

## **PRIMERAS MEDICIONES DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN PLANOS INCLINADOS ORIENTADOS AL NORTE EN LUJÁN, PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

**M.J. Denegri, H. Grossi Gallegos, R. Righini**

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 estudia la relación entre las integrales diarias de radiación fotosintéticamente activa ( $H_{PAR}$ ) en plano horizontal con las obtenidas en planos inclinados  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  ( $H_{PAR_\beta}$ ) orientados al norte en Luján. Lo mismo se hace con las integrales de radiación global ( $H$ ), de manera de obtener expresiones que permitan estimar la  $H_{PAR_\beta}$  que llegaría a una superficie inclinada a partir de lo medido en el plano horizontal. Se analizan estas relaciones para diferentes condiciones de cielo, caracterizadas por los valores del índice de claridad ( $K_T$ ). La relación encontrada para los valores diarios de  $H$  y  $H_{PAR}$  con  $H_{PAR_\beta}$  es lineal, y los mejores valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se obtienen cuando no se discrimina según las condiciones de cielo. Las expresiones más apropiadas para estimar los valores diarios de  $H_{PAR_\beta}$  recibida en planos inclinados  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$  son las encontradas para toda condición de cielo.

**Palabras clave:** Radiación Fotosintéticamente activa, plano inclinado

### **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. La radiación fotosintéticamente activa ( $H_{PAR}$ ) incidente y absorbida, convertida en energía química libre por la fotosíntesis, es vital en los sistemas biológicos (Larcher, 1977). De la medición de  $H_{PAR}$  puede obtenerse información que permita, por ejemplo, estimar el balance energético en sistemas biológicos o modelar el crecimiento de los cultivos (Magrin y otros, 1991). Debido a esto, conocer su distribución espacial y temporal es fundamental para el análisis de los procesos biológicos asociados (Grossi Gallegos y otros, 2004). Sin embargo, no es habitual que se disponga de mediciones directas de  $H_{PAR}$ , tanto en plano horizontal como en plano inclinado. Conocer cuánta energía disponible para la fotosíntesis llega a los planos inclinados permitirá, entre otras cosas, saber con más exactitud cuánto estaría incidiendo normalmente sobre una cobertura vegetal si sus hojas no se distribuyen de forma planófila.

El objetivo de este trabajo es estudiar la relación entre la radiación global y la componente fotosintéticamente activa medidas en plano horizontal y la  $H_{PAR_\beta}$  medida en planos inclinados  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ , siempre orientados al norte, en la localidad de Luján, provincia de Buenos Aires, de manera de poder utilizar la información obtenida en el plano horizontal para estimar lo que llegaría de  $H_{PAR_\beta}$  a una superficie inclinada.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Durante el período comprendido entre el 29 de septiembre y el 19 de diciembre de 2010 (82 días), se realizaron en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján ( $34^\circ 35' 17'' S$ ;  $59^\circ 03' 46'' O$ ; 28 msnm), mediciones de radiación fotosintéticamente activa en planos con diferentes inclinaciones orientados hacia el norte. Los sensores utilizados fueron, un PAR-Lite de la firma Kipp & Zonen ubicado en el plano horizontal y cuatro sensores PAR desarrollados por la CNEA (Denegri y otros, 2009) ubicados en planos inclinados  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . Estos equipos fueron interrogados una vez por segundo por un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR1000, y esos valores integrados cada diez minutos. Los datos de radiación global usados para este análisis fueron medidos con un piranómetro CMP11 de Kipp & Zonen, interrogados por una CR10X de Campbell. En este trabajo se utilizan las integrales diarias.

El análisis de la relación entre lo medido en el plano horizontal y en los planos inclinados se realizó primero para todas las condiciones de cielo, y luego discriminando en tres categorías en función del índice de claridad ( $K_T$ ). Se consideró como condición de cielo cubierto un  $K_T < 0,3$ , parcialmente cubierto  $0,3 \leq K_T < 0,7$ , y despejado  $K_T \geq 0,7$ .

En la Figura 1 se muestra como estaban dispuestos los equipos para medir  $H_{PAR_\beta}$ .

Las marchas de  $H_{PAR}$  y  $H_{PAR_\beta}$  medidas se presentan en la Figura 2, donde puede verse que el plano inclinado  $30^\circ$  recibe más radiación que los planos inclinados  $45^\circ$  y  $60^\circ$ , mientras que el plano horizontal al inicio de la serie (principios de primavera) recibe menos que los planos mencionados anteriormente, pero hacia el final de la serie (fines de primavera) pasa a ser el que más radiación logra captar.



Figura 1: Disposición de los sensores para medir PAR en planos inclinados.

La serie de las integrales diarias para el plano inclinado 30° no presenta tendencia, mientras que las de las integrales sobre los planos a 45°, 60° y 90° presentan una disminución desde comienzo hacia fines de primavera, por eso las diferencias entre lo medido por los sensores son mayores hacia el final de la serie. El equipo ubicado en el plano horizontal muestra un comportamiento inverso, es decir, mide más hacia fines de primavera que a comienzos de ella. Este comportamiento de las series refleja el efecto de la declinación solar.

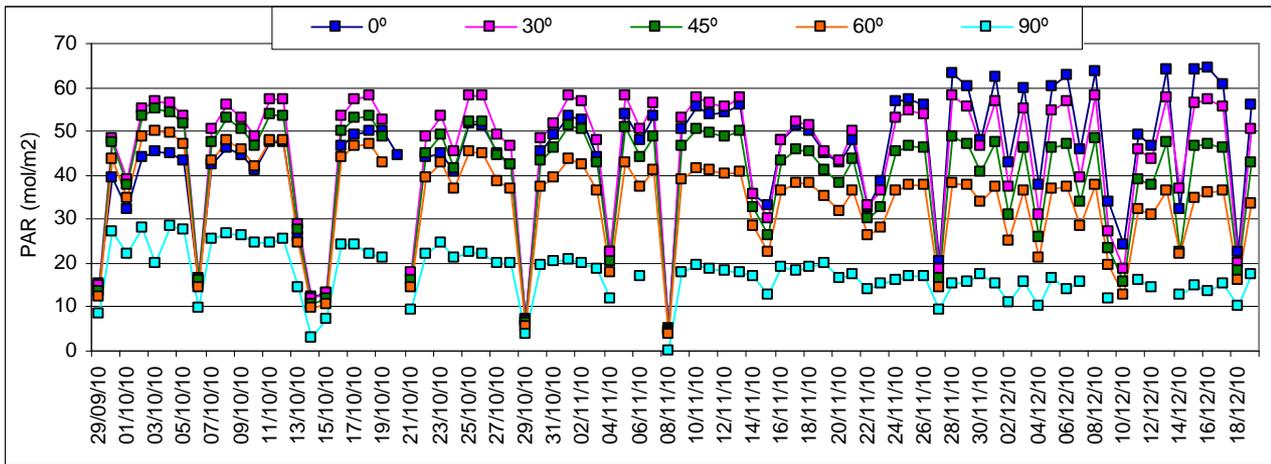


Figura 2: Marcha de los valores de las integrales diarias de PAR (mol/m<sup>2</sup>) medidas sobre: plano horizontal (■) y planos inclinados 30° (■), 45° (■), 60° (■) y 90° (■).

Para eliminar el efecto de las variaciones astronómicas que afectan la estacionalidad de la radiación, se calculó el índice de claridad para el rango fotosintéticamente activo del espectro ( $K_{TPAR}$ ), que representa la cantidad efectiva de  $H_{PAR}$  que llega a superficie en relación a la cantidad disponible en el tope de la atmósfera. Las expresiones usadas para calcular el  $K_{TPAR}$  para el plano horizontal y los planos inclinados se muestran en las ecuaciones (1) y (2) (Pacheco de Souza y otros, 2009).

$$K_{TPAR} = \frac{H_{PAR}}{H_{0PAR}} \quad (1)$$

$$K_{TPAR-\beta} = \frac{H_{PAR-\beta}}{H_{0PAR}} \quad (2)$$

Para estimar la irradiación en el tope de la atmósfera  $H_{0PAR}$  y  $H_{0PAR-\beta}$  se usaron las ecuaciones (3) y (4), tomadas de Duffie & Beckman (2006) y adaptadas a la fracción PAR del espectro:

$$H_{0PAR} = \frac{24}{\pi} 3600 I_{0PAR} \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360^\circ (D-2)}{365} \right) \right) \left( \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \omega_s \frac{\pi}{180^\circ} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (3)$$

$$H_{OPAR} = \frac{24}{\pi} 3600 I_{OPAR} \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360^\circ (D-2)}{365} \right) \right) \left( \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega'_s + \omega'_s \frac{\pi}{180^\circ} \text{sen}(\varphi - \beta) \text{sen} \delta \right) \quad (4)$$

donde  $I_{OPAR}=2423,4 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  es la constante solar en el rango de longitudes de onda de  $H_{PAR}$  (39,1% de la constante solar ( $I_0$ ), calculada con el espectro de Gueymard (2004)),  $D$  es el día juliano,  $\varphi$  es la latitud,  $\beta$  es el ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal,  $\delta$  es la declinación solar y  $\omega'_s$  se elige como el menor de los ángulos de salida del sol entre los correspondientes al plano horizontal y el plano inclinado.

Las integrales diarias de  $K_{TPAR,\beta}$  también se relacionaron con los valores de  $K_T$ , de manera de ver si existe alguna relación entre ellos que permita estimar el valor de  $H_{PAR,\beta}$  cuando no se dispone del dato de  $H_{PAR}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las marchas de  $K_{TPAR}$  calculadas para el plano horizontal y los planos inclinados se presentan en la Figura 3. En ella puede verse que la radiación incidente en el plano inclinado  $60^\circ$  es la que menos es modificada al atravesar la atmósfera, seguida de la incidente a  $45^\circ$ , luego a  $30^\circ$  y por último en el plano horizontal. Para valores de  $K_T$  asociados a condiciones de cielo cubierto (menores a 0,3) todos los valores de  $K_{TPAR}$  son similares, mientras que para condiciones de cielo claro (mayores a 0,7) hay más diferencia entre ellos.

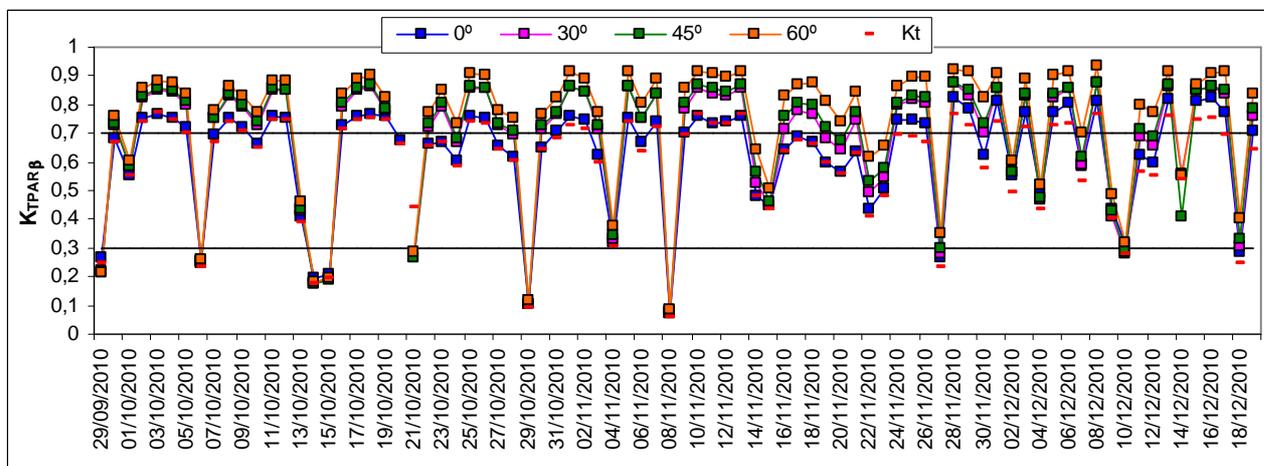


Figura 3: Marchas de  $K_{TPAR}$  (■),  $K_{TPAR_{30^\circ}}$  (■),  $K_{TPAR_{45^\circ}}$  (■),  $K_{TPAR_{60^\circ}}$  (■) y  $K_T$  (-).

### Estimaciones de $K_{TPAR,\beta}$ en función de lo medido en el plano horizontal

En la Figuras 4a) a 4d) se muestra la relación entre los valores diarios de  $K_{TPAR,\beta}$  y  $K_{TPAR}$ , y en ellas se discriminan las condiciones de cielo con diferentes colores. La recta que mejor ajusta en cada caso, acompañada del coeficiente de determinación y del número de casos considerados en el análisis se presenta en la Tabla 1.

Se observa que los niveles de  $H_{PAR,\beta}$  medidos en los planos inclinados  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$  a lo largo del período considerado fueron superiores a lo medido en el plano horizontal, considerando todo el conjunto de datos, y eso se manifiesta en valores superiores a uno para las pendientes de las rectas de ajuste. Discriminando según condiciones de transmitancia atmosféricas, para los casos de cielo parcialmente cubierto se aprecia el mismo comportamiento que al trabajar con toda la base de datos (pendientes mayor a 1), para cielo cubierto se recibe aproximadamente lo mismo en los planos inclinados que en el plano horizontal, y para condiciones de cielo despejado en los planos inclinados llega aproximadamente la mitad de lo que se recibe en el plano horizontal. En estos casos los coeficientes de determinación son pequeños y los errores del cálculo de la pendiente aumentan.

Es notable la linealidad entre los valores de  $K_{TPAR}$  y  $K_{TPAR,\beta}$ , pero a medida que aumenta el ángulo de inclinación del plano la dispersión también lo hace. Tal vez porque los sensores ubicados en los planos inclinados reciben el aporte de la radiación reflejada en el suelo. Para el caso del plano vertical la dispersión en los datos es muy grande como para sacar conclusiones. De aquí en adelante en este trabajo no se tendrá en cuenta el plano vertical en el análisis, ya que requiere de un análisis más detallado, con mayor número de observaciones y teniendo en cuenta el albedo entre otros factores.

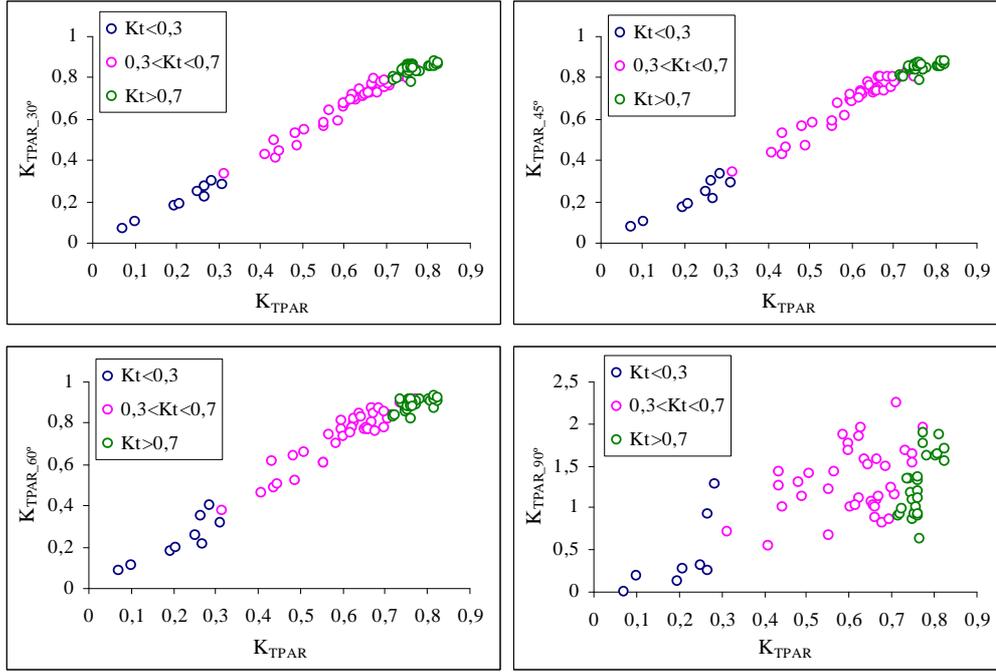


Figura 4: Relación entre a)  $K_{TPAR_{30^\circ}}$  y  $K_{TPAR}$ , b)  $K_{TPAR_{45^\circ}}$  y  $K_{TPAR}$ , c)  $K_{TPAR_{60^\circ}}$  y  $K_{TPAR}$ , d)  $K_{TPAR_{90^\circ}}$  y  $K_{TPAR}$  para condiciones de cielo cubierto ( $\circ$ ), parcialmente cubierto ( $\circ$ ) y cielo despejado ( $\circ$ ).

Los mejores coeficientes de determinación ( $R^2$ ) se obtienen al trabajar sin discriminar en función de las condiciones de cielo, y por lo tanto, podríamos estimar los valores diarios de  $K_{TPAR_\beta}$  utilizando los valores de  $K_{TPAR}$ , ya que su comportamiento explica más del 95% de las variaciones del  $H_{PAR_\beta}$ . Al discriminar en función de las condiciones de cielo los coeficientes de determinación más altos se obtienen para los días parcialmente cubiertos, luego los días cubiertos y por último los días despejados. De todas formas, los ajustes obtenidos para casos de cielo cubierto están hechos con pocos datos, y si bien se aprecia en ellos una relación, es apresurado sacar conclusiones a partir de esto. Para los días con cielo despejado los coeficientes son bajos porque al trabajar con integrales diarias el rango de valores que pueden tomar  $K_{TPAR}$  y  $K_{TPAR_\beta}$  es muy pequeño como para ver pendientes marcadas en la relación.

$K_T < 0,3$ (cielo cubierto)	$R^2$	N
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (0,94 \pm 0,09) K_{TPAR} + 0,00$	0,94	9
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (0,99 \pm 0,14) K_{TPAR} - 0,00$	0,88	9
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (1,13 \pm 0,20) K_{TPAR} - 0,01$	0,78	9
$0,3 \leq K_T < 0,7$ (cielo parcialmente cubierto)		
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (1,19 \pm 0,03) K_{TPAR} - 0,06$	0,96	38
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (1,18 \pm 0,04) K_{TPAR} - 0,03$	0,93	38
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (1,19 \pm 0,06) K_{TPAR} + 0,02$	0,88	38
$K_T \geq 0,7$ (cielo claro)		
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (0,50 \pm 0,23) K_{TPAR} + 0,46$	0,39	32
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (0,42 \pm 0,26) K_{TPAR} + 0,53$	0,32	32
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (0,53 \pm 0,27) K_{TPAR} + 0,49$	0,31	32
$0 < K_T < 1$		
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (1,09 \pm 0,01) K_{TPAR}$	0,98	79
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (1,11 \pm 0,02) K_{TPAR}$	0,98	79
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (1,18 \pm 0,02) K_{TPAR}$	0,96	79

Tabla 1: Rectas de ajuste de  $K_{TPAR_\beta}$  en función de  $K_{TPAR}$ , junto con sus coeficientes de determinación y el número de casos considerado para diferentes condiciones de cielo.

También se calcularon las relaciones entre los valores de  $K_T$  y  $K_{TPAR_\beta}$ , y en las Figuras 5a) a 5d) se muestran los gráficos de dispersión. En la Tabla 2 se presentan las rectas que mejor ajustaron en cada caso, junto con los coeficientes de determinación y el número de casos considerados.

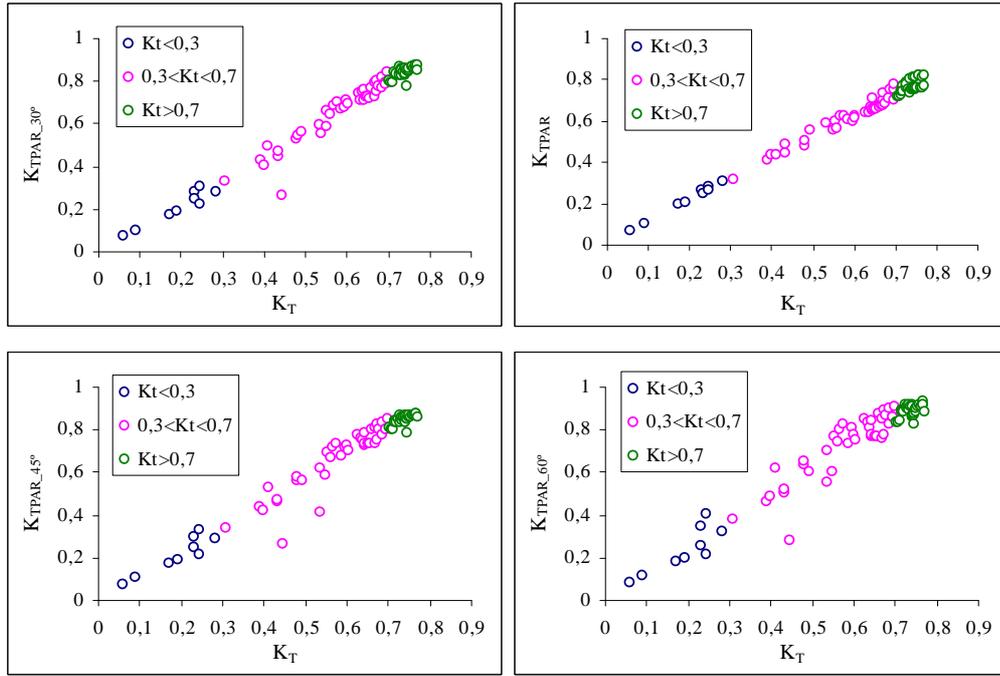


Figura 5: Relación entre a)  $K_{TPAR}$  y  $K_T$ , b)  $K_{TPAR_{30^\circ}}$  y  $K_T$ , c)  $K_{TPAR_{45^\circ}}$  y  $K_T$ , d)  $K_{TPAR_{60^\circ}}$  y  $K_T$  para condiciones de cielo cubierto ( $\circ$ ), parcialmente cubierto ( $\circ$ ) y cielo despejado ( $\circ$ ).

$K_T < 0,3$ (cielo cubierto)	$R^2$	N
$K_{TPAR} = (1,09 \pm 0,03) K_T + 0,01$	0,99	9
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (1,01 \pm 0,12) K_T + 0,01$	0,90	9
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (1,05 \pm 0,17) K_T + 0,01$	0,83	9
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (1,18 \pm 0,24) K_T + 0,01$	0,71	9
$0,3 \leq K_T < 0,7$ (cielo parcialmente cubierto)		
$K_{TPAR} = (1,06 \pm 0,04) K_T + 0,02$	0,95	38
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (1,31 \pm 0,05) K_T - 0,11$	0,91	38
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (1,33 \pm 0,07) K_T - 0,10$	0,84	38
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (1,33 \pm 0,08) K_T - 0,04$	0,88	38
$K_T \geq 0,7$ (cielo despejado)		
$K_{TPAR} = (0,98 \pm 0,24) K_T + 0,04$	0,36	32
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (0,84 \pm 0,22) K_T + 0,22$	0,40	32
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (0,80 \pm 0,21) K_T + 0,26$	0,43	32
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (0,70 \pm 0,36) K_T + 0,37$	0,21	32
$0 < K_T < 1$		
$K_{TPAR} = (1,04 \pm 0,01) K_T$	0,98	79
$K_{TPAR_{30^\circ}} = (1,13 \pm 0,02) K_T$	0,97	79
$K_{TPAR_{45^\circ}} = (1,15 \pm 0,02) K_T$	0,96	79
$K_{TPAR_{60^\circ}} = (1,23 \pm 0,03) K_T$	0,94	79

Tabla 2: Rectas de ajuste de  $K_{TPAR_\beta}$  en función de  $K_T$ , junto con sus coeficientes de determinación y el número de casos considerado para diferentes condiciones de cielo.

Al igual que en la Figura 4, se observa una linealidad entre los valores de  $K_{TPAR_\beta}$  y  $K_T$ , y a medida que la inclinación del sensor aumenta la dispersión también lo hace. Los valores de  $K_{TPAR}$  son un  $(4 \pm 1)\%$  mayores que los de  $K_T$ , resultado esperable, ya que en el tope de la atmósfera la fracción PAR representa el 39% de la global, y en superficie esta fracción pasa a ser de entre el 44% y el 49% para la zona de Luján y alrededores como se mostró en trabajos anteriores del grupo (Grossi Gallegos y otros, 2004; Righini y Grossi Gallegos, 2005; Denegri, 2011).

Para condiciones de cielo cubierto, teniendo en cuenta el error en el cálculo de las pendientes, las rectas de ajuste son similares para todos los planos. En cambio, para cielos parcialmente cubiertos las pendientes de las rectas de ajuste son similares para los planos inclinados, pero algo mayores a la relación en plano horizontal. Para los casos de cielo despejado, los coeficientes de determinación son pequeños como para realizar inferencias a partir de las rectas de ajuste.

## CONCLUSIONES

La relación entre los valores diarios de  $K_{TPAR}$  y  $K_{TPAR_\beta}$  es lineal, pero a medida que aumenta el ángulo de inclinación del plano la dispersión también lo hace. Esto podría estar asociado al aporte de la radiación reflejada en el suelo, que es registrada por los sensores ubicados en los planos inclinados y no por el sensor ubicado en el plano horizontal.

Discriminando según los valores del índice de claridad, para los casos de cielo cubierto se recibe aproximadamente lo mismo en los planos inclinados que en el plano horizontal. Para condiciones de cielo parcialmente cubierto se recibe más en los planos inclinados que en el plano horizontal y para condiciones de cielo despejado a los planos inclinados llega aproximadamente la mitad de lo que se recibe en el plano horizontal, pero en estos casos los coeficientes de determinación son pequeños, y los errores del cálculo de la pendiente aumentan en comparación a los otros. Para el caso del plano vertical la alta dispersión en los datos impide sacar conclusiones.

Los mejores coeficientes de determinación ( $R^2$ ) se obtienen al trabajar sin discriminar en función de las condiciones de cielo, tanto si se usan las integrales diarias de  $H_{PAR}$  como de  $H$  medidas en el plano horizontal. Por lo tanto, las expresiones encontradas al trabajar con todo el conjunto de datos serían las más apropiadas para estimar los valores diarios de  $H_{PAR_\beta}$  recibida en los planos inclinados  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ .

Teniendo en cuenta que la base de datos utilizada cubre un período de tiempo que no es suficiente para analizar si existe alguna estacionalidad en las relaciones, será necesario continuar con las mediciones. Además se requiere contar con una base más amplia de datos para poder validar las expresiones encontradas y mejorarlas, ya que los ajustes para condiciones de cielo cubierto se realizaron con un número pequeño de días.

## REFERENCIAS

- Denegri M.J., Righini R., Grossi Gallegos H., Bolzi C.G., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., 2009. Estudio comparativo del comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por CNEA con respecto a uno comercial. *Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 24, pp. 1-6.
- Denegri M.J., 2011. Relación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en Luján, Buenos Aires, Argentina. *Actas XIV Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología*. Setúbal, Portugal, 28-30 de marzo.
- Duffie J.A. y Beckman W.A., 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes* (3ª edición). Capítulo 1.
- Grossi Gallegos H., Righini R. y Dursi O., 2004. Primeras mediciones de la radiación fotosintéticamente activa en San Miguel, provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 8, Nº 2, 11.13-11.17.
- Gueymard C., 2004. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy* 76, 423-453.
- 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*, 49-50.
- Pacheco de Souza A., Escobedo J.F. y Dal Pai A., 2009. Estimativas da irradiação direta em superfícies inclinadas com base em medidas em superfícies horizontais. *Anales CLIMET XIII - CONGREGMET X*, en soporte digital.
- 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.

## FIRST MEASUREMENTS OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION ON TILTED NORTH ORIENTED SURFACES IN LUJÁN, BUENOS AIRES PROVINCE

**ABSTRACT:** the relationship between daily data of photosynthetically active radiation ( $H_{PAR}$ ) in horizontal plane and tilted north oriented surfaces ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ ) ( $H_{PAR_\beta}$ ) is studied in Luján. The same procedure is done with global radiation ( $H$ ) in order to obtain expressions to estimate  $H_{PAR_\beta}$  from the measures obtain in the horizontal surface. These relationships were analyzed for different sky conditions, characterized by  $K_T$  values. Lineal relations were found, and the best  $R^2$  were obtained when there is no discrimination as sky conditions. More appropriate expressions to estimate the daily values of  $H_{PAR_{30^\circ}}$ ,  $H_{PAR_{45^\circ}}$  and  $H_{PAR_{60^\circ}}$  were found for all sky conditions.

**KEY WORDS:** photosynthetically active radiation, tilted surface