

EVALUACIÓN DE MODELOS PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA (PAR) EN EL URUGUAY

José L. Di-Laccio^{1,2}, Andrés Monetta¹, Rodrigo Alonso-Suárez¹, Gonzalo Abal¹

¹Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del CeNUR Litoral Norte, Universidad de la República, Av. Luis Batlle Berres km 508, C.P. 50000, Salto, Uruguay

²Centro Regional de Profesores del Litoral (CeRP), Consejo de Formación en Educación, Florencio Sánchez 396, C.P. 50000, Salto, Uruguay
E-mail: jdilaccio@unorte.edu.uy

RESUMEN: En este trabajo se analizan dos modelos horarios para la fracción PAR en toda condición de cielo utilizando datos de cuatro estaciones de medida en Uruguay. Se considera el modelo pre-existente de mejor desempeño a la fecha y una nueva propuesta de modelo. Se realizó un control de calidad a escala minutal de las medidas que contempla límites en G_h y Q_p , así como en kt_p y f_p , e incluye consideraciones geométricas en $\cos \theta_z$. Se determinan los coeficientes locales de los modelos y se evalúa su desempeño a través de los estadísticos rMBD, rMAD y rRMSD. Se concluye que la nueva propuesta, basada en un polinomio de grado tres en $\ln(k_t)$, mejora al modelo pre-existente. Para la estación de mayor estadística temporal (2017-2020) se analiza en forma preliminar la estadística descriptiva de la radiación PAR mensual y anual. La radiación PAR tuvo en este periodo su mayor promedio mensual en diciembre con (57.3 ± 16.2) mol/m² día y su mínimo en junio con (17.9 ± 7.8) mol/m² día. El promedio anual de Q_p fue de 36.8 mol/m² día y la fracción PAR anual fue de (2.11 ± 0.05) μmol/J.

Palabras clave: radiación solar, radiación PAR, fracción PAR, modelos de fracción PAR.

INTRODUCCIÓN

La producción de pasturas, cultivos protegidos y cultivos a cielo abierto depende, entre otros factores, de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) incidente sobre ellos. Su caracterización en una región geográfica dada es relevante para la planificación de la producción agropecuaria. La radiación PAR se define como la fracción del espectro solar de banda ancha entre 400 y 700 nm. En Uruguay, esta componente PAR se empezó a relevar de forma continua y sistemática a finales de 2015 en el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Universidad de la República, en su estación experimental de Salto denominada LE (-31.28°, -57.92°, 56 m asnm). A fines de 2020 se instalaron equipos de medida PAR en tres de las estaciones operativas de la Red de Medidas Continuas de Irradiancia Solar (RMCIS) que administra este laboratorio, con cobertura territorial en Uruguay. Esto hace que sea posible disponibilizar información para avanzar en el conocimiento de este recurso nacional.

La radiación PAR en plano horizontal, Q_p , se puede medir de forma directa o indirecta. Para la medida directa se emplean sensores cuánticos que reportan la medida en μmol/m²s (Alados et al., 1996; Tiba y Leal, 2004; Foyo-Moreno et al., 2017; Denegri, 2016; Di-Laccio et al., 2021; García-Rodríguez et al., 2021), correspondiente al flujo de fotones por unidad de área que atraviesan la superficie captadora proyectado según su normal. Para la medida indirecta se emplean piranómetros capaces de medir en banda ancha y se aplican filtros espectralmente selectivos, como se describe en varios trabajos Escobedo et al. (2006, 2011); Gallegos et al. (2004); Righini y Gallegos (2005). Esta segunda forma usualmente reporta la radiación PAR en W/m², G_p , siguiendo la técnica de Blackburn y Proctor (1983). A efectos de su uso

agropecuario, la cantidad de mayor utilidad es Q_p , y cuando no se dispone de un sensor para su medida in-situ, se la puede estimar a partir de la irradiancia global en plano horizontal, G_h o GHI, utilizando modelos empíricos.

Este trabajo tiene dos objetivos: 1) Ajustar localmente y evaluar el desempeño de dos modelos empíricos para la fracción PAR ($f_p = Q_p/G_h$ en $\mu\text{mol/J}$) a escala horaria. Uno de los modelos es el de Alados et al. (1996), bivariado en el índice de claridad ($k_t = G_h/G_s F_n \cos \theta_z$, en donde $G_s = 1361 \text{ W/m}^2$ es la constante solar, F_n es el factor de corrección orbital y $\cos \theta_z$ el coseno del ángulo cenital) y la altura solar (α_s), siendo el de mejor desempeño local en un trabajo previo al ser evaluado contra datos minutales de la estación LE (Di-Laccio et al., 2021). El otro modelo requiere solamente de k_t y se trata de una propuesta novedosa que amplía el modelo de Alados et al.. Estos modelos, además de permitir estimar a escala horaria la radiación PAR en sitios climáticamente afines donde solo se mide o se estima satelitalmente la GHI, pueden ser utilizados para completar las series de radiación PAR en base a una serie completa de GHI. 2) Disponibilizar información mensual de G_h , Q_p y f_p (promedio de valores diarios) para la estación de mayor estadística temporal (LE, periodo 2017-2020), lo que permite una estimación rápida de la Q_p para fines agropecuarios a partir de G_h y el correspondiente valor mensual de f_p .

DATOS

Se consideran medidas terrestres de cuatro estaciones de la RMCIS que incluyen, entre otras variables, G_h y Q_p , ambas en plano horizontal. Las medidas se registran a escala minutil y cada dato es el promedio de medidas instantáneas tomadas cada 10 segundos dentro del minuto. Las estaciones están ubicadas en los departamentos de Uruguay de Salto (LE), Treinta y Tres (PP), Rocha (RC) y Colonia (ZU), cuya descripción está en la Tabla 1. Los instrumentos para el registro de G_h son piranómetros de la marca Kipp & Zonen, modelo CMP10 (Clase A con respuesta espectralmente plana según la norma ISO 9060:2018). Para la medida de Q_p se utilizan sensores cuánticos PAR LiCor, modelo LI-190R, salvo en la estación RC que se utiliza un equipo PQS1 de la marca Kipp & Zonen. Los piranómetros cuentan con calibración vigente, y han sido calibrados contra un piranómetro de referencia Kipp & Zonen CMP22 que tiene trazabilidad a la referencia radiométrica mundial en Davos, Suiza. Los sensores cuánticos LI-190R tienen calibración de fábrica vigente y el PQS1 ha sido intercomparado contra un LI-190R nuevo.

Tabla 1: Metadatos de las estaciones consideradas en este trabajo. La estación LE está al norte del Río Negro de Uruguay y las restantes al sur.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura s.n.m. (m)	Periodo de medida	Años	Localización
LE	-31.2827	-57.9181	56	2017-2020	4	Salto
PP	-33.2751	-54.1724	35	2020-2021	1	Treinta y Tres
RC	-34.4893	-54.3203	20	2021	1	Rocha
ZU	-34.3380	-57.6904	70	2021	1	Colonia

El control de calidad de datos de G_h y Q_p para cada una de las estaciones se realiza a escala minutil. La estrategia es la siguiente; se realiza primero una inspección visual donde se excluyen datos notoriamente anómalos, y se divide el conjunto de datos en dos subconjuntos: (i) Datos con altura solar mayor o igual a 7° y (ii) el resto de los datos diurnos. Los datos nocturnos correspondientemente se llevan a cero. A los datos tipo (i) se les aplica el control de calidad exigente de la Tabla 2, donde además se muestra la cantidad de muestras diurnas (F1) y la cantidad de muestras con altura solar mayor o igual a 7° ($F2, \cos \theta_z > 0.1219$). F3 es un control de calidad sobre G_h basado en los filtros de la BSRN (Baseline Solar Radiation Network, <https://bsrn.awi.de/>), cuyos coeficientes fueron ajustados localmente como es recomendado en

(McArthur, 2005). Los filtros de FP1 a FP3 actúan sobre la radiación PAR, y son respectivamente límites para f_p , Q_p y $kt_p = Q_p/Q_{sp}F_n \cos \theta_z$, en donde $Q_{sp} = 2413 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ es la constante solar PAR. A efectos de calcular los promedios horarios para el ajuste y validación de modelos de fracción PAR, se utilizan los datos minutales tipo (i) que pasan todos los controles de calidad. Se generan promedios horarios siguiendo una regla de 2/3, es decir, se calcula el valor siempre y cuando en el intervalo horario haya más de dos tercios de los datos.

Para construir los valores diarios, se ensamblan los datos tipo (i) y (ii) de la estación LE entre sí y se calculan los totales diarios promediando los datos minutales del día para luego multiplicar por la duración del día (intervalo diurno). De esta forma, el promedio de GHI en el día se calcula a partir de los minutos diurnos que pasan el control de calidad (salvo al inicio y final del día para no introducir sesgos en el cálculo debido al filtrado). Este promedio se multiplica por los segundos correspondientes (duración del día) y se divide por 1×10^6 para expresar la irradiación diaria en MJ/m^2 . De igual forma se procede para obtener el valor diario de PAR en mol/m^2 , que representa la cantidad de fotones PAR incidentes en el día por unidad de área. Este procedimiento es más robusto ante datos faltantes para calcular los totales diarios de irradiación que la integración numérica de los valores de irradiancia minutal. Se descartaron unos pocos días con más de 2/3 de minutos faltantes. Los datos diarios son utilizados para calcular la estadística descriptiva de cada mes y anual en esta estación, y no en las otras, debido a su baja estadística temporal de datos a la fecha.

Tabla 2: Resumen del control de calidad de las medidas.

Filtro	Descripción	Condición	Cantidad de muestras			
			LE	RC	PP	ZU
F1	Datos diurnos	$\cos \theta_z > 0$	1040558	261952	253365	261947
F2	Altura solar	$\cos \theta_z > 0.1219$	939405	235398	228232	235465
Filtro	Descripción	Condición	Descarte (%)			
			LE	RC	PP	ZU
F3	BSRN para G_h	$G_h < G_{sc} (1.15) \cos^{(1.25)} \theta_z + 20 \text{ W}/\text{m}^2$	0.71	0.21	0.47	0.28
FP1	Límites para kt_p	$kt_p < 1.35$	0.0	0.0	0.0	0.0
FP2	Límites para f_p	$f_p > 1.7$ y $f_p < 10$	1.75	0.22	19.5	0.29
FP3	Límites para Q_p	$\alpha_{min} kt < Q_p < \alpha_{max} kt + c^*$	0.02	0.02	0.03	0.01
Total			2.48	0.45	19.97	0.59

* α_{min} , α_{max} y c se fija por inspección visual para cada estación.

En la Fig. 1 se presenta, a modo de ilustración, el filtrado de la estación LE. Se muestra con puntos azules los datos que pasan el control de calidad, con puntos rojos los excluidos y con trazo negro las rectas que limitan la Q_p (filtro FP3). Cada una de las estaciones ha pasado por un control de calidad similar en donde se variaron levemente los valores de α_{min} , α_{max} y c del filtro FP3 para cada estación.

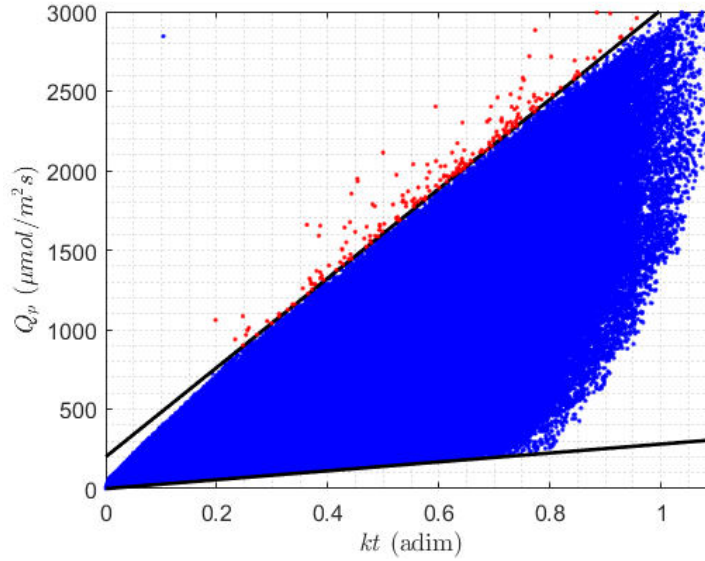


Figura 1: Filtrado minutil para altura solar mayor a 7° de la estación LE. Con puntos azules los datos que pasan el filtrado, con rojo los excluidos y con trazo continuo negro las rectas que limitan Q_p .

MODELADO HORARIO DE LA FRACCIÓN PAR

La Fig. 2 permite ver la variabilidad de f_p como función de la nubosidad expresada por k_t , a escala horaria. Además de mostrar la nube de puntos horaria (puntos en azul claro), se muestra la mediana de f_p (cuadrados azules) y el intervalo de dos desviaciones estándar (2σ , triángulos negros), para una discretización de los datos en 100 compartimentos equiespaciados entre $k_{t_{min}} \leq k_t \leq k_{t_{max}}$. Se observa que la variabilidad principal de f_p está dada por su dependencia con k_t , con un rango de variación aproximada entre 1.7 y 5.0 $\mu\text{mol/J}$. La variabilidad en torno a este comportamiento general, medida como el promedio de los 100 intervalos 2σ es de $2\bar{\sigma} = 0.28 \mu\text{mol/J}$. Por su parte, la máxima variabilidad ocurre para las condiciones de alta nubosidad ($k_t \leq 0.10$), siendo de $\approx 2.5 \mu\text{mol/J}$. La mínima variabilidad se observa en condiciones de cielo claro, ($k_t \approx 0.80$). Los modelos a analizar, al ser univariados en k_t , buscan capturar el comportamiento promedio de esta nube con esta variable, y no la variabilidad por otros factores, que explica el ancho promedio $2\bar{\sigma}$ de la nube de datos en este dominio.

Los modelos analizados para la fracción PAR son para toda condición de cielo y dependen en ambos casos de k_t y en uno de ellos se adiciona la altura solar (α_s). En términos de $x = \ln(k_t)$ e $y = \sin(\alpha_s)$, estos modelos se pueden escribir como:

1. Modelo (AL) de Alados et al. (1996),

$$f_p = a + b x + c y. \quad (1)$$

2. Modelo propuesto (DLA),

$$f_p = a + b x + c x^2 + d x^3. \quad (2)$$

Los coeficientes a , b , c y d (en $\mu\text{mol/J}$) se pueden ajustar con datos locales para cada uno de los sitios. El entrenamiento y la evaluación de los modelos locales se realizó utilizando un muestreo aleatorio estándar y el método de validación cruzada, en el que, en cada iteración, el 50% de los datos se utiliza para entrenamiento del modelo y el otro 50% se utiliza para la validación. Después de 1000 iteraciones, los coeficientes locales y los porcentajes de los indicadores de desempeño se promedian y reportan. En las Ecs. (3), (4) y (5) se definen los tres indicadores utilizados en este trabajo. En su definición hay tres

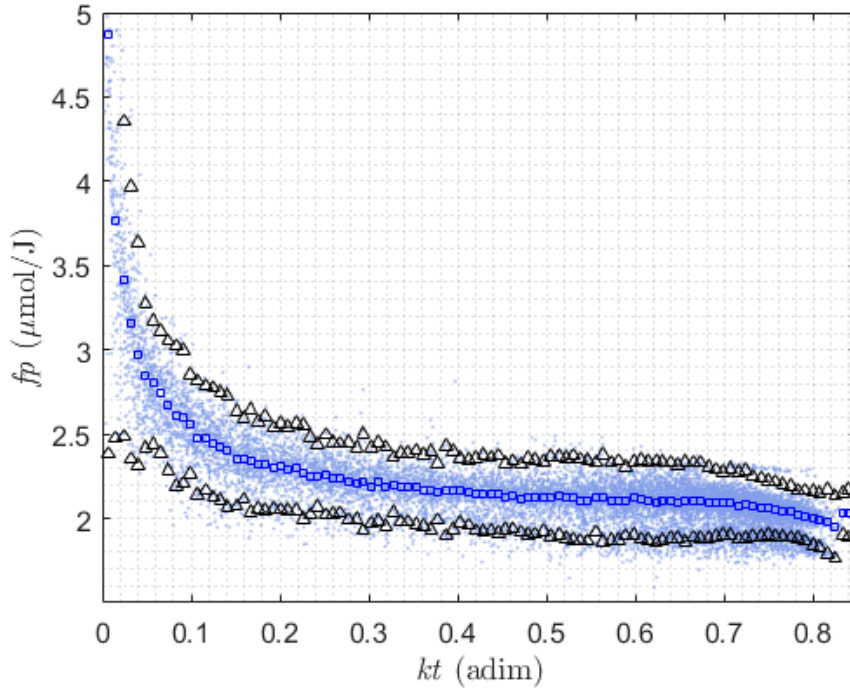


Figura 2: Variabilidad de la f_p con k_t . Con puntos celestes se presentan los datos experimentales, con cuadrados azules las medianas de f_p y k_t y con triángulos negros ($f_p \pm 2\sigma$).

fracciones PAR de interés: $f_p(est)$ es la fracción PAR estimada por los modelos, $f_p(exp)$ es la fracción PAR calculada a partir de las medidas y f_{med} es el promedio de la fracción PAR anterior.

$$rMBD = \frac{100}{N f_{med}} \sum_{i=1}^N (f_p(est) - f_p(exp)) \quad (3)$$

$$rMAD = \frac{100}{N f_{med}} \sum_{i=1}^N |f_p(est) - f_p(exp)| \quad (4)$$

$$rRMSD = \frac{100}{f_{med}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f_p(est) - f_p(exp)]^2} \quad (5)$$

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes localmente ajustados para cada modelo y cada sitio, y la media que emerge de los valores horarios de fracción PAR que pasaron los controles de calidad. Esta media es la que se utiliza para normalizar los indicadores de desempeño (f_{med}). En las últimas dos filas se presenta el promedio de estos coeficientes entre los sitios y su desvío estándar porcentual, relativo a la media de cada coeficiente. Se puede observar que el término independiente (coeficiente a) tiene baja variabilidad entre sitios, de $\simeq 2\%$. En cambio, el resto de los coeficientes tiene mayor variabilidad, entre 20–45% para la mayoría de ellos, y especialmente alta para el coeficiente c del modelo AL. Este coeficiente es el que multiplica al $\sin(\alpha_s)$ en este modelo, y además de ser muy variable entre sitios, es pequeño. Esto evidencia que la dependencia de la fracción PAR con la altura solar no es alta, y como se verá más adelante (y como indica su coeficiente pequeño) tiene poca incidencia en el comportamiento de este modelo. Este hallazgo va en la misma línea con el que encontramos en Di-Laccio et al. (2021) con datos minutales, donde observamos que el modelo empírico que utilizaba únicamente la altura solar como predictor de la fracción PAR (Tiba y Leal, 2004), presentaba un menor desempeño que el resto, con ganancias marginales respecto a la utilización de un factor constante. La variabilidad entre estaciones de la fracción PAR es de 4%, con una media de $f_p^{hor} = 2.07 \mu\text{mol/J}$.

Tabla 3: Coeficientes ajustados para los dos modelos considerados.

	AL			DLA				fpar
	a	b	c	a	b	c	d	media
LE	1.849	-0.362	0.049	1.979	-0.211	-0.049	-0.025	2.177
RC	1.939	-0.192	-0.041	1.955	-0.145	-0.036	-0.017	2.074
PP	1.924	-0.167	-0.014	1.962	-0.128	-0.068	-0.023	2.045
ZU	1.880	-0.147	-0.008	1.887	-0.181	-0.095	-0.028	1.983
promedio	1.898	-0.217	-0.004	1.946	-0.166	-0.062	-0.023	2.070
stdev	2 %	45 %	1081 %	2 %	22 %	41 %	20 %	4 %

En la Tabla 4 se presentan las métricas de desempeño de los modelos en cada estación. En forma complementaria, se muestra en la Fig. 3 el ajuste de los modelos a los datos experimentales de LE, utilizando el diagrama de f_p vs k_t . Dado el ajuste local, los modelos son insesgados para la estimación de fracción PAR horaria. Se observa que el modelo DLA presenta mejores indicadores de desempeño que el modelo AL, estando (en promedio entre todas las estaciones) un 0.7 % y 1.3 % por debajo en rMAD y rRMSD, respectivamente. En la estación LE, de mayor estadística temporal, estas diferencias alcanzan un 1.4 % y 2.5 %. La ganancia de este modelo se refleja además en un comportamiento cualitativamente más adecuado frente a los datos, como se observa en la Fig. 3. El modelo DLA acompaña mejor la variación de la f_p con k_t , especialmente para $k_t < 0.4$, logrando modelar de forma más afectiva el aumento rápido de fracción PAR que ocurre para k_t pequeño. En la Fig. 3a se puede observar además la poca relevancia de la variable $\sin(\alpha_s)$ en este modelo, que es la que le daría un cierto ancho a la curva de estimación en este diagrama. El ancho de la curva es pequeño, agregando poca capacidad al modelo para representar la nube de puntos. La dispersión de la nube de puntos está, por tanto, poco relacionada con la altura solar (o, alternativamente, la masa de aire), estando dicha dispersión asociada a otra variable. Futuros trabajos incluirán el análisis de otras variables para este problema de modelado fenomenológico, como por ejemplo, la fracción difusa.

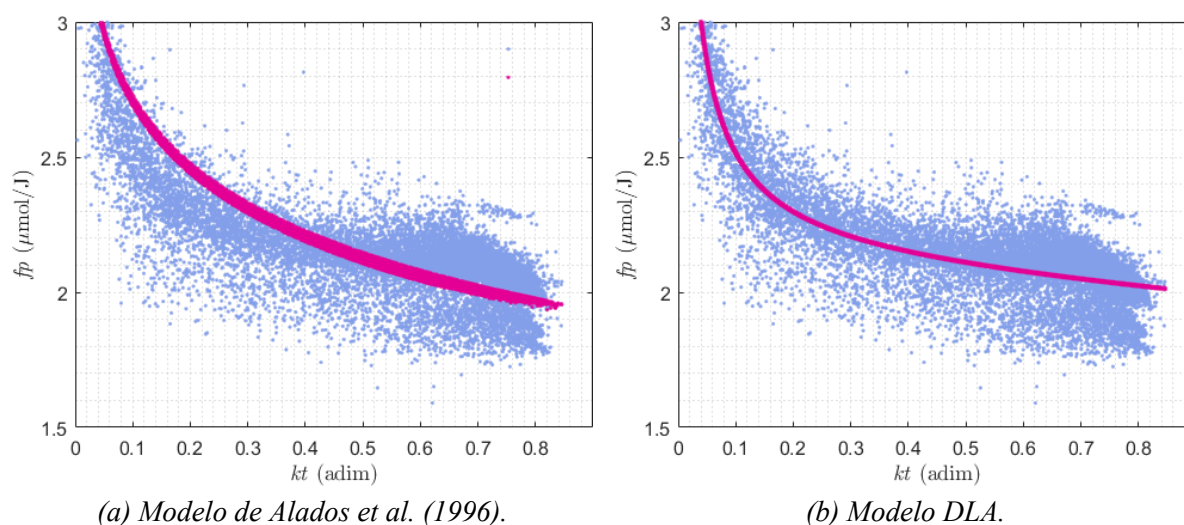


Figura 3: Ajuste de los modelos (en rojo) a los datos experimentales (en azul) de la estación LE.

Tabla 4: Indicadores de desempeño de los dos modelos considerados.

	AL			DLA		
	rMBD	rMAD	rRMSD	rMBD	rMAD	rRMSD
LE	0.0	5.6	9.7	0.0	4.2	7.2
RC	0.0	4.6	6.1	0.0	4.3	5.5
PP	0.0	3.3	5.7	0.0	2.7	4.4
ZU	0.0	3.6	5.3	0.0	3.2	4.4

INFORMACIÓN MENSUAL

En la Fig. 4 se presenta la información estadística mes a mes y anual para los valores diarios de G_h (Fig. 4a) y Q_p (Fig. 4b) de la estación LE durante el periodo 2017-2020. La información se presenta en un gráfico de caja común. Las cajas rectangulares (azul) delimitan el rango intercuartil donde se concentra el 50 % de probabilidad. Los puntos en negro dentro de las cajas son la media de los datos y la línea horizontal en rojo es la mediana (valor P50). Las líneas verticales punteadas delimitan un rango máximo y mínimo definido en forma estándar por una distribución Gaussiana que contiene el 99.3 % de probabilidad. Las cruces en rojo son valores que se encuentran a más de 1.5 veces del rango intercuartil de la parte superior o inferior de la caja, que bajo la hipótesis Gaussiana serían considerados como anómalos (outliers). Si bien esta hipótesis no se adecua a la distribución real de los valores diarios de radiación solar, el gráfico de caja es estándar y de fácil visualización, y por tanto adecuado para presentar la información.

De la Fig. 4a y Fig. 4b se identifica la estacionalidad característica de la radiación solar en Uruguay (Alonso-Suárez, 2017). Se observa una dispersión no esperada en los valores de enero, septiembre y octubre, que se explica por una mayor presencia de días nublados en esos meses respecto a los otros en el periodo 2017-2020. En la Tabla 5 se presentan los valores mes a mes y anual de la media, mediana, desviación estándar (SD), valor máximo y mínimo para Q_p y G_h . Se agrega además el valor promedio mensual de la f_p . Este es el primer cálculo y reporte de datos de radiación PAR (Q_p y f_p) en Uruguay a escala mensual y anual. Si se toman los promedios anuales de $\bar{Q}_p = 36.8 \text{ mol/m}^2 \text{ día}$ y $\bar{G}_h = 17.8 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$, la estacionalidad del recurso es tal que el invierno está un $\simeq 40\%$ por debajo y el verano está un $\simeq 45\%$ por encima de la media. Esto es característico en un clima subtropical con marcada estacionalidad. Dado que se obtuvo de una estadística de solo 4 años, esta información no puede considerarse aún con valor climatológico, lo que es claro en particular si se observa el mes de enero. Por otro lado, y a modo de ejemplo, la información de GHI de la Tabla 5 se encuentra en promedio un $\simeq 4\%$ por encima de los valores del Mapa Solar del Uruguay (<http://les.edu.uy/online/msuv2/>), elaborado a partir de 16 años de imágenes de satélite y 5 años de medidas en Tierra (Alonso-Suárez et al., 2014), lo que muestra un sesgo de este periodo de 2017-2020 a ser de buen recurso. Más evidencia en este sentido se muestra en la Fig. 5, que presenta la comparación de la climatología de GHI para la estación LE (en rojo, valores del Mapa Solar) junto con los valores de la Tabla 5 (periodo 2017-2020). Este gráfico permite visualizar la referencia climatológica del recurso en Uruguay junto con el periodo de medición considerado. Se puede observar la sobrestimación comentada, ocurrida en los meses de alto recurso, y se aprecia claramente que el valor de enero es atípico.

No obstante lo anterior, esta tabla muestra por primera vez valores preliminares de radiación PAR en el país. En particular puede obtenerse una primera estimación de la fracción PAR promedio anual de $f_p = (2.11 \pm 0.05) \mu\text{mol/J}$ y se evidencia un comportamiento no homogéneo de esta fracción a escala mensual a lo largo del año, con una tendencia decreciente hacia los veranos y un máximo entre abril y junio. A futuro se espera poder actualizar esta información a partir de contar con mayor estadística temporal en los

sitios de medida y modelos satelitales para estimación de la radiación PAR, lo que habilitaría a trabajar con una estadística de más de dos décadas de información a la fecha.

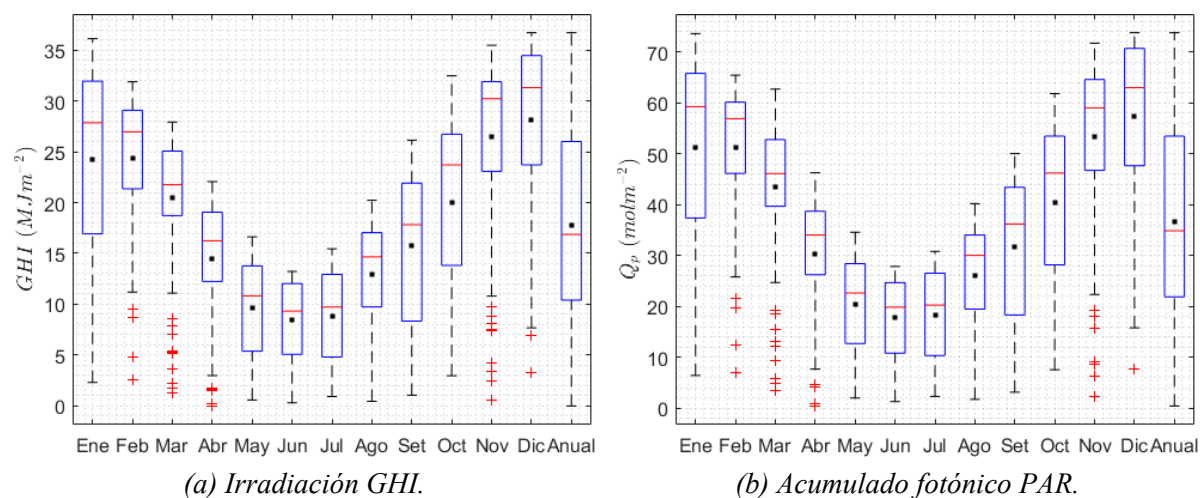


Figura 4: Estadística de los valores diarios mes a mes y anual para la estación LE (periodo 2017-2020).

Tabla 5: Valores mensuales de PAR, GHI y f_p para la estación LE de Uruguay (periodo 2017-2020).

Mes	PAR (mol/m ² día)					GHI (MJ/m ² día)					fpar
	media	P50	SD	máx	mín	media	P50	SD	máx	mín	media
Ene	51.3	59.3	19.0	73.6	6.5	24.2	27.8	9.6	36.1	2.3	2.16
Feb	51.3	56.9	13.3	65.4	7.1	24.4	26.9	6.8	31.9	2.6	2.12
Mar	43.5	46.1	12.6	62.7	3.5	20.5	21.7	6.2	27.9	1.2	2.14
Abr	30.4	34.1	11.6	46.3	0.5	14.4	16.2	5.8	22.1	0.0	2.17
May	20.4	22.7	9.2	34.6	2.0	9.7	10.8	4.7	16.6	0.6	2.19
Jun	17.9	19.9	7.8	27.9	1.3	8.5	9.3	3.9	13.2	0.3	2.15
Jul	18.3	20.3	8.9	30.8	2.4	8.8	9.7	4.6	15.4	0.9	2.14
Ago	26.2	30.1	10.0	40.2	1.8	12.9	14.7	5.2	20.2	0.5	2.08
Set	31.6	36.2	13.9	50.0	3.2	15.7	17.8	7.3	26.1	1.1	2.06
Oct	40.5	46.2	16.2	61.8	7.6	20.1	23.7	8.4	32.5	3.0	2.06
Nov	53.4	59.0	16.2	71.7	2.4	26.5	30.2	8.4	35.5	0.6	2.05
Dic	57.3	63.0	16.2	73.8	7.8	28.1	31.3	8.4	36.7	3.3	2.06
Anual	36.8	34.9	19.3	73.8	0.5	17.8	16.9	9.6	36.7	0.0	2.11

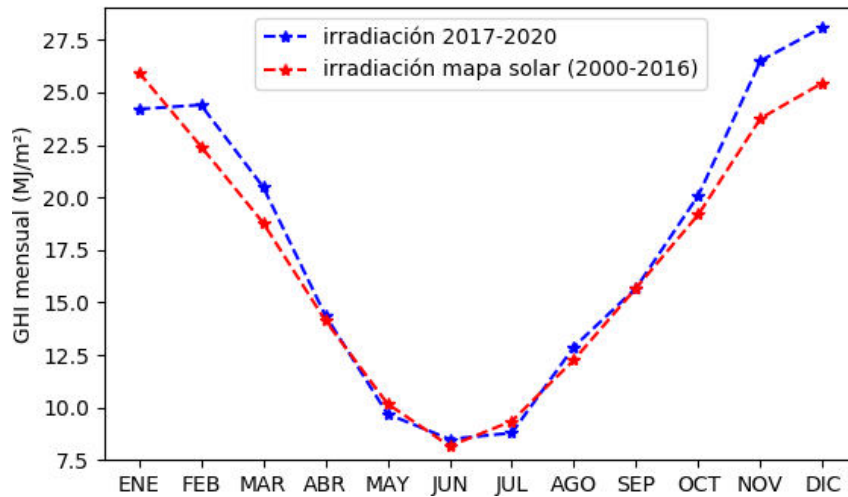


Figura 5: Comparación de los promedios mensuales de GHI para la estación LE en dos periodos temporales: 4 años de mediciones (2017-2020) y valores del Mapa Solar (17 años, 2000-2016).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el ajuste y validación de modelos horarios de fracción PAR, que permiten estimar el flujo fotónico PAR promedio en la hora a partir de un valor de irradiancia GHI promedio horaria. Se consideraron dos modelos, uno pre-existente y una nueva propuesta, con más parámetros pero menos variables de entrada (predictores), que mejora en desempeño a la primera. Este primer modelo había sido identificado como el de mejor desempeño en nuestra región (a escala minutil) en un trabajo anterior. El análisis se basó en mediciones terrestres registradas en 4 sitios, cuya calidad fue controlada por un procedimiento de filtrado ad-hoc que considera ambas variables. Se obtuvo que es posible estimar la fracción PAR con un rRMSD entre 7.2% y 4.4%, dependiendo del sitio, y que la propuesta de nuevo modelo supera en 0.7% y 1.3% en promedio al modelo anterior, en términos de rMAD y rRMSD, respectivamente.

Con base en la medida de calidad controlada del sitio con mayor estadística (LE, 4 años), se calcularon totales diarios y se generó una primera estadística mensual y anual de los valores diarios de radiación PAR, tanto para el acumulado fotónico PAR como de la fracción PAR. Se obtiene una primera estimación del promedio anual del acumulado fotónico diario de radiación PAR, de $Q_p = 36.8 \text{ mol/m}^2 \text{ día}$. Este valor posiblemente esté un poco por encima de su valor climatológico, dado que la GHI para igual periodo temporal se encuentra un 4% por encima del Mapa Solar del Uruguay, elaborado con modelos satelitales especialmente ajustados a varias series de medición terrestre del país. Se establece una primera estimación de la fracción PAR anual en $f_p = (2.11 \pm 0.05) \mu\text{mol/J}$, con baja variación anual, pero tendiente a ser mayor en el periodo entre abril y junio que en el verano. Estas informaciones y conclusiones se actualizarán en próximos trabajos con mayor estadística temporal de medición y estimaciones satelitales con modelos localmente ajustados para las cantidades PAR en la región. Una mayor estadística temporal de medición podrá evidenciar si los valores más altos de GHI registrados en el verano y parte de media estación efectivamente se corresponden con años de mayor recurso en dicho período, o si se trata de una subestimación del modelo satelital detrás del Mapa Solar. Para esto se requiere un periodo de medición mayor a una década, idealmente de 15 años o más, para tener una estadística temporal que habilite a realizar promedios climatológicos a partir de las medidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República por el apoyo financiero a través de su programa de Grupos de I+D.

REFERENCIAS

- Alados, I., Foyo-Moreno, I., y L. Alados-Arboledas (1996). Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1):121–131.
- Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales*. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20200>.
- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Musé, P., y Siri, R. (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. *Energy Procedia*, 57:1237–1246. 2013 ISES Solar World Congress.
- Blackburn, W. J. y Proctor, J. T. A. (1983). Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Solar Energy*, 31(2):233–234.
- Denegri, M. (2016). Radiación Fotosintéticamente Activa en Luján, Buenos Aires. estimación en función de la irradiación solar global. *XVI Reunión Argentina y VIII Latinoamericana de Agrometeorología. Puerto Madryn, Chubut*.
- Di-Laccio, J., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2021). One-minute assessment of photosynthetically active radiation (PAR) models in Uruguay. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2021*.
- Escobedo, J., Gomes, E., Oliveira, A. P., y Soares, J. (2006). Radiações solares UV, PAR e IV: I - estimativa em função da global. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10:79 – 86.
- Escobedo, J., Gomes, E., Oliveira, A. P., y Soares, J. (2011). Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, 36:169 178.
- Foyo-Moreno, I., Alados, I., y Alados-Arboledas, L. (2017). A new conventional regression model to estimate hourly photosynthetic photon flux density under all sky conditions. *Int. J. Climatol*, 37.
- Gallegos, H. G., Righini, R., y Dursi, O. (2004). Primeras mediciones de la Radiación Fotosintéticamente Activa en San Miguel, Provincia de Buenos Aires. *ASADES*, pp. 11.13–11.17.
- García-Rodríguez, A., Granados-López, D., García-Rodríguez, S., Díez-Mediavilla, M., y Alonso-Tristán, C. (2021). Modelling Photosynthetic Active radiation (PAR) through meteorological indices under all sky conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 310:108627.
- McArthur, L. (2005). Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual. Td-no. 1274, wrp/wmo, World Meteorological Organization (WMO). www.wmo.org.
- Righini, R. y Gallegos, H. G. (2005). Análisis de la correlación entre la Radiación Fotosintéticamente Activa y la Radiación Solar Global en San Miguel. *ASADES*, 9:11.01–11.04.
- Tiba, C. y Leal, S. D. S. A. (2004). Medidas e modelagem da radiação PAR para o nordeste do Brasil. *5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída. Campinas – São Paulo*.

EVALUATION OF THE PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION IN URUGUAY

ABSTRACT: In this work two hourly PAR fraction all-sky models are analyzed in four measuring sites in Uruguay. The best performing pre-existing model to date is considered along with a novel proposal. The quality control includes limits on the one-minute values of G_h and Q_p , as well as kt_p and f_p , and also geometrical considerations based on $\cos \theta_z$. The models' local coefficients are determined and their performance is assessed by using the rMBD, rMAD and rRMSD metrics. It is concluded that the new proposal, based on the three-degree polynomial of $\ln(k_t)$, outperforms the previous model. For the station with longer data statistics (2017-2020), a preliminary monthly and annual assessment is done for the PAR radiation. During the considered period, the PAR photon's amount had a maximum in December of (57.3 ± 16.2) mol/m² day and a minimum in June of (17.9 ± 7.8) mol/m² day. The Q_p annual average was 36.8 mol/m² day and the annual PAR fraction was (2.11 ± 0.05) μmol/J.

Keywords: solar radiation, PAR radiation, PAR fraction, PAR modeling