólo con las integrales cada 10 minutos), pero separando según la época del año y las condiciones de nubosidad, esta diferencia se observa sólo en el trimestre agosto-septiembre-octubre y bajo condiciones de cielo parcialmente cubierto. De manera preliminar podría atribuirse este comportamiento a que en esos casos analizados la señal que entrega el radiómetro PAR de CNEA es baja, por lo que la constante propia del equipo (que divide el valor del voltaje del radiómetro para transformarlo en $\text{mV}/\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) debe ser pequeña para equipararse a la respuesta del sensor comercial. No obstante, debido a que para valores bajos de altura solar la energía que llega al plano horizontal es pequeña, el error en la constante no determina variaciones apreciables para las integrales horarias y diarias. Para corroborarlo debería realizarse un estudio adicional más detallado de la respuesta del sensor en función del ángulo.

CONCLUSIÓN

Los valores de los coeficientes de correlación entre las integrales registradas por el medidor comercial PAR Lite y las registradas por el PAR CNEA indican que el radiómetro PAR de CNEA tiene un comportamiento similar al sensor comercial bajo las distintas condiciones de integración, cobertura de nubes, alturas solares y épocas del año. La constante de calibración presenta las condiciones de estabilidad deseables para un sensor de medición.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo está parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del Proyecto PICT 2005 N° 38034.

REFERENCIAS

- Aaslyng J.M., Rosenqvist E., Høgh-Schmidt K. (1999). A sensor for microclimatic measurement of photosynthetically active radiation in a plant canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* **96**, 189-197.
- Bolzi C.G., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., Grossi Gallegos H., Righini R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. En *Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica 2008*, organizado por la Asociación Argentina de Luminotecnia, Rosario, Santa Fe, Argentina, Tomo I pp. III-38 a III-45, ISBN 978-987-20335-4-5.
- Larcher W. (1977). *Ecofisiología vegetal*. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Magrin G., Díaz R., Rebella C., Del Santo C. y Rodríguez R. (1991). Simulación del crecimiento y desarrollo de trigo en Argentina y la necesidad de información meteorológica de entrada. *Anales del CONGREGMET IV*. pp 49-50.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2005). Análisis de la correlación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en San Miguel, provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **9**, 11.01-11.04.

ABSTRACT: The operation of a photosynthetically active radiation (PAR) radiometer manufactured by CNEA is analyzed in connection with a PAR commercial equipment. The behavior of the calibration constant for different solar altitudes, cloud cover, and times of the year is studied. The performance of CNEA's PAR radiometer is comparable to a commercial sensor, maintaining a calibration constant stability in all analyzed situations.

Keywords: Photosynthetically active radiation, direct measurement