

EVALUACIÓN DE SEIS MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMAR ALBEDO DEL SUELO EN LA PAMPA HÚMEDA

Juan M. Rodríguez Muñoz¹, Rodrigo Alonso-Suárez², Italo Bove², Gonzalo Abal^{1,2}

¹Laboratorio de Energía Solar, Departamento de Física del Litoral, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Cno. Luis B. Berres, km 508, CP 50000, Salto, Uruguay.

²Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Herrera y Reissig 565, CP 11300, Montevideo, Uruguay.

E-mail: jrodrigue@fing.edu.uy

RESUMEN: Modelar el albedo de suelo es requerido para estimar en forma precisa la radiación que éste refleja, necesaria para los modelos de transposición de irradiancia solar a plano inclinado. Esta componente, de menor incidencia en aplicaciones y suelos comunes, adquiere mayor relevancia en el contexto de la aparición de los paneles fotovoltaicos bifaciales. En este trabajo se ajustan y evalúan seis modelos de albedo utilizando medidas registradas en un predio experimental cuyo suelo y clima es representativo de la Pampa Húmeda sudamericana. Se consideran modelos de tres tipos; constantes, univariados (en función del ángulo cenital) y bivariados (que adicionan la fracción difusa). Los modelos bivariados son de mejor desempeño, superando en términos de rRMSD a los univariados en 16 % y a los constantes en 58 %. Los modelos bivariado y univariado de Tuomiranta et al. (2021) son los recomendados, y el uso de uno u otro depende de la disponibilidad de medidas de irradiancia difusa.

Palabras clave: reflectividad del suelo, irradiancia solar reflejada, panel solar bifacial.

INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de aplicaciones de energía solar requiere estimar la irradiancia solar global sobre superficies de orientación arbitraria. Ésta puede separarse en tres componentes: directa, difusa proveniente de la bóveda celeste y difusa reflejada por superficies cercanas. Para esta última componente los modelos clásicos consideran únicamente la reflexión del suelo, supuesto un reflector difuso hemisférico isotrópico y caracterizado por un albedo constante, ρ_g . Esta hipótesis no introduce un error significativo en tanto la componente reflejada por el suelo represente una pequeña fracción del total incidente sobre la superficie, lo cual se verifica en la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, esto no se cumple en el caso de los paneles fotovoltaicos bifaciales. Estos dispositivos son capaces de generar anualmente hasta un 15 % más de energía comparados con paneles fotovoltaicos convencionales en suelos de albedo típico ($\rho_g \simeq 0.22$) y hasta un 30 % más en suelos altamente reflectivos (Yusufoglu et al., 2014). La capacidad instalada de esta tecnología está aumentando, y se espera que la misma pase a tener un rol dominante en el mercado en el futuro cercano (Kopecek y Libal, 2021). Esto ha motivado el estudio de modelos de albedo más sofisticados que consideren el efecto de la geometría solar, la nubosidad y las características del terreno circundante.

Existen diversos modelos de albedo en la literatura, los cuales se pueden agrupar en tres categorías de complejidad creciente. La primera categoría la integran los modelos que asumen el suelo como un reflector difuso hemisférico isotrópico con albedo constante. Estos modelos se diferencian por el criterio utilizado para asignar este valor constante (Liu y Jordan, 1960; Gueymard, 1987; Psiloglou y Kambezidis, 2009). Los modelos en la segunda y tercera categorías introducen cierto comportamiento especular

en la reflexión de la irradiancia solar sobre el suelo. Los modelos de la segunda categoría consideran al albedo como una función univariada del ángulo cenital (Nkemdirim, 1972; Temps y Coulson, 1977; Dickinson, 1983; Psiloglou y Kambezidis, 2009; Tuomiranta et al., 2021) y los de la tercera categoría agregan una dependencia en la fracción difusa (Temps y Coulson, 1977; Gueymard, 1987; Gardner y Nadeau, 1988; Ineichen et al., 1990; Chiodetti et al., 2016; Tuomiranta et al., 2021). Estos últimos modelos requieren medidas de irradiancia global y difusa en plano horizontal, en tanto los de las otras categorías solo requieren de la irradiancia global y son por lo tanto de implementación más sencilla.

El desempeño comparado de varios de estos modelos en diferentes tipos de suelos y regiones climáticas ha sido analizado previamente en la literatura (Ineichen et al., 1990; Psiloglou y Kambezidis, 2009; Tuomiranta et al., 2021). Los primeros estudios recomendaban el uso de un albedo constante y localmente medido (Ineichen et al., 1990). En consecuencia, el uso de un albedo constante elegido según las características del terreno ha sido históricamente la práctica más habitual para estimar la componente reflejada de la irradiancia solar sobre una superficie inclinada. Sin embargo, el trabajo más reciente sugiere otra situación. En Tuomiranta et al. (2021) se comparan 26 modelos de albedo en 26 sitios que abarcan diversos tipos de suelo. Los modelos resultan ordenados de menor a mayor desempeño según su grado de complejidad. En general, se reportan ventajas significativas en el uso de modelos bivariados y, en menor medida, también con los univariados. Además, se alerta sobre los potenciales errores debidos a la utilización de valores constantes de albedo provenientes de bases de datos y se destaca la importancia de la adaptación local de los modelos. En todos los casos es importante el ajuste de los modelos a las condiciones locales típicas. Esto motiva la realización de mediciones in-situ de albedo para determinar que modelo se adapta mejor a las características típicas de la Pampa Húmeda, tanto de suelo como de clima.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el desempeño de seis modelos pre-existentes para estimar el albedo de un suelo cubierto mayormente por gramíneas (pasto natural) en un punto representativo de la Pampa Húmeda (Salto, Uruguay). Se determina el modelo de mejor desempeño a nivel local, desde una perspectiva general, así como también por categoría. Los seis modelos analizados son seleccionados tomando los dos de mejor desempeño en las tres categorías consideradas por Tuomiranta et al. (2021), considerando únicamente los suelos de tipo vegetal. Los coeficientes de estos modelos fueron determinados por muestro aleatorio y validación cruzada utilizando 8 meses de medidas de albedo con calidad controlada que fueron registradas en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República (<http://les.edu.uy/>). Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección siguiente se describen los modelos considerados, el conjunto de datos utilizado, el control de calidad y los indicadores de desempeño utilizados para comparar el desempeño de los modelos. Posteriormente, se presentan y analizan los resultados. Finalmente, en la última sección se sintetizan las principales conclusiones.

METODOLOGÍA

Modelos de albedo

El albedo o reflectancia de una superficie es la fracción de la irradiancia solar global que es reflejada por la misma. El albedo del suelo, supuesto horizontal, se define como,

$$\rho_g = \frac{G_g}{G_h}, \quad (1)$$

donde G_g es la irradiancia reflejada por el suelo (hacia todo el hemisferio) y G_h es la irradiancia solar global sobre un plano horizontal. Este parámetro depende de diversos factores: altura solar, nubosidad, cambios debido al clima local o a la acción propia del hombre (por ejemplo, cambios en el terreno circundante o la altura del pasto debido tareas de mantenimiento). El modelo más simple consiste en asumir un valor constante e independiente de las variables antes mencionadas que caracterice al suelo como un reflector difuso hemisférico isotrópico. El albedo puede obtenerse utilizando valores genéricos para el tipo de suelo provenientes de bases de datos (Liu y Jordan, 1960; Gueymard, 1987) o se puede estimar a partir de medidas experimentales, que es lo recomendado (Ineichen et al., 1990; Tuomiranta et al., 2021).

En este trabajo se obtiene el albedo constante considerando dos tipos de estimativos: la media aritmética y la media geométrica de las medidas de albedo (modelos 1 y 2, respectivamente),

$$\text{modelo 1 : } \rho_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i, \quad (2)$$

$$\text{modelo 2 : } \rho_g = \left(\prod_{i=1}^n \rho_i \right)^{1/n}, \quad (3)$$

donde ρ_i representa la i -ésima medida de albedo en n medidas. Estos modelos, sin parámetros ajustables, integran la categoría I, y son considerados en Psiloglou y Kambezidis (2009) y Tuomiranta et al. (2021).

Los modelos 3 y 4 de este trabajo corresponden a los propuestos por Nkemdirim (1972) y Tuomiranta et al. (2021), respectivamente, los cuales se muestran en las Ecs. (4) y (5).

$$\text{modelo 3 : } \rho_g = \rho_n \times e^{b_1 \theta_z}, \quad (4)$$

$$\text{modelo 4 : } \rho_g = \rho_n \times \frac{1 + b_1}{1 + b_1 \cos \theta_z}. \quad (5)$$

Ambos modelos utilizan funciones univariadas dependientes del ángulo cenital, θ_z , y tienen dos parámetros ajustables: ρ_n y b_1 . El primero de estos parámetros corresponde al albedo en incidencia normal ($\theta_z = 0^\circ$), y el segundo controla la variación del albedo con el ángulo cenital. El modelo 4 se basa en el trabajo previo de Dickinson (1983) e implica la restricción: $b_1 \in [0, 2]$, lo cual indica que el albedo es una función creciente con el ángulo cenital. Estos dos modelos integran la categoría II.

El quinto modelo es una extensión del cuarto (Tuomiranta et al., 2021) con tres parámetros ajustables y depende de la nubosidad a través de la fracción difusa f_d (el cociente entre la irradiancia solar difusa y la irradiancia solar global, ambas sobre plano horizontal), utilizada para tratar las reflexiones de la irradiancia solar directa y difusa por separado,

$$\text{modelo 5 : } \rho_g = (1 - f_d) \times \rho_{bn} \times \frac{1 + b_1}{1 + b_1 \cos \theta_z} + f_d \times \rho_d, \quad (6)$$

donde ρ_{bn} , b_1 y ρ_d son los parámetros ajustables. Los parámetros ρ_{bn} y ρ_d son el albedo para la irradiancia solar directa en incidencia normal y difusa, respectivamente. Se mantiene la restricción $b_1 \in [0, 2]$ y se agrega además la condición $\rho_{bn} \leq \rho_d$. El modelo es de categoría III.

El sexto y último modelo está basado en Gueymard (1987), desarrollado en el contexto de modelos de transposición a plano inclinado, y por tanto no directamente aplicable al caso de superficies horizontales. Al igual que el anterior este modelo es una función del ángulo cenital y la fracción difusa, y Tuomiranta et al. (2021) utilizó una versión de este modelo con seis parámetros de ajuste (ρ_n , b'_1 , b'_2 , b'_3 , f_{af} y f_{ab}),

$$\rho_g = (1 - f_d) \times \left[\rho_n + f_{af} e^{b'_1 + b'_2 \theta_z + b'_3 \theta_z^2} \right] + f_d \times [\rho_n + 0.023 (f_{af} + f_{ab})]. \quad (7)$$

El parámetro ρ_n representa el albedo en incidencia normal en condiciones de isotropía pura. Mayor detalle en relación a la definición de esta magnitud puede encontrarse en Gueymard (1987). Los parámetros b'_1 , b'_2 , b'_3 describen las variaciones del albedo con el ángulo cenital, y los parámetros f_{af} y f_{ab} describen la magnitud de las reflexiones anteriores y posteriores, respectivamente. Gueymard (1987) siguiere la utilización de $f_{af} = f_{ab} = 1$ para pasto verde, asociado a una terna específica de parámetros b'_1 , b'_2 , b'_3 . En este trabajo se opta por simplificar la expresión anterior al mínimo número de parámetros necesarios para su ajuste, quedando de la forma:

$$\text{modelo 6 : } \rho_g = (1 - f_d) \times \left[\rho_n + e^{b_1 + b_2 \theta_z + b_3 \theta_z^2} \right] + f_d \times \rho_d. \quad (8)$$

Con,

$$b_1 = b'_1 + \ln(f_{af}), \quad b_2 = b'_2, \quad b_3 = b'_3, \quad \rho_d = \rho_n + 0.023 (f_{af} + f_{ab}).$$

El modelo 6 escrito de esta manera tiene una expresión más sencilla que la Ec. (7), una nomenclatura más homogénea con respecto a la de los modelos anteriores y está mejor condicionado para el ajuste matemático de sus coeficientes. El modelo 6 tiene entonces cinco parámetros, ρ_n , b_1 , b_2 , b_3 y ρ_d , es bivariado y por lo tanto de categoría III.

Datos utilizado y control de calidad

Las medidas utilizadas en este trabajo se realizaron en el Laboratorio de Energía Solar (LES) en un entorno semi rural cerca de la ciudad de Salto, Uruguay (Latitud = 31.28 °S, Longitud=57.92 °W, Altura = 60 m snm). El LES se ubica en la región climática de la Pampa Húmeda, la cual está clasificada como Cfa (clima templado-cálido, húmedo, con veranos calurosos) según la clasificación actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). El conjunto de medidas tiene una extensión temporal de aproximadamente ocho meses, desde Agosto de 2021 hasta Marzo 2022, e incluye las siguientes magnitudes: irradiancia solar global en plano horizontal, G_h , irradiancia solar reflejada por el suelo, G_g , irradiancia solar difusa en plano horizontal, G_d , e irradiancia solar en incidencia normal, G_b .

La medida experimental del albedo del suelo, cubierto por pasto natural verde en su gran mayoría, se estimó utilizando la Eq. (1) con las medidas G_g y G_h . Estas medidas se realizaron con piranómetros Kipp & Zonen CMP6 a una altura de 1.6 m respecto al nivel suelo en un soporte especial mostrado en la Fig. 1a. La medida de difusa, utilizada para calcular la fracción difusa $f_d = G_d/G_h$, se realiza con un piranómetro Kipp & Zonen CMP10 ventilado y con el sensor sombreado por una esfera de sombra montada en un sistema de seguimiento de precisión SOLYS2 de Kipp & Zonen (Fig. 1b) equipado con sensor de ajuste fino, equipo que se encuentra a aproximadamente 30 m de las medidas anteriores. La medida de directa en incidencia normal se realizó con un pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1 montado sobre el mismo sistema de seguimiento. Esta última medida se utiliza únicamente para los controles de calidad. Todos los piranómetros reciben mantenimiento diario y son calibrados con frecuencia bienal con el estándar secundario del LES, con trazabilidad técnica al patrón primario mundial. Los datos fueron registrados a intervalos de un minuto y fueron integrados a 10 minutos. Se trabajó con esta escala temporal para atenuar el efecto de la separación espacial entre las medidas de albedo y las del SOLYS2, así como también el efecto de fenómenos rápidos de sobre-irradiación asociados a configuraciones particulares de nubes (Russo et al., 2021).



(a) Medida de albedo, G_h y G_g .



(b) Sistema SOLYS2, G_d y G_b .

Figura 1: Montaje de los instrumentos de medida.

El conjunto de datos diurnos ($N = 17041$) fue sometido a una serie de filtros de control de calidad basados en las recomendaciones de la Baseline Solar Radiation Network (BSRN; McArthur (2005)). El procedimiento de control de calidad se resume en la Tabla 1 y la Fig. 2. Los cuatro primeros filtros (F1 a F4) imponen límites inferiores y superiores a las medidas de irradiancia solar, G , de la siguiente manera

$$b \leq G \leq G_{sc} p (\cos \theta_z)^a + c, \quad (9)$$

donde G representa cada componente de la irradiancia solar, G_{sc} corresponde a la constante solar y los parámetros p , a , b y c fueron determinados localmente para cada filtro por inspección visual de las variables correspondientes. El filtro F5 impone un límite inferior para la altura solar, $\alpha_s > 10^\circ$, lo que descarta las medidas afectadas por errores direccionales significativos (bajas alturas solares). El filtro F6 verifica que G_h , G_d y G_b cumplan la relación de clausura,

$$G_h = G_b \cos \theta_z + G_d, \quad (10)$$

con una tolerancia del 8 % del promedio de G_h . Este filtro se aplica únicamente a las medidas que verifiquen $G_h > 50 \text{ W/m}^2$. El filtro F7 es una cota superior sobre la fracción difusa de modo que $f_d \leq 1.03$, estableciendo una tolerancia del 3 %. El filtro F8 retira los puntos de bajo índice de claridad, $k_t = G_h/G_{h0}$, donde G_{h0} es la irradiancia solar extraterrestre sobre plano horizontal, y baja fracción difusa f_d , asociados mayormente a condiciones de cielo cubierto y baja irradiancia. F9 impone un límite superior holgado para el índice de claridad, $k_t < 1$. F10 verifica la consistencia en las medidas de albedo $0 \leq \rho_g \leq 1$. El filtro F11 retira los datos comprendidos entre el 17 y el 30 de enero de 2022, los cuales se identificaron como datos anormales mediante inspección visual de la serie temporal de las medidas de albedo, probablemente debido a la presencia de pasto muy alto. Finalmente, el filtro F12 consiste en un filtro estadístico, donde para diferentes intervalos del ángulo cenital se eliminan los datos que no cumplen $|\rho_g - \bar{\rho}_g| \leq 3\sigma$, siendo $\bar{\rho}_g$ y σ el promedio y la desviación estándar de las medidas de albedo del intervalo correspondiente. Este filtro se aplicó en forma independiente en intervalos de 10° del ángulo cenital y para el cálculo de $\bar{\rho}_g$ y σ se aplicaron los filtros de F1 a F11 en forma previa. Después de este procedimiento de filtrado se descartaron aproximadamente 1/3 de los datos originales, siendo 13 % el descarte geométrico por altura solar (F5). La Tabla 1 muestra las condiciones de cada filtro, las variables que afecta, el número de datos que lo pasan y el porcentaje de descarte. La última fila de esta tabla resume el proceso dando los indicadores de todos los filtros. La Fig. 2a muestra el proceso de filtrado en un diagrama f_d vs k_t y la Fig. 2b muestra el resultado del filtrado en las medidas de albedo. Finalmente, se obtienen 11470 datos a escala 10-minutal que pasan todos los filtros. Este conjunto de datos es el utilizado para entrenar y evaluar los modelos de acuerdo a la metodología que se explica en la siguiente sección.

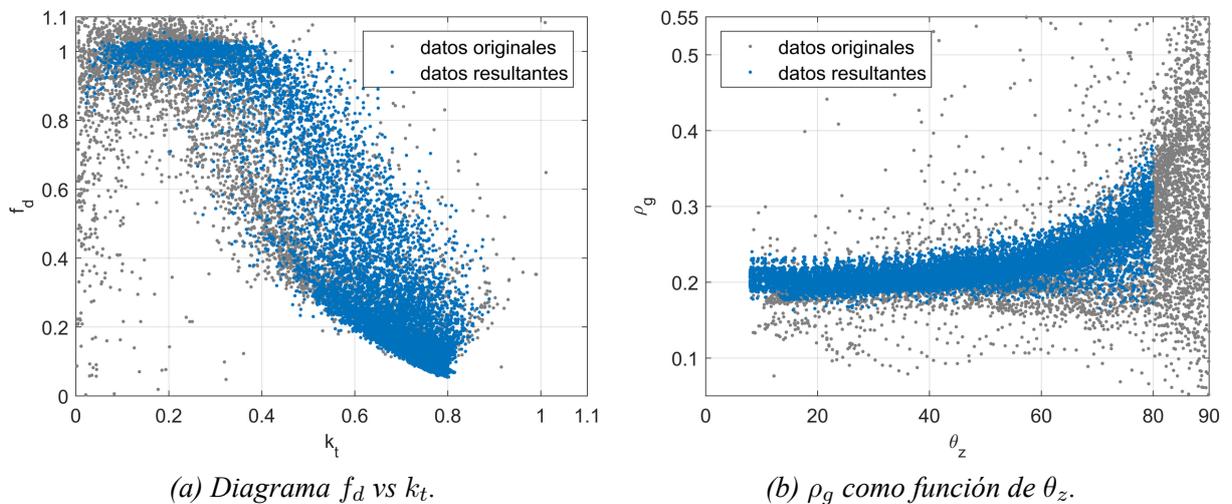


Figura 2: Resultado del procedimiento de filtrado; datos originales en gris y datos resultantes del procedimiento de filtrado en azul (aquellos que pasan todos los filtros).

Tabla 1: Detalle del proceso de filtrado aplicado a las medidas diurnas.

Filtro	condición	variables	salida	% descartados
F1	Ec. (9)	G_h	16769	1.6
F2	Ec. (9)	G_d	15981	6.2
F3	Ec. (9)	G_b	16759	1.7
F4	Ec. (9)	G_g	15789	7.4
F5	$\alpha_s > 10^\circ$	todas	14800	13.2
F6	Ec. (10)	G_h, G_d, G_b	16213	4.9
F7	$f_d < 1.03$	G_h, G_d	16299	4.3
F8	$k_t < 0.20 \ \& \ f_d < 0.80$	G_h, G_d	16716	1.9
F9	$k_t < 1$	G_h	16974	0.4
F10	$0 \leq \rho_g \leq 1$	G_g, G_h	16910	0.8
F11	17/01/22-31/01/22	todas	15084	11.5
F12	$ \rho_g - \bar{\rho}_g \leq 3\sigma$	G_g, G_h	14003	17.9
todos	–	todas	11470	32.7

Indicadores de desempeño

Con el conjunto de datos resultante se ajustaron los coeficientes de los modelos descritos anteriormente. Para los modelos 1 y 2 simplemente se calculó la media aritmética, Ec. (2), y la media geométrica, Ec. (3), del conjunto de medidas de albedo, respectivamente. Para los modelos del 3 al 6 se implementaron algoritmos de regresión (lineal o no lineal según las características de cada modelo) que minimizan el error cuadrático medio, sin imponer ninguna restricción en la optimización.

Los coeficientes de los modelos y los indicadores de desempeño se determinaron mediante muestreo aleatorio y validación cruzada utilizando 60 % de los datos para entrenamiento y 40 % para validación. El esquema 60/40 se repitió 1000 veces para asegurar repetibilidad de los resultados, tomándose como resultado final el promedio de los coeficientes y los indicadores.

El desempeño de los modelos se evaluó mediante tres indicadores: el desvío medio (MBD), el desvío cuadrático medio (RMSD) y la integral de Kolmogorov-Smirnov (KSI), los cuales se definen de la siguiente manera,

$$\text{MBD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i), \quad \text{RMSD} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{KSI} = \int_0^1 |\hat{F}(y) - F(y)| dy, \quad (11)$$

donde y_i corresponde al valor de referencia (medida de albedo), \hat{y}_i corresponde al estimativo del modelo, y F y \hat{F} corresponden a las distribuciones de probabilidad acumulada de y_i e \hat{y}_i , respectivamente. Estas

métricas tienen las mismas unidades que la magnitud y_i , es decir, adimensionadas en el caso del albedo. Las mismas pueden ser expresadas en forma relativa (rMBD, rRMSD y rKSI) como porcentaje del valor medio de las medidas, $\bar{\rho}_g$. Los tres indicadores dan información diferente sobre la concordancia entre los modelos y las medidas. El MBD es el sesgo medio de los estimativos, el RMSD es una medida de la dispersión de los desvíos de los estimativos y el KSI una medida de la distancia estadística entre las distribuciones acumuladas de medidas y estimativos.

Es útil definir un indicador que combine los tres indicadores en uno solo (Combined Performance Indicator - CPI),

$$CPI = \frac{1}{3} (|rMBD| + rRMSD + rKSI) . \quad (12)$$

Un indicador global similar ha sido propuesto en Gueymard (2014). Este conjunto de indicadores ha sido utilizado exitosamente en la evaluación de modelos empíricos de fracción difusa (Abal et al., 2017) y en la evaluación de factores de corrección para medidas de irradiancia solar difusa con banda de sombra (Rodríguez-Muñoz et al., 2021).

RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran los parámetros ajustados localmente de los modelos. Los valores que se muestran en esta tabla corresponden a los promedios de las 1000 ejecuciones del procedimiento de muestro y validación cruzada. También se calcularon las desviaciones estándar de los parámetros, las que resultaron ser al menos 30 veces menor que los promedios, lo cual da cuenta de la robustez de los modelos y del método de ajuste. Los parámetros de los modelos de Tuomiranta et al. (2021) verifican las restricciones $b_1 \in [0, 2]$ y $\rho_{bn} \leq \rho_d$, por lo que se entiende que no es necesario imponer estas restricciones en el procedimiento de ajuste de parámetros.

Tabla 2: Parámetros de los modelos ajustados localmente. Los valores que se muestran corresponden a los promedios de las 1000 ejecuciones del procedimiento de muestro y validación cruzada.

Modelo	Parámetros				
	ρ_n ó ρ_{bn}	b_1	b_2	b_3	ρ_d
#1 Media aritmética	0.2209	-	-	-	-
#2 Media geométrica	0.2192	-	-	-	-
#3 Nkemdirim (1972)	0.1776	0.0046	-	-	-
#4 Tuomiranta et al. (2021)	0.1907	0.6014	-	-	-
#5 Tuomiranta et al. (2021)	0.1835	1.0269	-	-	0.2148
#6 Gueymard (1987)	0.1673	-3.2764	-0.0202	0.0005	0.2146

En la Tabla 3 se muestran los indicadores de desempeño para los seis modelos, como porcentaje del valor medio de las medidas de albedo, $\bar{\rho}_g = 0.2209$. En general todos los modelos presentan un sesgo medio cercano a cero ($< 1\%$). El ordenamiento de los modelos que resulta del rRMSD (de peor a mejor desempeño) es del 1 al 6, y está de acuerdo a su grado de complejidad. El rKSI ordena los modelos de la siguiente manera: 1, 2, 3, 6, 4 y 5, y el CPI de la forma: 1, 2, 3, 4, 6 y 5. En general, se puede ver que el desempeño de los modelos se ordena de menor a mayor según el grado de complejidad de los mismos, es decir, los modelos bivariados son los de mejor desempeño (modelos 5 y 6), seguidos por los univariados

(3 y 4), y por último los modelos constantes (1 y 2), lo que se encuentra en concordancia con el trabajo previo de Tuomiranta et al. (2021). El modelo de mayor desempeño de la categoría III de acuerdo al CPI es el 5 (Tuomiranta et al., 2021), seguido muy cerca por el 6 (Gueymard, 1987). El modelo 6 presenta el menor rRMSD, sin embargo, la mejora en este indicador no logra compensar la diferencia en el rKSI (similitud estadística de las distribuciones). El modelo 5 posee indicadores que son mayores en un 16 % a los de la categoría II, y un 58 % a los de la categoría I. El modelo de mayor desempeño de la categoría II es el 4, siendo sensiblemente mejor que el 3 (la diferencia en el CPI es del orden del 20 %). El mejor modelo de la categoría I corresponde a la media aritmética, pero la diferencia con la media geométrica es menor al 3 %.

Tabla 3: Indicadores de desempeño para los seis modelos de albedo, expresados en forma porcentual respecto al valor medio de las medidas, $\bar{\rho}_g = 0.2209$.

Modelo	Indicadores de desempeño (%)			
	rMBD	rRMSD	rKSI	CPI
#1 Media aritmética	0.0	13.2	9.9	7.7
#2 Media geométrica	-0.8	13.2	9.7	7.9
#3 Nkemdirim (1972)	-0.4	9.0	3.4	4.3
#4 Tuomiranta et al. (2021)	0.0	8.2	1.9	3.4
#5 Tuomiranta et al. (2021)	0.0	7.9	1.5	3.1
#6 Gueymard (1987)	0.0	7.3	2.2	3.2

Los parámetros y los indicadores del modelo 6 que se muestran en las Tablas 2 y 3 corresponden a su versión simplificada, Ec. (8). También se implementó la versión de 6 parámetros de este modelo, Ec. (7), pero se encontró inestabilidad en la convergencia de los algoritmos de optimización, obteniéndose por tanto una alta dispersión en los coeficientes al ejecutar 1000 veces el procedimiento de ajuste. Además, los indicadores de desempeño no variaban significativamente respecto a la versión utilizada del modelo 6. Por lo tanto, se concluye que el modelo simplificado de 5 parámetros es una mejor alternativa para su ajuste local que la adaptación original de Tuomiranta et al. (2021), en tanto es más sencillo, robusto (menor variabilidad en los parámetros) y posee los mismos indicadores de desempeño.

En la Fig. 3 se muestra la comparativa de las medidas de albedo contra los estimativos de los modelos, en diagramas ρ_g vs θ_z . No hay diferencias significativas entre los modelos 1 y 2 (Fig. 3a, ya que la diferencia entre la media aritmética y geométrica es menor al 1 %). Los modelos 3 y 4 (Fig. 3b) logran describir el comportamiento creciente del albedo con el ángulo cenital en forma general, pero no captan la dispersión de los datos debido a las variaciones en las condiciones de nubosidad. Los modelos 5 y 6 (Fig. 3c y Fig. 3d) logran captar ambos comportamientos; dependencia del ángulo cenital y condiciones de nubosidad, lo que se encuentra en consonancia con los bajos valores de los indicadores de desempeño de estos modelos.

Complementado en análisis anterior, en la Fig. 4 se muestra el rMBD y el rRMSD del mejor modelo de cada categoría (modelos 1, 4 y 5) discriminado por el coseno del ángulo cenital ($\cos \theta_z$) y el índice de claridad. El índice de claridad está correlacionado con la fracción difusa (ver Fig. 2a) y permite distinguir entre las distintas condiciones de cielo. En este sentido, se pueden distinguir tres condiciones diferentes: cielo claro ($k_t > 0.6$), cielo parcialmente nublado ($0.6 \geq k_t \geq 0.2$) y cielo cubierto ($k_t < 0.2$). Los

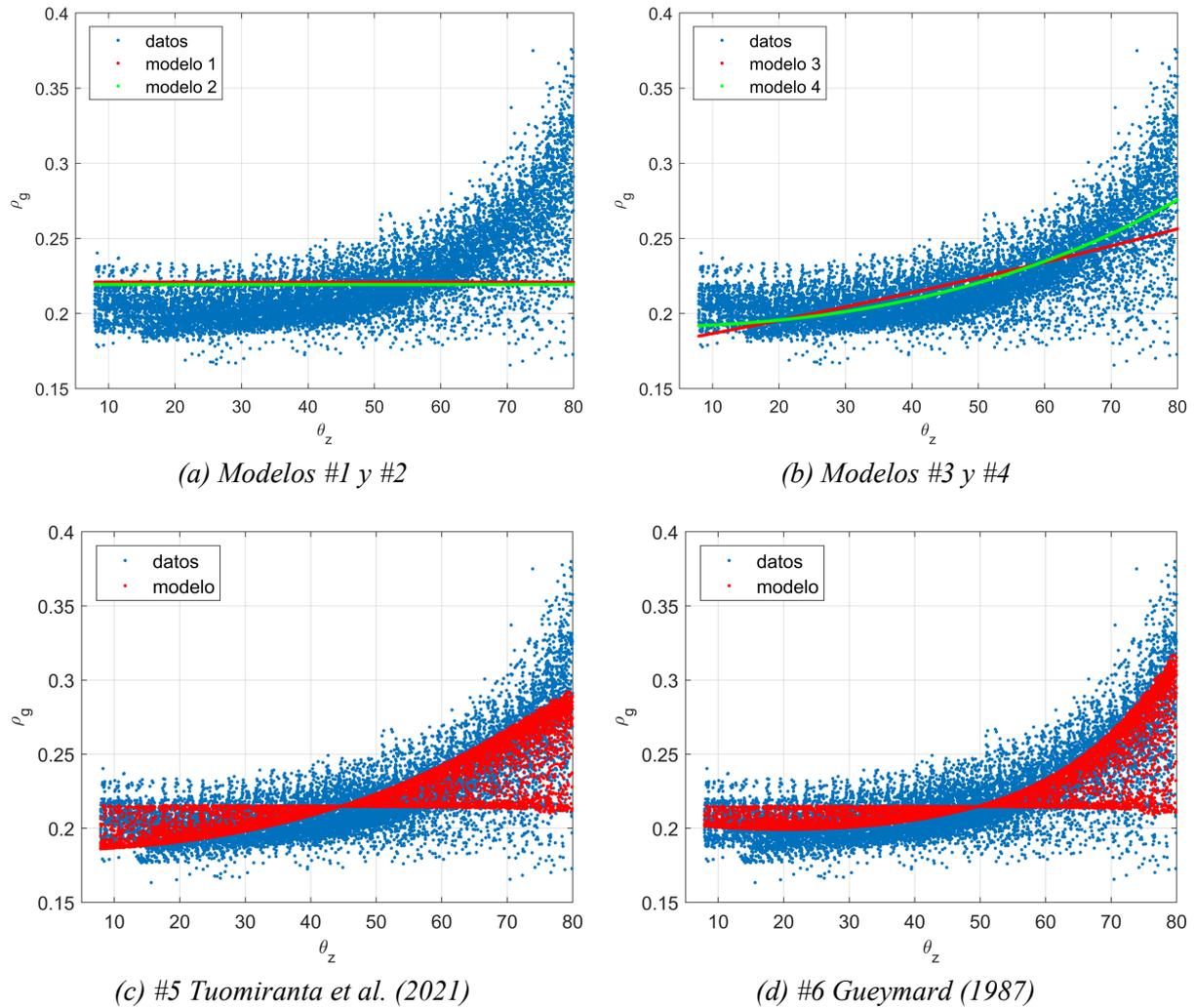


Figura 3: Comparativa entre las medidas de albedo y los estimativos de los diferentes modelos.

gráficos respectivos tienen la misma escala de colores, para facilitar la comparación, y satura en algunos casos para tener una visualización adecuada.

En relación al rMBD (Figs. 4a, 4c y 4e), el modelo 1 es el que presenta mayores diferencias, con un comportamiento bastante asimétrico. Este modelo subestima en gran medida en la región de ángulo cenital alto ($\cos \theta_z$ bajo), en particular para condiciones de cielo claro, y sobrestima en la región de ángulo cenital bajo para toda condición de cielo. El rMBD de este modelo en el diagrama discriminado (Fig. 4a) está entre -38% y $+14\%$ y su comportamiento es esperable de la inspección de la Fig. 3a. Los modelos 4 y 5 logran reducir considerablemente esta asimetría, especialmente la subestimación, alcanzando valores de rMBD de entre -15% y $+18\%$ (modelo 4) y -14% y $+11\%$ (modelo 5). El modelo 5 presenta una mejor distribución de los indicadores que el 4, pero la mayor mejoría se produce en la región de ángulos cenitales bajo-medio y condiciones de cielo parcialmente nublado y cubierto ($\cos \theta_z$ entre 0.1 y 0.5 y $k_t < 0.4$). En relación al rRMSD (Figs. 4b, 4d y 4f), los tres modelos presentan peor desempeño en la región ángulo cenital alto, en especial en la región de cielo claro y parcialmente nublado para el modelo 1 ($\text{rRMSD} \approx 40\%$), y en la región de cielo parcialmente nublado y cubierto para los modelos 4 y 5 ($\text{rRMSD} \approx 25\%$). Se observa una mejora en el desempeño al pasar de los modelos de menor a mayor complejidad, tanto en los valores máximos de rRMSD como en su distribución en este espacio.

A partir de lo expuesto, se concluye que los modelos de la categoría III logran describir de mejor forma las variaciones del albedo con el ángulo cenital y las condiciones de nubosidad. Estos modelos, además

de tener mejores indicadores de desempeño en términos globales (Tabla 3), presentan una distribución de errores más homogénea en el dominio $\cos \theta_z$ vs. k_t que los modelos de categoría I y II.

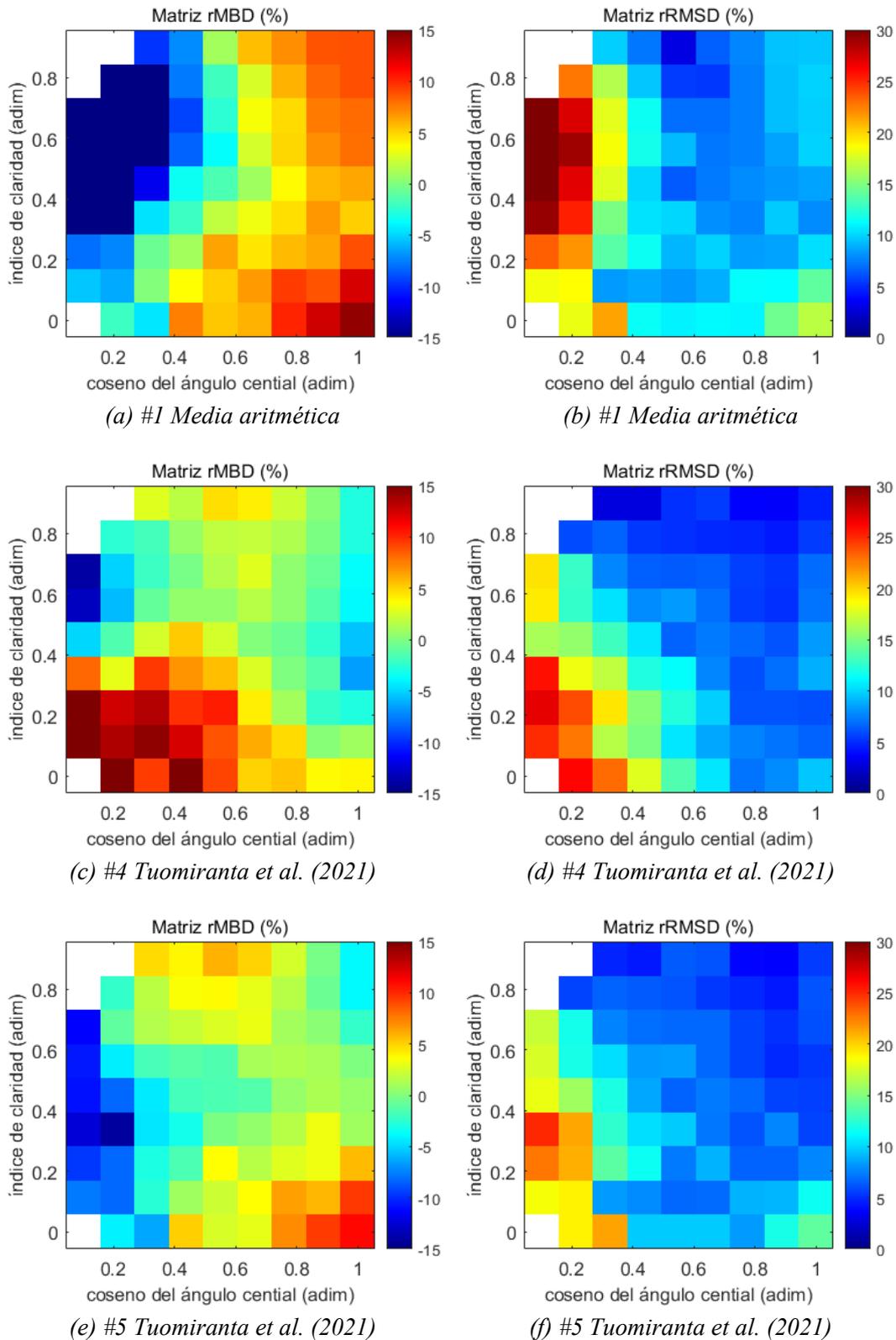


Figura 4: Matriz de $rMBD$ y $rRMSD$ para el mejor modelo de cada categoría, expresadas en forma porcentual respecto al valor medio de las medidas, $\bar{\rho}_g = 0.2209$. La escala de las figuras es la misma para facilitar su comparación. Las regiones en blanco indican que no hay datos en dicha condición.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desempeño de seis modelos pre-existentes para estimar el albedo de un suelo cubierto mayormente por gramíneas (pasto natural) en un punto representativo de la Pampa Húmeda. Los modelos fueron agrupados en tres categorías según la complejidad de los mismos: categoría I (modelos constantes); categoría II (modelos univariados en el ángulo cenital) y categoría III (modelos bivariados en el ángulo cenital y la fracción difusa). Todos los modelos presentaron un rMBD cercano a cero, por lo que el orden de los modelos estuvo dominado por el rRMSD y el rKSI. En este sentido, el ordenamiento dado por el rRMSD y el rKSI fue similar, siendo los modelos de la categoría III los de mejor desempeño, seguidos por los de la categoría II, y por último los de la categoría I, lo que se encuentra en consonancia con el trabajo previo de Tuomiranta et al. (2021) para otras regiones. El modelo de mejor desempeño de la categoría III y a nivel global, es el 5 (Tuomiranta et al., 2021), seguido muy cerca por el 6 (Gueymard, 1987). Este modelo posee indicadores que son mayores en un 16 % a los de la categoría II y un 58 % a los de la categoría I (en promedio), por lo cual se justifica su uso, si la medida de irradiancia difusa esta disponible. El modelo de mejor desempeño de la categoría II es el 4, siendo sensiblemente mejor que el 3, por lo cual es el modelo recomendado si no se cuenta con medidas de irradiancia difusa. El mejor modelo de la categoría I corresponde a la media aritmética, siendo muy pequeña la diferencia con la media geométrica.

Al analizar los indicadores de desempeño discriminados por el coseno del ángulo cenital y el índice de claridad, se observó que el modelo 5, además de presentar los mejores valores de rMBD y rRMSD en términos globales, presenta una mejor distribución de los indicadores en las diferentes condiciones. El modelo 1, si bien presenta un rMBD cercano a cero a nivel global, presenta una gran asimetría en la distribución de su rMBD, sobrestimando en gran medida para ángulos cenitales bajos y sobrestimando en la región de ángulos cenitales altos. En la discriminación de ambas métricas se observa claramente que el aumento de complejidad de los modelos (de la categoría I a la III) mejora su capacidad de modelado del albedo en las diferentes condiciones de altura solar y nubosidad, reduciendo errores en cada región y homogeneizando su comportamiento en este espacio.

A futuro se espera poder extender el trabajo a otros tipos de suelo, en especial aquellos que puede llegar a ser de interés para las instalación de paneles fotovoltaicos bifaciales (alta reflectividad y bajo costo). Otro trabajo a futuro consiste en evaluar el impacto que los modelos de la categoría II y III tienen sobre los modelos de transposición para la estimación de irradiancia solar en superficies inclinadas y evaluar el impacto del uso de modelos empíricos de separación de las componentes difusa y directa en los modelos de categoría III, incluyendo su ventaja relativa frente a los modelos de categorías II y I en esta situación.

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

- Abal, G., Aicardi, D., Alonso-Suárez, R., y Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in uruguay. *Solar Energy*, 141:166 – 181.
- Chiodetti, M., Lindsay, A., Dupeyrat, P., Binesti, D., Lutun, E., Radouane, K., y Mousel, S. (2016). Pv bifacial yield simulation with a variable albedo model. En *Proceedings of the EU PVSEC 2021*.
- Dickinson, R. E. (1983). Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance. En Saltzman, B., editor, *Theory of Climate*, volumen 25 de *Advances in Geophysics*, pp. 305–353. Elsevier.
- Gardner, C. L. y Nadeau, C. (1988). Estimating south slope irradiance in the arctic—a comparison of experimental and modeled values. *Solar Energy*, 41(3):227–240.
- Gueymard, C. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with

- selected engineering algorithms. *Solar Energy*, 38(5):367–386.
- Gueymard, C. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39:1024–1034.
- Ineichen, P., Guisan, O., y Perez, R. (1990). Ground-reflected radiation and albedo. *Solar Energy*, 44(4):207–214.
- Kopecek, R. y Libal, J. (2021). Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. *Energies*, 14(8).
- Liu, B. Y. y Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3):1–19.
- McArthur, L. (2005). Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual. Td-no. 1274, wrcp/wmo, World Meteorological Organization (WMO). www.wmo.org.
- Nkemdirim, L. C. (1972). A note on the albedo of surfaces. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 11(5):867–874.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11:1633–1644.
- Psioglou, B. y Kambezidis, H. (2009). Estimation of the ground albedo for the athens area, greece. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(8):943–954.
- Rodríguez-Muñoz, J., Monetta, A., Alonso-Suárez, R., Bove, I., y Abal, G. (2021). Correction methods for shadow-band diffuse irradiance measurements: assessing the impact of local adaptation. *Renewable Energy*, 178:830–844.
- Russo, P., Laguarda, A., y Abal, G. (2021). Characterization of solar over-irradiance events in uruguay. En *ISES Solar World Congress 2021 Proceedings*, pp. 1–6.
- Temps, R. C. y Coulson, K. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19(2):179–184.
- Tuomiranta, A., Alet, P.-J., Ballif, C., y Ghedira, H. (2021). Worldwide performance evaluation of ground surface reflectance models. *Solar Energy*, 224:1063–1078.
- Yusufoglu, U. A., Lee, T. H., Pletzer, T. M., Halm, A., Koduvelikulathu, L. J., Comparotto, C., Kopecek, R., y Kurz, H. (2014). Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection. *Energy Procedia*, 55:389–395. Proceedings of the 4th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2014).

EVALUATION OF SIX EMPIRICAL MODELS TO ESTIMATE GROUND ALBEDO IN THE PAMPA HÚMEDA

ABSTRACT: Ground albedo modeling is required for the accurate estimation of ground-reflected radiation, which is needed for solar irradiance transposition models from horizontal to tilted plane. This radiation component represents a small portion of the useful irradiance in typical applications and soils, but it is gaining in relevance due to the recent appearance of bifacial solar panels. In this work, six ground albedo models are adjusted and evaluated by using measurements acquired in an experimental facility whose soil and climate are representative of the broader Pampa Húmeda region of South America. Three types of models are considered; constant models, univariate models of the solar zenith angle and bivariate models that add the diffuse fraction as predictor. Bivariate models are the best performing, overcoming univariate models in 16 % and constant models in 58 % in terms of rRMSD metric. The bivariate and univariate models of Tuomiranta et al. (2021) are recommended, and the choice within them depends on the availability of diffuse irradiance measurements.

Keywords: ground reflectance, reflected solar irradiance, bifacial solar modules.