

ANALISIS DE VALORES DE IRRADIANCIA DIFUSA MEDIDOS Y ESTIMADOS USANDO LOS MODELOS BRL Y ENGERER, CASO DE ESTUDIO: LA QUIACA (ARGENTINA)

Germán A. Salazar– germansalazar.ar@gmail.com

Universidad Nacional de Salta (Argentina), Departamento de Física

Fernando M. Nollas– fernandonollas@gmail.com

Servicio Meteorológico Nacional (Argentina)

Christian A. Gueymard - chris@solarconsultingservices.com

Solar Consulting Services

Manoel Henrique de O. P. Filho - manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

Resumen. En este trabajo se realizó el análisis de valores de irradiancia solar difusa que fue medida sombreando un piranómetro con un anillo, en la ciudad de La Quiaca (Argentina) cuya altitud es 3000 metros sobre el nivel del mar. Los datos medidos tienen frecuencia minutil y abarcan 3 años incompletos. El método utilizado para la corrección de los valores medidos fue el de LeBaron. Esos valores se comparan luego contra los estimados obtenidos usando los modelos BRL, BRL-Brasil, Engerer1 y Engerer2. Se ensayó una manera de detectar momentos de desalineación del aro respecto del sensor de difusa. Comparándolos contra los valores medidos, los modelos sobrestiman la irradiancia difusa, salvo BRL-BR. Este estudio promete resultados interesantes en lo que a análisis de calidad de datos de difusa se refiere, así como a validación de modelos de irradiancia difusa minutil para la región Noroeste de Argentina.

Palabras clave: Irradiancia Difusa, Boland, Engerer, La Quiaca.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del recurso solar requiere del análisis de valores medidos de radiación solar en forma de irradiancia horaria o minutil. La componente de la radiación solar más comúnmente medida a nivel mundial es la radiación solar global, principalmente porque estos dispositivos no requieren de sistemas seguidores (trackers), lo que reduce considerablemente su precio y mantenimiento.

La irradiancia solar global I_G posee dos componentes: la irradiancia solar directa horizontal I_{BH} y la irradiancia solar difusa I_D relacionadas de tal manera que

$$I_G = I_{BH} + I_D = I_{BN} \cdot \cos\theta_z + I_D \quad (1)$$

Donde en Ec. (1), I_{BN} es la irradiancia directa normal al haz y θ_z es el ángulo cenital. Así, si se conoce el valor de la I_G y otra más (I_{BH} o I_D), es posible calcular la restante. Esta técnica es muy útil cuando solo se dispone de bases de datos medidos de I_G .

El dimensionamiento de sistemas solares térmicos o fotovoltaicos requieren del conocimiento de la I_{BN} y I_D , por lo que es importante buscar modelos que permitan estimar razonablemente una de estas componentes. Los sitios de altura del Norte Argentino poseen las características necesarias para la instalación de centrales solares de producción de electricidad. En la región existen estaciones meteorológicas que han medido I_G durante periodos de tiempo significativos, y muy pocas que han medidos simultáneamente I_D , por lo que estudiar un método que permita estimar valores de I_D a partir de valores medidos de I_G es útil y tiene diversas aplicaciones prácticas.

En este estudio se usaron cuatro modelos particulares: BRL (Ridley et al., 2010) y BRL corregido para datos de Brasil (Lemos et al., 2017), Engerer1 y Engerer2 (Engerer, 2015). Esos modelos permiten estimar valores de I_D a partir de valores de I_G . Debe destacarse que solo el modelo Engerer2 considera los momentos de “realce por nubes” (cloud enhancements, en inglés) en los valores de I_D , siendo el que presenta una mayor aproximación a la realidad. Los modelos Engerer necesitan de valores de irradiancia global de cielo claro $I_{G,cc}$. Los modelos de cielo claro utilizados fueron REST2 (Gueymard, 2008) y ARG-P (Salazar, 2010), siendo el primero un modelo físico y el restante uno empírico, diseñado para sitios de altura del NOA (Norte Argentino).

2. DATOS Y METODOLOGIA DE ANALISIS

La base de datos utilizada corresponde a medidas minutales (frecuencia de registro de datos=1 minuto) realizadas desde 2005 hasta 2007. En la Tab. 1 se muestra el porcentaje de días completos disponibles para cada año analizado. Un día se considera completo cuando se tienen los 1440 datos minutales. Si bien esta base de datos medidos puede considerarse pequeña y sesgada, los sensores utilizados son térmicos (Kipp & Zonen CM11) y han sido calibrados por el

Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina utilizando un pirheliómetro de cavidad con trazabilidad al PMOD/WRC, lo que asegura calidad de medición dentro de cada periodo. Los datos fueron medidos en el Observatorio Meteorológico de la ciudad de La Quiaca (Lat 22°06'20''S, Long 65°36'00''O, Alt 3460 msnm) perteneciente al SMN donde, además de medir los parámetros meteorológicos más comunes, también se mide radiación solar global y difusa (con piranómetros térmicos) así como radiación UV eritémica (radiómetro YES).

Para la medición de la irradiancia solar difusa se utiliza un piranómetro sombreado por un aro (shadow ring, en inglés), el cual debe ser corregido en declinación a lo largo del año para asegurar que no incida I_{BN} sobre él. Los valores de I_D medidos con aro sombreador deben ser corregidos, ya que el aro impide la llegada de radiación difusa de una buena parte del cielo. El método de corrección aplicado a los datos crudos de la I_D se explicará más adelante.

Tabla 1 - Porcentaje de días con datos medidos, por cada mes y año, para la estación La Quiaca.

	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2005	0	0	0	0	0	0	0	94	47	94	73	81
2006	87	0	71	87	45	0	0	0	0	0	0	26
2007	0	0	0	23	52	40	0	65	77	97	93	0

2.1 Modelos de corrección de radiación difusa por anillo sombreador

Para conseguir valores medidos de I_D se utilizan dos métodos: anillo sombreador o bola sombreadora. La primera es un aro que varía la declinación de acuerdo con el día del año. De esa manera cubre el camino aparente del Sol por el cielo durante el día. La dificultad que tiene este método es que además de cubrir la radiación proveniente del disco solar, impide la llegada de radiación de parte del cielo, por lo que el valor de la radiación difusa se obtiene luego de realizar una corrección.

El método de la bola sombreadora es mucho mejor, ya que solo se cubre al disco solar (y región circunsolar), obteniéndose el valor de la radiación difusa de manera eficiente. El problema es que este sistema requiere de un mecanismo de seguimiento, similar a la montura astronómica de un pirheliómetro, ya que la bola debe acompañar el movimiento aparente del sol en el firmamento.

Entre los modelos de corrección de radiación difusa por aro sombreador podemos mencionar a Drummond (1956), Steven (1984), LeBaron (1990); Batlles (1995) y Muneer-Zhang (2002). LeBaron y Batlles son los modelos con mejores resultados (Sánchez et al., 2012). En este trabajo los valores de irradiancia difusa I_D se corrigieron usando el modelo de LeBaron debido a su performance y porque permite trabajar con datos medidos con frecuencia de 1 minuto.

2.2 Modelos de radiación difusa

La irradiancia solar difusa I_D se define como la irradiancia solar que ha sido dispersada en la atmosfera por moléculas, aerosoles y nubes, y es recibida en una superficie horizontal. También se la define como la porción de la I_G que queda luego de remover la irradiancia directa horizontal (es decir, $I_{BN} \cdot \cos\theta_z$). Esta última definición es operativa y indica cómo se mide la irradiancia difusa: debe bloquearse la radiación solar que llega del disco solar y tener en cuenta solo la que proviene del resto del cielo.

La necesidad de contar con estimaciones de fracción de irradiancia difusa generó diversos modelos, entre los que se destacan Orgill y Hollands (1977), Erbs et al. (1982) y Reindl et al. (1990a), para valores horarios de índice de claridad k_t . Estos modelos permiten estimar la fracción de radiación difusa I_D/I_G (k_d) en función del k_t . Estudios más recientes como el de Ridley (Ridley et al., 2010) y Boland (Boland et al., 2013) utilizaron funciones logísticas con múltiples predictores encontrando mejores resultados a la hora de estimar la fracción difusa en particular en el hemisferio sur y por ello su importancia para este estudio.

Por otro lado, algunas aplicaciones de la energía solar requieren conocer la radiación difusa en periodos sub-horarios, por lo que se han realizado estudios en los que se desarrollaron modelos para una frecuencia 1-minuto como los de Gueymard y Ruiz Ariaz (Gueymard, 2016), Lemos (Lemos et al., 2017) y Engerer (Engerer, 2015).

2.2.1 El modelo de Boland (BRL) y el modelo corregido BRL-BR

Basándose en los trabajos anteriores de Boland (Boland et al., 2001,2008), Ridley (Ridley et al., 2010) propuso un modelo logístico con múltiples predictores, el cual es conocido como el modelo BRL. Los predictores fueron seleccionados teniendo en cuenta criterios expuestos por Reindl (Reindl et al., 1990) así como por Erbs (Erbs et al., 1982) y los mismos contemplan el índice de claridad horario k_t , la altura solar α , la hora solar HS, el índice de claridad diario K_t y un predictor llamado *índice de persistencia* ϕ el cual está relacionado con la inercia en la atmósfera. Basándose en estimadores estadísticos los autores concluyeron que el modelo propuesto obtuvo mejores resultados que los disponibles hasta ese momento para sitios del hemisferio sur, mientras que para el hemisferio norte se halló un comportamiento similar a los que mejor desempeño mostraron. Debe tenerse en cuenta que los autores utilizaron datos de estaciones próximas al nivel del mar, en base horaria.

Por otro lado, y con la finalidad de poder caracterizar el recurso solar en Brasil, Lemos (Lemos et al., 2017) utilizó datos horarios y minutales de nueve estaciones de medición de radiación solar pertenecientes a la red SONDA (Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais, en portugués) para establecer un ajuste del modelo planteado por Ridley, respetando la misma forma y los mismos predictores. Una vez establecidos los factores constantes del ajuste, los autores compararon los resultados obtenidos por el modelo BRL y el modelo BRL ajustado a los datos de Brasil, en adelante BRL-BR, encontrando un error medio porcentual absoluto entre 16% y 51% para el BRL mientras que para el BRL-BR se hallaron errores de entre 9% y 26%.

El modelo utilizado por Lemos (Lemos et al, 2017), con igual estructura que el de Ridley, permite estimar los valores de fracción difusa a través de la Ec. (2).

$$k_d = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_1 k_t + a_2 HS + a_3 \alpha + a_4 K_T + a_5 \phi)} \quad (2)$$

Donde k_t es el índice de claridad instantáneo, HS es la hora solar, α es la elevación solar, K_T es el índice de claridad diario y ϕ es el índice de persistencia. Este último se define como

$$\phi = (k_{t-1} + k_{t+1})/2 \quad \text{amanecer} < t < \text{ocaso} \quad (3.1)$$

$$\phi = k_{t+1} \quad t = \text{amanecer} \quad (3.2)$$

$$\phi = k_{t-1} \quad t = \text{ocaso} \quad (3.3)$$

En la Tab. 2 se muestran los valores de las constantes que corresponden al modelo BRL y al BRL-BR.

Tabla 2 - Valores de las constantes utilizadas en los modelos BRL y BRL-BR.

Coficiente	BRL	BRL-BR(minutal)
a_0	-5.38	-6.26
a_1	6.63	5.97
a_2	0.006	0.024
a_3	-0.007	-0.0053
a_4	1.75	2.84
a_5	1.31	2.41

2.2.2 Los modelos Engerer1 y Engerer2

En un trabajo presentado en 2015, Nicholas Engerer (Engerer, 2015) evalúa diversos modelos de estimación de irradiancia solar difusa y presenta sus modelos llamados Engerer1, Engerer2 y Engerer3 los cuales fueron desarrollados para trabajar con base temporal minutal. Para determinar sus modelos, el autor utilizó tres bases de datos con distintas características donde, para el modelo Engerer1 (Eng1), utilizó una base en la que separó el realce por nubes (cloud enhancement) omitiendo todos los instantes en los que la irradiancia medida excedía la teórica de cielo claro, utilizando para esto el modelo de cielo claro REST2 propuesto por Gueymard (Gueymard, 2008). El modelo Eng1 tiene una estructura similar al propuesto por Ridley et al. (2010) con la diferencia de que no considera el parámetro de persistencia, sino que incorpora una nueva variable ΔK_{tc} que se define como la diferencia entre el k_t medido y k_{tc} que representa el índice de claridad para condición de cielo claro. Esta variable hace necesaria la inclusión de un modelo de día de cielo claro. El modelo Eng1 ofrece resultados muy similares a los del BRL y BRL-BR y se rige por la Ec. (4).

$$\text{Eng1: } k_d = C + \frac{1-c}{1 + \exp(b_0 + b_1 k_t + b_2 HS + b_3 \theta_z + b_4 \Delta k_{tc})} \quad (4)$$

Donde θ_z es el ángulo cenital.

El modelo Engerer2 (Eng2) se estableció a partir de una base de datos sin restricción e introduce el concepto de *momento de difusa con realce por nubes* (cloud enhancement diffuse moment). Este concepto es aplicable a aquellos momentos cuando la irradiancia solar global medida I_G excede al esperado para la irradiancia de cielo claro $I_{G,cc}$. De esa manera los valores de difusa estimados bajo esos momentos son considerados solo por Eng2, dándole a ese modelo una aproximación sustancial a lo que sucede en realidad. Gueymard y Ruiz Arias (Gueymard, 2016) realizaron una exhaustiva evaluación de los modelos de separación disponibles en la que concluyeron que el modelo Eng2 tiene un mejor desempeño de entre los seleccionados. La Ec. (5) muestra el modelo Eng2 donde el parámetro k_{de} representa una corrección lineal correspondiente a la porción de fracción difusa que es atribuible a un realce por nubes.

$$\text{Eng2: } k_d = C + \frac{1-c}{1 + \exp(b_0 + b_1 k_t + b_2 HS + b_3 \theta_z + b_4 \Delta k_{tc})} + b_5 k_{de} \quad (5)$$

Donde k_{de} es el valor máximo entre 0 y $1 - I_{G,cc}/I_G$. En la Tab. 3 figuran las constantes de ajuste utilizadas para los modelos Eng1 y Eng2.

Tabla 3 - Valores de las constantes de los modelos Eng1 y Eng2.

Variables	Eng1	Eng2
C	0.1527	0.042336
b ₀	-4.1092	-3.7912
b ₁	6.1661	7.5479
b ₂	-0.0022304	-0.010036
b ₃	0.011026	0.003148
b ₄	-4.3314	-5.3146
b ₅	-	1.7073

El modelo Engerer 3 no fue considerado para el presente trabajo dado que el mismo fue desarrollado a partir de una base de datos donde únicamente se utilizaron días claros y no será el caso de estudio aquí.

2.3 Efectos de desalineación del aro sombreador

Un aspecto fundamental al momento de medir I_D es que el anillo esté correctamente alineado con el piranómetro de difusa, ya que si esto no ocurre se incrementa la radiación solar que llega al sensor, resultando en la medición de valores erróneos.

En la Fig. 1a y b se muestran casos donde la falta de alineación produce un incremento de irradiancia difusa medida. Esto se detecta al compararla con la I_D simulada usando Eng2. En la Fig. 2 se muestra un caso de desalineación total, ya que la irradiancia difusa medida coincide con la irradiancia global. Debe destacarse que no se analizarán las posibles causas que ocasionan la desalineación.

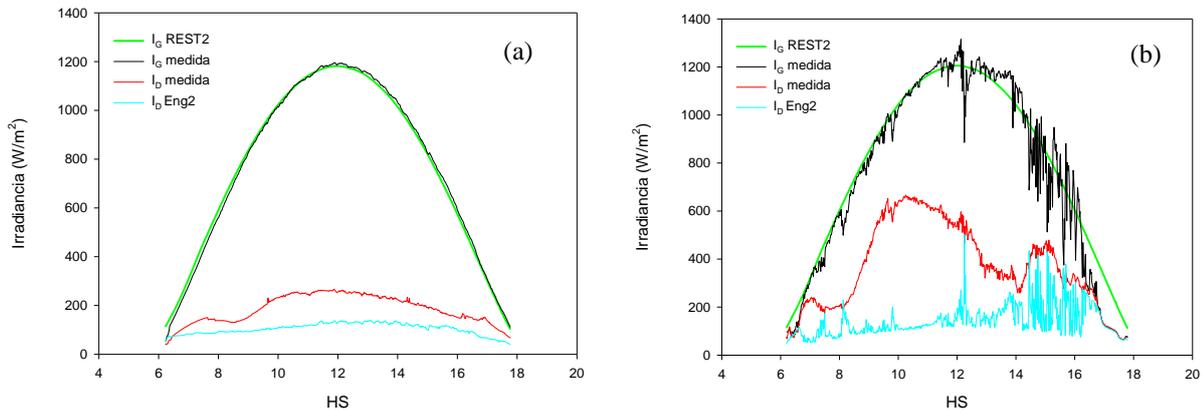


Figura 1 - Valores medidos de Irradiancia solar global I_G y difusa I_D , y valores estimados de Irradiancia solar global de día claro (usando el modelo REST2) y de difusa usando el modelo de Eng2 para los días (a) día 295 de 2005 y (b) día 298 de 2005. HS es hora solar.

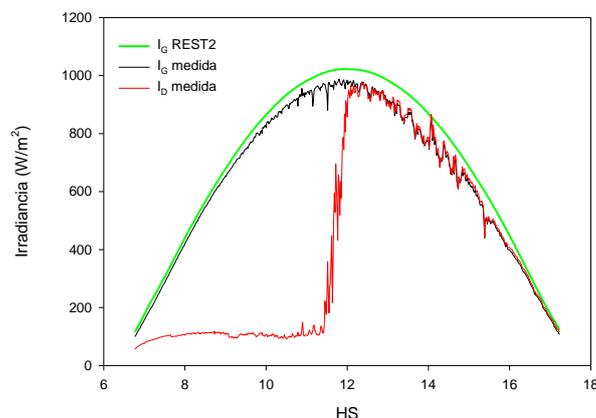


Figura 2 - Irradiancia solar global medida I_G e irradiancia solar difusa medida I_D para el día 243 de 2005. Se observa una evidentemente desalineación a partir del mediodía. HS es hora solar.

Resulta necesario que para hacer un análisis representativo de los datos de irradiancia solar difusa medidos en La Quiaca deben filtrarse los valores que se han visto afectados por la desalineación del aro sombreador.

2.4 Detección de momentos de desalineación.

La detección de los valores de irradiancia difusa I_D que se han visto afectados por la desalineación del aro es importante. En este trabajo se optó por comparar los valores de la I_D medida con las simuladas con los modelos Eng1, Eng2, BRL y BRL-BR en su forma de fracción difusa. Si la diferencia entre la fracción difusa medida y las simuladas es mayor que un cierto valor crítico, se considera que la radiación solar difusa medida es errónea.

Para la determinación de este valor crítico deben tenerse en cuenta lo siguiente:

- i) Si la I_D medida está influenciada por mayor radiación que la que corresponde, su valor de fracción difusa se acercara más al valor 1, llegando a ese valor cuando la I_D sea igual a la I_G (desalineación total).
- ii) Se supone que los valores de I_D medidos correctamente tendrán valores muy próximos (o iguales) a los valores estimados, por lo que la diferencia de fracciones de difusa entre la irradiancia difusa medida y las estimadas debería ser 0 o muy próxima a 0 (Fig. 3a y 3b)
- iii) Debido a la influencia de la sobrestimación o subestimación del modelo de cielo claro usado, respecto de los valores de I_G medidos, la diferencia de fracciones de difusa puede dar negativa, aún para momentos de alineación y de cielo claro. Esto ocurre cuando los modelos subestiman la I_D .

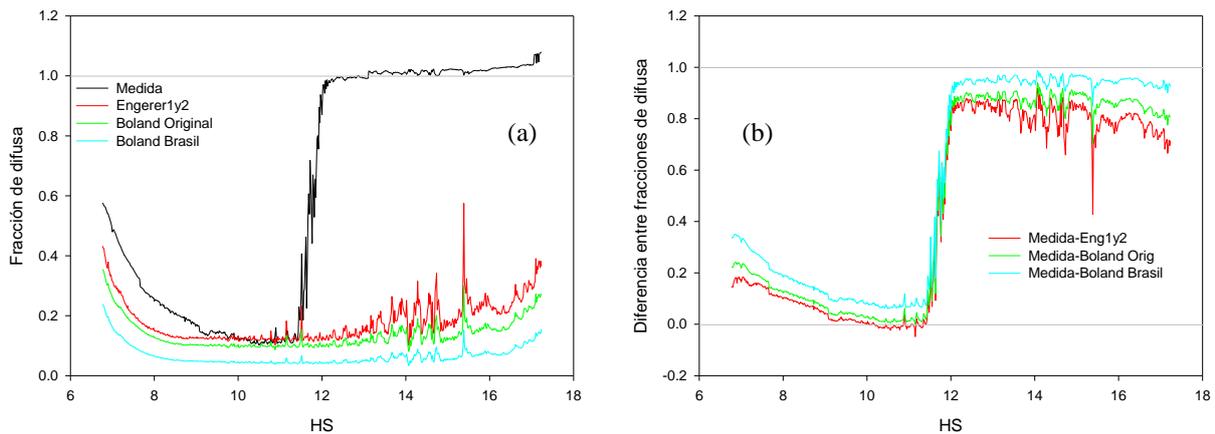


Figura 3 - (a) Fracciones de difusa medida y estimadas con Eng1 y 2, BRL y BRL-BR para el día 243 de 2005. Se observa que la fracción de difusa medida (línea negra) alcanza el valor 1 luego del mediodía, mientras que las estimadas usando los demás modelos no lo hacen. (b) Diferencias de las fracciones de difusa medida X estimada. Se observa que la diferencia para los momentos de desalineación corresponde a valores próximos a 1.

Se probaron diferentes rangos de aceptación de valores de diferencias entre fracciones de difusa. Si el rango era demasiado amplio se podría cometer el error de incluir momentos con desalineación. Si el rango era demasiado pequeño se estarían quitando momentos que, si bien no coincidían perfectamente con algún modelo, contienen información inherente a la manera en la que se midió la I_D (con aro sombreador). El valor crítico utilizado en este trabajo fue el comprendido en la franja de $\pm 0,1$ para las diferencias entre la fracción de difusa medida con las fracciones de difusa estimadas con Eng1, Eng2, BRL y BRL-BR. La elección del valor crítico fue empírica.

3 RESULTADOS

3.1 Base de datos medida completa

En la Fig. 4 se muestran los resultados encontrados al aplicar los modelos a la base completa de datos medidos. Dicha base abarca 261610 registros por cada variable medida (I_G e I_D). Estos valores corresponden a valores que cumplen las siguientes restricciones:

- 1) $I_G > 0 \text{ W/m}^2$
- 2) $\theta_z < 83^\circ$

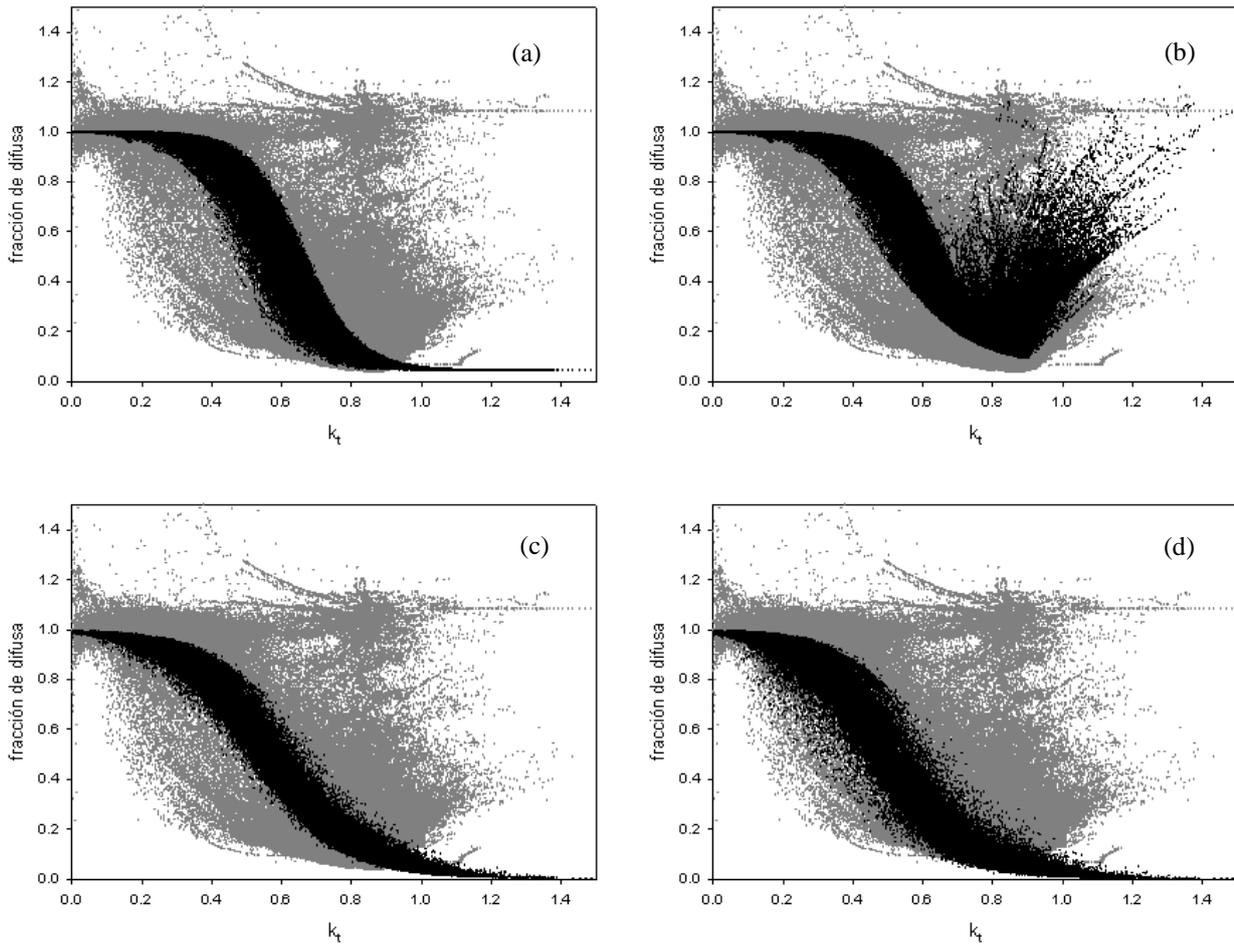


Figura 4 - Índice de claridad k_t vs fracción de difusa k_d . Los puntos grises corresponden a los valores medidos de la base de datos completa. Los puntos negros corresponden a los valores de I_D estimados usando los modelos de (a) Eng1, (b) Eng2, (c) BRL, (d) BRL-BR.

La base de datos medidos analizada incluye el error más común que tienen los valores de radiación solar difusa medidos con aro sombreador: desalineación. Aún así, la relación entre los valores de I_D medidos y los I_D estimados con Eng2 ofrecen una relación lineal donde $I_{D,Eng2} = 0,783 I_{D,med} + 62,23$ con un $R^2 = 0,7621$ (Fig. 5)

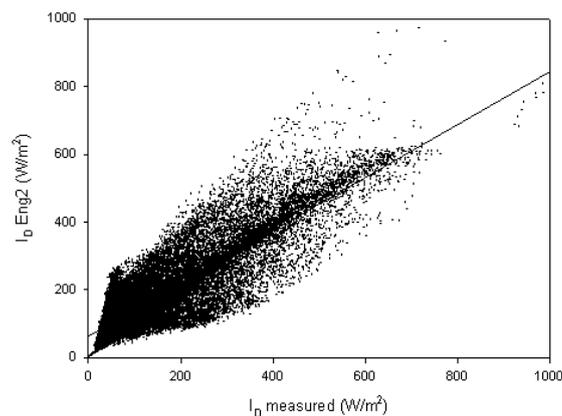


Figura 5 - Correlación entre I_D medida e I_D estimada por Eng2, para la base de datos sin filtrar.

3.2 Base de datos filtrada.

Los valores de I_D medidos que puedan haber sido influenciados por problemas de alineación del aro sombreador, debe detectarse y filtrarse. Se consideró que si un día presentaba más de un 30% de valores dentro del rango de ± 0.1 , dicho día se quitaba completamente de la base de datos. Este valor crítico surgió de la observación de los valores de I_D , I_G , $I_{G,CC}$ e I_0 .

En la Fig. 6 se muestran los resultados obtenidos luego de filtrar los valores de I_D medida tal que la diferencia de la fracción de difusa menos las estimadas usando los modelos Eng1, Eng2, BRL y BRL-BR esté dentro de una región ± 0.1 . Esta base filtrada posee ahora 135653 datos por cada variable medida (I_G e I_D) para Eng1 (52% de la base original), 122418 datos para Eng2 (47% de la base original), 133221 para BRL (51% de la base original) y 129131 datos para BRL-BR (49% de la base original).

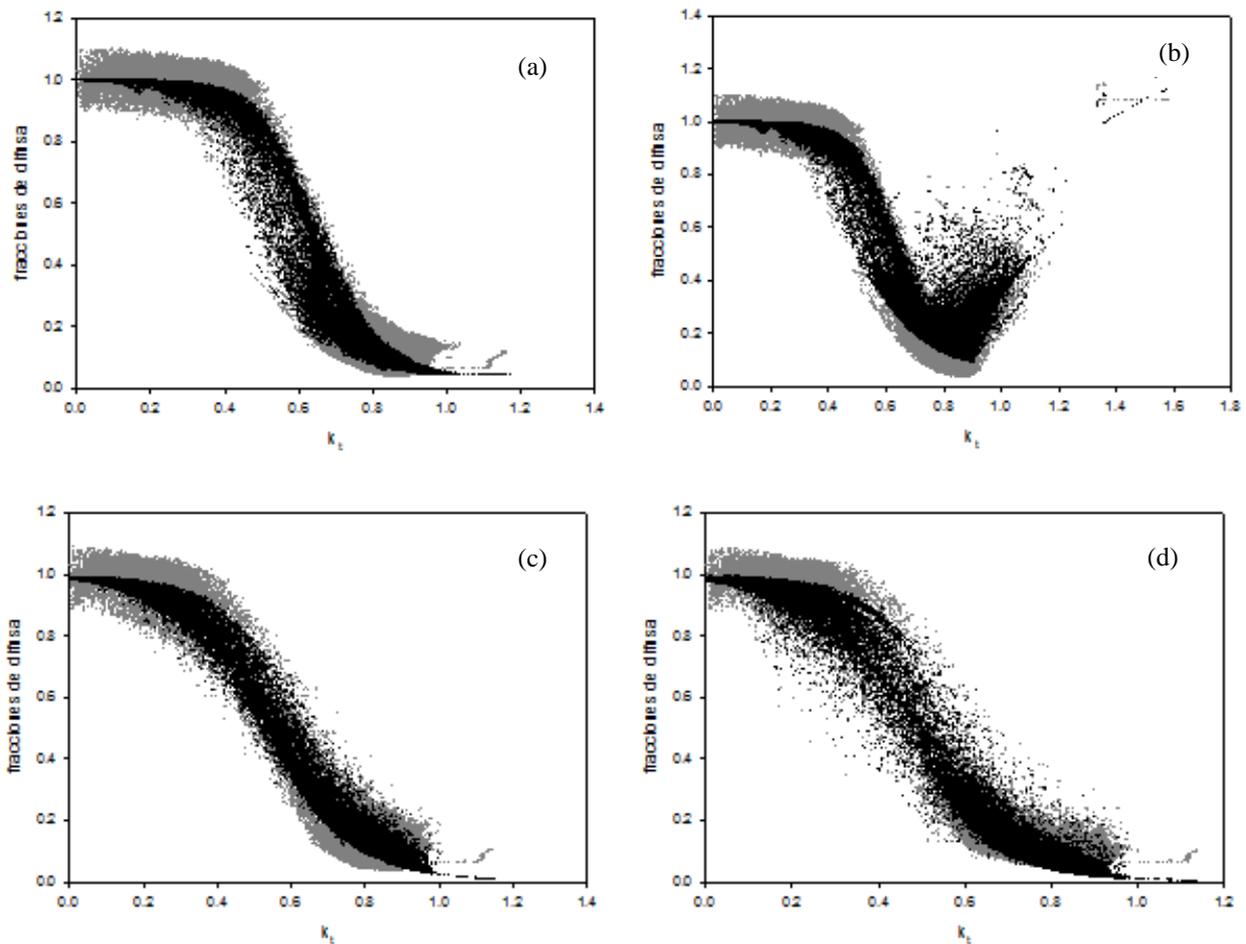


Figura 6 - Índice de claridad k_t vs fracción de difusa k_d . Los puntos grises corresponden a los valores medidos de la base de datos filtrada. Los puntos negros corresponden a los valores de I_D estimados usando los modelos de (a) Eng1, (b) Eng2, (c) BRL, (d) BRL-BR.

La relación entre los valores medidos de I_D y los estimados usando Eng2 es lineal, con una mejor correlación que en el caso de la base de datos sin filtrar. La ecuación lineal es $I_{D,Eng2} = 0,835 I_{D,med} + 49,21$ con un $R^2=0,8815$ (Fig. 7). Para los otros modelos no se buscó una correlación ya que los mismos no consideran los momentos de I_D con realce por nubes.

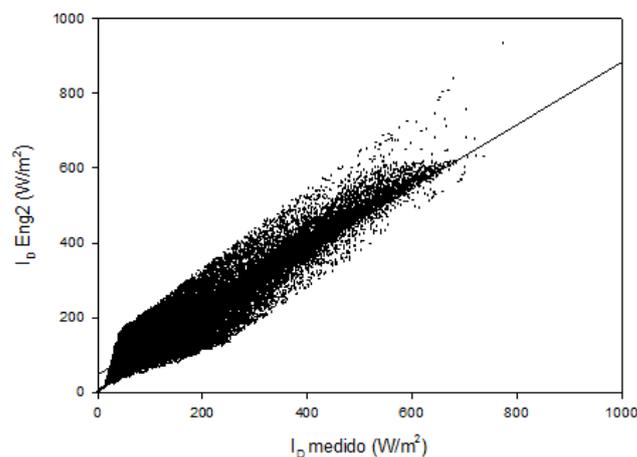


Figura 7 - Correlación entre la I_D medida y la I_D estimada usando el modelo Eng2, para la base de datos filtrada.

Para cuantificar el desempeño de los modelos se calcularon estadísticos como MBE (Mean Bias Error o Error de Desvío Medio) (Ec. 6), RMSE (Root Mean Square Error o Error Cuadrático Medio) (Ec. 7), MAPE (Mean Absolute Percentage Error o Error Porcentual Absoluto Medio) (Ec. 8) y R^2 (Ec. 9), cuyas definiciones se detallan a continuación:

$$MBE = \frac{1}{n\bar{O}} \sum_1^n (P_i - O_i) \tag{6}$$

$$RMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (P_i - O_i)^2} \tag{7}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \tag{8}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (O_i - P_i)^2}{\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{9}$$

donde O_i es un valor observado (o medido), P_i es su correspondiente valor estimado, n es la cantidad total de mediciones de I_D y \bar{O} es el promedio de los valores medidos. En la Tab. 4 se muestran los resultados para la base completa filtrada según cada modelo (Eng1, Eng2, BRL o BRL-BR) para $k_t \leq 1$ y $k_{d,m} \leq 1$, siguiendo la técnica de Engerer (2015):

Tabla 4 - Valores de los indicadores estadísticos MBE, RMSE, MAPE y R^2 para los datos de la base completa filtrada.

	Eng1	Eng2	BRL	BRL-BR
MBE	0.1948	0.2977	0.1735	-0.2071
RMSE	0.438	0.4579	0.4475	0.4141
MAPE	0.5754	0.6784	0.5198	0.3050
R^2	0.7994	0.7569	0.7478	0.7437

Estos valores parecen indicar una pobre performance de todos los modelos, especialmente Eng2, pero debe tenerse en cuenta que:

- i) Los valores $I_{D,m}$ utilizados son valores corregidos y no medidos directamente. Si bien el modelo de LeBaron es el que menores diferencias presenta contra valores muy precisos de $I_{D,m}$, no es absoluto y presenta cierto grado de error que se traduce en diferencias de los valores estimados (corregidos) con los reales.
- ii) El modelo de día de cielo claro REST2 muchas veces no coincide con un día de cielo claro medido, generando discrepancias en los índices k_t . Esta situación genera importantes desvíos entre el valor medido minutal de I_D con el valor minutal estimado por Eng2, ya que si la I_G medida es menor/mayor que la $I_{G,cc}$, la I_D medida será menor/mayor que la I_D estimada por Eng2. Así, el modelo de cielo claro a utilizar cobra importancia.
- iii) Los indicadores fueron calculados dentro de cada base filtrada para cada modelo (rango ± 0.1 de la diferencia entre I_D medido y estimado). En la Tab. 5 se muestran los resultados calculando los indicadores sobre los datos de entrada que quedan para el caso filtrado de Eng2, aplicado a los demás modelos (Eng1, BRL y BRL-BR).

Tabla 5 - Valores de los indicadores estadísticos MBE, RMSE, MAPE y R^2 para los datos de la base filtrada de Eng2, usando los datos de entrada de esa base para simular la irradiancia difusa con los otros modelos.

	Eng1	Eng2	BRL	BRL-BR
MBE	0.0371	0.3341	-0.0345	-0.4198
RMSE	0.657	0.600	0.6318	0.7670
MAPE	0.6736	0.8514	0.5723	0.3807
R^2	0.5361	0.6662	0.5705	0.3401

El modelo Eng1 subestima para ciertos rangos de θ_z y sobrestima para otros, tal como puede verse en la Fig. 8. Lo mismo hace BRL. Eng2 en cambio sobrestima para todos los rangos de θ_z , mientras que BRL-BR subestima en todos ellos. El valor del R^2 muestra una mejor correlación para los valores de Eng2, al igual que el RMSE. El valor de la MAPE también refleja la sobrestimación del modelo Eng2.

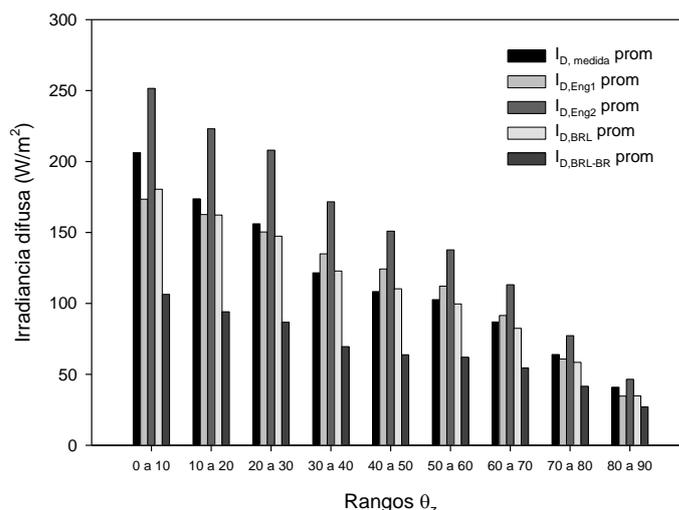


Figura 8 - Valores promedio de irradiancia difusa medida y estimada según cada modelo, para rangos de ángulo cenital de tamaño 10°.

Comparándose los resultados por rangos de θ_z en la Fig. 8, se nota que para valores bajos de θ_z , los valores calculados con los modelos distancian se más de valor medido, los que más se aproximan son los modelos de Eng1 y BRL. El modelo Eng2 sobrestima los valores y el BRL-BR subestima. Para valores de θ_z mayores, las diferencias entre los modelos son menores.

Solo el modelo Eng2 simula correctamente los valores de k_d para $k_t > 0.8$ (Fig. 6), por lo que es el más representativo de los cuatro modelos analizados. Resta seguir desarrollando la metodología para la detección de los valores medidos minutales de I_D que no estén influenciados por desalineaciones de la banda sombreadora, y de los valores de $I_{G,cc}$.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado valores medidos de irradiancia solar global y difusa, obtenida con aro sombreador, medidas con una frecuencia de 1-minuto durante tres años incompletos (2006 a 2007) en la ciudad de La Quiaca (Argentina), que es un sitio ubicado a más 3000 metros de altura sobre el nivel del mar.

Se ha procedido a estimar los valores de irradiancia solar difusa a través de 4 modelos (Eng1, Eng2, BRL y BRL-BR) estimados utilizando los datos de irradiancia solar global y las estimaciones del modelo de radiación solar de día claro REST2.

Calculando la diferencia de los índices de difusa medido y estimado para cada modelo, se ha optado por filtrar los que exceden el rango ± 0.1 , quitándose así los datos que corresponden a momentos de desalineación del aro sombreador. El modelo Eng2 es el único que considera los momentos de realce de la irradiancia solar por nubes, siendo el más próximo a la realidad. El modelo Eng2 sobrestima homogéneamente los valores simulados, mientras que Eng1 y BRL no subestiman o sobrestiman dependiendo del ángulo cenital. BRL-BR subestima homogéneamente.

Así la diferencia entre un valor I_D estimado por Eng2 respecto de uno I_D medido es aproximadamente 50 W/m^2 , aunque deben analizarse si el origen de la diferencia está en los parámetros del modelo o en la técnica utilizada para estimar la I_D medida.

REFERENCIAS

- Ridley B, Boland J, Lauret P, 2010. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors, *Renewable Energy* 35, pp 478-483.
- Lemos L, Starke A, Boland J, Cardemil J, Machado R, Colle S, 2017. Assessment of solar radiation components in Brazil using the BRLmodel. *Renewable Energy* 108, pp 569-580.
- Engerer NA, 2015. Minute resolution estimates of the diffuse fraction of global irradiance for southeastern Australia. *Solar Energy* 116, pp 215–237.
- Gueymard C., 2008. REST2: high-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance and photosynthetically active radiation: validation with a benchmark dataset. *Solar Energy* 82 (3), pp 272–285.
- <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
- https://en.wikiversity.org/wiki/Cubic_Spline_Interpolation
- Drummond AJ, 1956. On the measurement of sky radiation, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., Ser. B*, 7, 413–436.
- Steven MD, 1984. The anisotropy of diffuse solar radiation determined from shade-ring measurements, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 110, 261–270

- LeBaron BA, Michalsky JJ, Perez R, 1990. A simple procedure for correcting shadow band data for all sky conditions, Solar Energy 44, pp.249–256
- Batlles FJ, Olmo FJ, Alados-Arboleda L, 1995. On shadow band correction methods for diffuse irradiance measurements. Solar Energy 54, pp.105–114.
- Muneer T, Zhang X, 2002. A new method for correcting shadow band diffuse irradiance data. J. Sol. Energy Eng. 124, pp. 34–43.
- Sánchez G, Serrano A, Cancillo ML, García JA, 2012. Comparison of shadow-ring correction models for diffuse solar irradiance. J. Geophys. Res. 117, pp 1-8.
- Orgill J, Hollands K, 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy 19, pp 357 a 359.
- Erbs DG, Klein SA, Duffie JA, 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. Solar Energy 28, pp. 293-302.
- Reindl DT, Beckmann WA, Duffie J, 1990. Diffuse fraction correlation. Solar Energy 45(1), pp 1-7.
- Boland J, Huang J, Ridley B, 2013. Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28, pp. 749–756.
- Gueymard C, Ruiz Arias J, 2016. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. Solar Energy 128, pp 1-30.
- Boland J, Scott L, Luther M, 2001. Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. Envirometrics 12(2), pp 103-116.
- Boland J, Ridley B, Brown B, 2008. Models of diffuse solar radiation. Renewable Energy 33(4), pp 575-584.

ANALYSIS OF DIFFUSED IRRADIANCE VALUES MEASURED AND ESTIMATED USING BRL AND ENGERER MODELS. CASE STUDY: LA QUIACA (ARGENTINA)

Abstract. *In this work we carried out the analysis of values of diffused solar irradiance that was measured by shading a pyranometer with a ring, in the city of La Quiaca (Argentina) whose altitude is 3000 meters above sea level. The measured data have a frequency and cover 3 incomplete years. The method used to correct the measured values was LeBaron. These values are compared against the estimates obtained using the BRL, BRL-Brazil, Engerer1 and Engerer2 models. A way of detecting moments of misalignment of the ring with respect to the diffuse sensor was tested. Comparing them against the measured values, the models overestimate the diffuse irradiance, except for BRL-BR. This study promises interesting results in terms of quality analysis of diffuse data, as well as validation 1-minute irradiance diffuse models for the Northwest region of Argentina.*

Key words: *Diffuse irradiance, Boland, Engerer, La Quiaca.*