

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE 19 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA DIFUSA SOBRE PLANOS INCLINADOS DEPENDIENDO DEL TIPO DE CIELO ESTÁNDAR ISO/CIE

García I.*, **Torres J.L.***, **de Blas M.A.***, **Sáenz C.****, **Hernández B.****, **Illanes R.*****

*Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, 31006, Pamplona (España).

**Departamento de Ciencias, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, 31006, Pamplona (España).

***Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Antonio Novais 10, 28040 Madrid (España).

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6103>

RESUMEN

En este trabajo se han evaluado 19 modelos de estimación de irradiancia difusa sobre el plano inclinado, que incluyen tanto modelos isotrópicos o pseudoisotrópicos como modelos anisotrópicos. Dicha evaluación se ha llevado a cabo a partir una serie de 5396 observaciones de irradiancia global, difusa y directa realizadas entre julio y diciembre de 2018 en la estación radiométrica de la Universidad Pública de Navarra (UPNA). El estado del cielo correspondiente a cada observación se ha caracterizado de acuerdo con el CIE Standard General Sky propuesto en la norma ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003. Para esta clasificación se han utilizado las medidas de distribución angular de luminancia y radiancia proporcionadas por un escáner de cielo ubicado en la propia estación de la UPNA. De tal manera que, para cada combinación de orientación e inclinación del plano, se ha evaluado la bondad de los distintos modelos de acuerdo con los 15 tipos de cielo estándar propuestos por la norma ISO/CIE. Los resultados revelan que el modelo de Perez et al. 2 presenta los mejores resultados globales, así como en 5 de los 15 tipos de cielo ISO/CIE.

PALABRAS CLAVE: Modelos de Irradiancia, Plano Inclinado, Cielos Estándar ISO/CIE

ABSTRACT

A total of 19 models for estimating diffuse irradiance on the inclined plane have been evaluated in this work, which include both isotropic or pseudoisotropic models and anisotropic models. This evaluation has been carried out from a series of 5,396 measurements of global, diffuse and direct irradiance carried out between July and December 2018 at the radiometric station of the Public University of Navarra (UPNA). The sky conditions corresponding to each observation has been characterized according to the CIE Standard General Sky proposed in the standard ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003. For this classification, the angular distribution of luminance and radiance measurements provided by a sky scanner located at the UPNA station have been used. In such a way that, for each combination of plane's orientation and inclination, the goodness of the different models has been evaluated in accordance with the 15 standard sky types proposed by the ISO/CIE standard. The results reveal that the Perez et al. 2 model shows the best overall results and for 5 of the 15 ISO/CIE standard sky types.

KEYWORDS: Irradiance Models, Tilted planes, ISO/CIE Standard Sky

INTRODUCCIÓN

En la gran mayoría de los casos los dispositivos de captación de la energía solar se encuentran situados en planos que no son horizontales. En general, los planos correspondientes a los módulos fotovoltaicos o paneles térmicos están inclinados y los de muchos de los cerramientos de edificios también, por ejemplo, las fachadas verticales. Sin embargo, las estaciones meteorológicas o las estimaciones de radiación solar global a partir de imágenes satelitales proporcionan datos de radiación global sobre plano horizontal. Este desajuste entre los datos de radiación habitualmente disponibles y los necesarios para los dispositivos de captación, ha propiciado el desarrollo de diversos métodos que permiten el paso de radiación global sobre plano horizontal a radiación global sobre el plano inclinado. Con el paso del tiempo, las propuestas que han ido surgiendo se han ido aproximando cada vez más a la realidad física del problema y aumentando su grado de complejidad o exigencia de cálculo. Dentro de los conocidos como modelos de irradiancia, dichas propuestas van desde los modelos isotrópicos o pseudoisotrópicos, como el de Liu y Jordan (1961) o el de Koronakis (1986), hasta los modelos anisotrópicos, entre los que se encuentran el ampliamente aplicado modelo de Perez (Perez et al., 1987), el modelo de Gueymard (1987) o el de Muneer (1987, 1990).

El objetivo de este trabajo es evaluar 19 modelos de estimación de irradiancia sobre el plano inclinado frente a los valores de irradiancia proporcionados por el modelo de distribución angular de luminancia en el cielo propuesto en la norma ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003 (2004), considerando 16 combinaciones de inclinación y orientación del plano de captación. Dicha norma establece 15 tipos de cielo estándar que se distribuyen en 5 tipos de cielo cubierto (1 a 5), 5 tipos de cielo intermedio (6 a 10) y otros tantos tipos de cielo claro (11 a 15). La evaluación de los modelos de irradiancia se ha llevado a cabo considerando, por un lado, todos los tipos de cielo de forma conjunta y, por otro, cada uno de los 15 tipos de cielo ISO/CIE. La utilización del modelo de distribución angular ISO/CIE para la obtención de la irradiancia de referencia frente a la que comparar los valores proporcionados por los modelos de irradiancia atiende a dos razones fundamentales. La primera es evitar la instalación de sensores de irradiancia global, difusa y directa en las 16 posiciones del plano consideradas. En este trabajo se ha empleado un procedimiento de proyección ortográfica de las radiancias del cielo proporcionadas por el modelo ISO/CIE sobre el plano de interés para la obtención de la irradiancia difusa sobre el plano inclinado. La segunda es que se evitan las discontinuidades producidas como consecuencia de la saturación de las medidas de radiancia y luminancia próximas al sol proporcionadas por el escáner de cielo utilizado, como se explica en el apartado dedicado a los datos radiométricos. Estas medidas han sido empleadas para caracterizar el estado del cielo de acuerdo con la norma ISO/CIE. El modelo propuesto en la norma se ha utilizado para obtener una distribución continua de radiancia en la bóveda celeste.

El trabajo se estructura en las siguientes secciones. El apartado “Datos radiométricos” describe la serie de datos utilizada y el procedimiento de control de calidad al que ha sido sometida. En el apartado “Metodología” se detalla la metodología seguida. En el apartado “Resultados” se presentan las frecuencias de ocurrencia de los distintos tipos de cielo ISO/CIE, los errores cuadráticos medios relativos (RMSEr) cometidos por los distintos modelos para una orientación del plano de captación y cuatro inclinaciones y se presenta una clasificación de los modelos, global y por tipo de cielo, de acuerdo con los RMSEr obtenidos. El último apartado está dedicado a las “Conclusiones”.

DATOS RADIOMÉTRICOS

Los datos utilizados en este estudio han sido recogidos en la estación radiométrica de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), localizada en la azotea de uno de los edificios de la finca de prácticas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Biociencias (42°47'32" N, 1°37'45" W, 435 m a.s.l.). El estudio del horizonte visible revela que, en ninguna dirección, su elevación excede los 6°. La serie de datos utilizada en este estudio consta de un total 5396 observaciones realizadas entre julio y diciembre de 2018. Durante este periodo se midieron las siguientes variables en la estación radiométrica de la UPNA: irradiancia global y difusa sobre el plano horizontal, irradiancia directa sobre el plano normal y distribución angular de radiancia y luminancia en la bóveda celeste. La irradiancia global fue medida minutamente mediante un piranómetro Kipp & Zonen CM11. La irradiancia difusa se midió con frecuencia minutil mediante un piranómetro Kipp & Zonen CM11 con bola de sombra, mientras la irradiancia directa normal se midió con un pirheliómetro Kipp & Zonen CH1 con la misma frecuencia. Estos tres instrumentos están montados sobre un seguidor solar Kipp & Zonen 2 AP. La distribución angular de radiancia y luminancia celestes se midió con una frecuencia de 10 minutos mediante un escáner de cielo EKO MS-321LR. Este dispositivo emplea más de cuatro minutos en registrar los valores de radiancia y luminancia de los 145 sectores en los que está dividida la bóveda celeste de acuerdo con la propuesta de la CIE (CIE, 1994).

Todas las medidas tanto de irradiancia como de distribución angular correspondientes a elevaciones solares inferiores a 5° fueron descartadas. Las medidas de irradiancia fueron sometidas al control de calidad propuesto en el proyecto MESoR (Hoyer-Klick et al., 2008). En el caso de la distribución angular de radiancia y luminancia se consideraron tres criterios de control de calidad. En primer lugar, todas las medidas de los sectores de cielo individuales que presentan valores fuera del rango de medida del escáner de cielo (0-50 kcd·m⁻² para luminancia y 0-300 W·m⁻²·sr⁻¹

para radiancia) fueron descartadas. Asimismo, se descartaron todas las medidas de aquellos sectores de cielo cuyo centro se encuentra a menos de 6° de distancia del sol, ya que la luminancia y la radiancia del sol superan el rango de medida del escáner de cielo. En tercer lugar, se descartaron todas las medidas cuya integración sobre el plano horizontal se desviaba más de un 30% respecto a la irradiancia difusa medida en el mismo periodo de tiempo.

METODOLOGÍA

La evaluación de los 19 modelos de irradiancia considerados en este trabajo se ha llevado a cabo considerando 16 posiciones diferentes del plano de captación que se derivan de la combinación de un total de 4 inclinaciones (26°, 42°, 64° y 90°) y 4 orientaciones (N, E, S y O). Las inclinaciones de 26° y 64° son las que maximizan la captación de radiación solar en verano e invierno, respectivamente, mientras que la de 42° es la óptima anual para la ubicación de la estación radiométrica de la UPNA. La inclinación de 90° ha sido considerada por el interés que tiene en las fachadas de los edificios. Para cada momento y posición del plano de captación, se han seguido los tres pasos que se indican a continuación, que se detallan en los epígrafes siguientes:

1. Clasificación del estado del cielo a partir de las medidas de distribución angular de radiancia, de acuerdo con el estándar ISO/CIE y detección y eliminación de los cielos “opuestos” (Bartzokas et al., 2005).
2. Generación de la distribución angular de radiancia en el cielo de acuerdo con el estándar ISO/CIE y proyección sobre un plano inclinado para obtener, mediante su integración, la irradiancia difusa sobre dicho plano inclinado. Esta irradiancia se considera la referencia frente a la que evaluarán los 19 modelos de irradiancia contemplados.
3. Determinación de la irradiancia global, difusa y directa mediante los modelos de irradiancia y comparación con la irradiancia determinada en el paso anterior a partir del modelo de distribución angular ISO/CIE.

Clasificación de cielos

Los cielos considerados han sido clasificados de acuerdo con las 15 distribuciones de luminancia propuestas en el estándar ISO/CIE a partir de las medidas de distribución angular de luminancia en el cielo. En la bibliografía existen diversos métodos para la caracterización de los cielos según dicho estándar. En este trabajo se ha empleado el método de la luminancia relativa al cénit (RZL, por sus siglas en inglés) propuesto por García et al. (2020). En ocasiones sucede que algunos de los cielos clasificados como cubiertos muestran una irradiancia directa sobre el plano normal (G_{bn}) excesivamente alta o ciertos cielos clasificados como claros presentan una G_{bn} anormalmente baja. Estos cielos se conocen como “opuestos”, en oposición a los cielos “normales”. Una vez realizada la clasificación ISO/CIE se ha discriminado entre cielos “normales” y “opuestos” según el criterio de Bartzokas et al. (2005), que establece el valor umbral de G_{bn} en $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Los cielos “opuestos”, que suponen un 20.08% de los cielos claros (tipos 1 a 6) y un 10.33% de cielos cubiertos (tipos 7 a 15), han sido descartados y sólo los cielos “normales” han sido utilizados.

Metodología para el cálculo de la irradiancia de referencia sobre el plano inclinado

El modelo de radiancia propuesto por la citada norma ISO/CIE ha sido empleado para determinar la distribución angular de radiancia en la bóveda celeste correspondiente a cada una de las observaciones realizadas, de acuerdo con la clasificación obtenida en el punto anterior. Esto es, para cada observación, caracterizada por un tipo de cielo estándar ISO/CIE, se ha calculado la radiancia difusa en 785398 elementos de cielo. La irradiancia difusa captada por cada plano de interés correspondiente a cada combinación de acimut (γ_p) e inclinación (β_p) ha sido determinada mediante la integración de la radiancia de los distintos elementos de cielo proyectados ortográficamente sobre dicho plano. Esta irradiancia difusa se ha tomado como referencia frente a la que se han comparado las irradiancias difusas estimadas por cada uno de los 19 modelos evaluados. De tal manera que, para cada combinación de orientación e inclinación del plano, se ha evaluado la bondad de los distintos modelos de acuerdo con los 15 tipos de cielo estándar propuestos por la norma ISO/CIE. A modo de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra la proyección de la distribución angular de radiancia de un tipo de cielo ISO/CIE 8 sobre un plano horizontal y cuatro planos inclinados 26°, 42°, 64° y 90°.

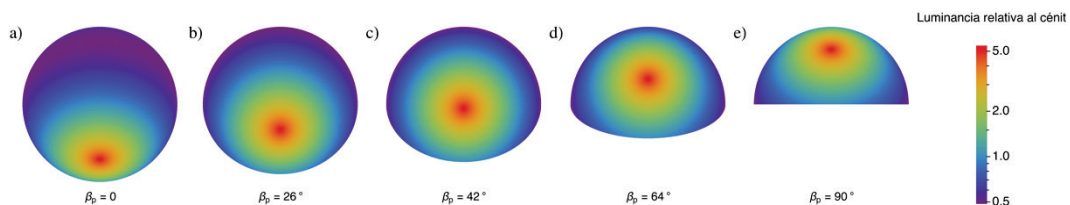


Fig. 1. Proyección de la distribución angular de radiancia de un tipo de cielo ISO/CIE 8 sobre (a) un plano horizontal y cuatro planos inclinados (b) 26°, (c) 42°, (d) 64° y (e) 90°, considerando un ángulo de cénit solar de 45°

Modelos de irradiancia para el paso a plano inclinado

La Tabla 1 recoge los modelos de cálculo de la irradiancia difusa sobre el plano inclinado analizados ordenados cronológicamente, así como el tipo de modelo, de cielo isotrópico o de cielo anisotrópico, y las referencias de cada uno de ellos. La irradiancia directa incidente sobre el plano inclinado ha sido calculada mediante la misma transformación geométrica en todos los casos.

En el caso del modelo de Steven y Unsworth se citan dos referencias ya que la versión inicial del modelo (Steven y Unsworth, 1979) estaba destinada a cielos claros y la segunda (Steven y Unsworth, 1980) a cielos cubiertos. De acuerdo con la propuesta de Yang (2016), en este trabajo se han combinado ambos modelos: el modelo de cielos claros en los casos en los que el índice de claridad (ϵ), calculado según Perez et al. (1987), es superior a 1.1 y el modelo de cielos cubiertos en el resto de los casos. En el caso del modelo de Olmo et al., se ha utilizado la revisión del modelo original (Olmo et al., 1999) llevada a cabo por Evseev y Kudish (2009).

Tabla 1. Relación de modelos de irradiancia evaluados

Modelo	Tipo	Referencia
Liu y Jordan	Isotrópico	(Liu y Jordan, 1961)
Bugler	Anisotrópico	(Bugler, 1977)
Temps y Coulson	Anisotrópico	(Temps y Coulson, 1977)
Klucher	Anisotrópico	(Klucher, 1979)
Steven y Unsworth	Anisotrópico	(Steven y Unsworth, 1979, 1980)
Hay y Davies	Anisotrópico	(Hay y Davies, 1980)
Willmott	Anisotrópico	(Willmott, 1982)
Ma y Iqbal	Anisotrópico	(Ma y Iqbal, 1983)
Koronakis	Isotrópico	(Koronakis, 1986)
Gueymard	Anisotrópico	(Gueymard, 1987)
Perez et al. 1	Anisotrópico	(Perez et al., 1987)
Perez et al. 2	Anisotrópico	(Perez et al., 1990)
Reindl et al.	Anisotrópico	(Reindl et al., 1990)
Tian et al.	Isotrópico	(Tian et al., 2001)
Badescu	Isotrópico	(Badescu, 2002)
Muneer et al.	Anisotrópico	(Muneer et al., 2004)
Olmo et al.	Anisotrópico	(Evseev y Kudish, 2009; Olmo et al., 1999)
Demain et al.	Anisotrópico	(Demain et al., 2013)
Yao et al.	Anisotrópico	(Yao et al., 2015)

RESULTADOS

En la Fig. 2 se presentan las frecuencias de cada tipo de cielo estándar ISO/CIE obtenidas tras la clasificación según el método RZL. Se puede apreciar como, en el periodo analizado, predominan los cielos claros (tipos 11 a 15), siendo el tipo 13 el más frecuente.

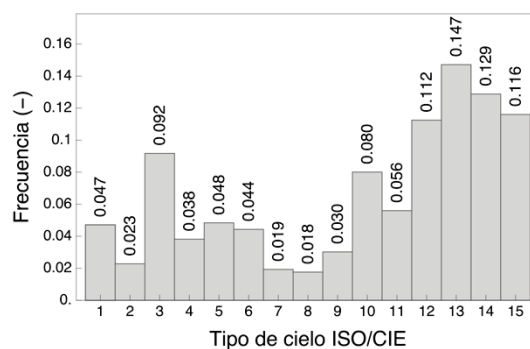


Fig. 2. Frecuencias de ocurrencia de los tipos de cielo estándar ISO/CIE en la estación radiométrica de la UPNA entre julio y diciembre de 2018

Los valores de irradiancia global obtenidos por los modelos citados para las distintas posiciones del plano de captación han sido comparados frente a los obtenidos mediante la proyección sobre el plano inclinado del modelo de radiancia ISO/CIE mediante el error cuadrático medio relativo (RMSEr), de acuerdo con la Ec. (1). La evaluación de los modelos se ha realizado para cada uno de los 15 tipos de cielo ISO/CIE y de manera global, esto es, considerando el conjunto de todos los cielos de la serie de datos utilizada.

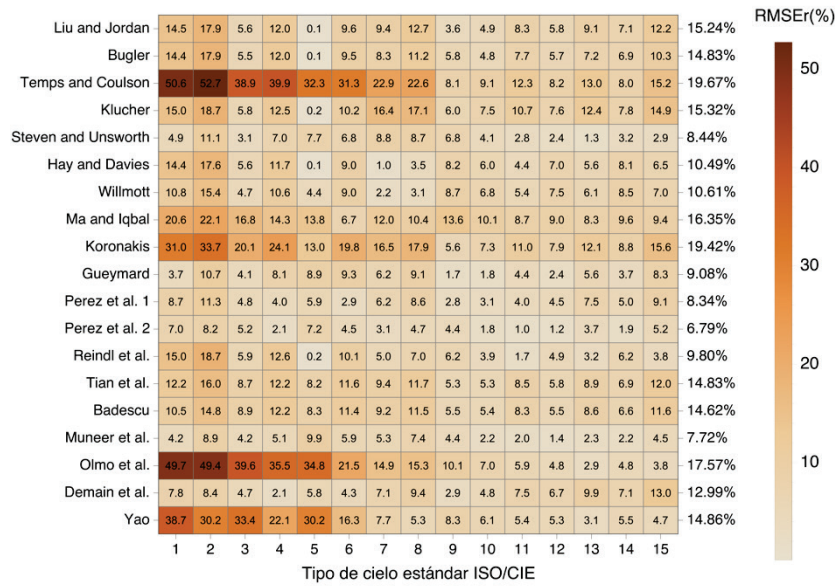


Fig. 4. Valores de RMSEr (%) obtenidos por cada modelo y tipo de cielo estándar ISO/CIE considerando todas las posiciones del plano establecidas

En línea con el trabajo de Yang (2016), se ha utilizado un método de clasificación lineal (Alvo y Yu, 2014) para ordenar los modelos según su RMSEr considerando cada tipo de cielo y el conjunto de todos los cielos analizados. En primer lugar, para cada tipo de cielo, se ordenan los modelos de acuerdo con los valores de RMSEr obtenidos en cada posición del plano. Es decir, en cada combinación de inclinación y orientación. La clasificación global (\mathcal{R}_i) para cada tipo de cielo y para el conjunto de todos los cielos se obtiene mediante la Ec. (2).

$$\mathcal{R}_i = \sum_{j=1}^{m!} \frac{n_j v_j(i)}{n}, \tag{2}$$

donde $v_j, j = 1, 2, \dots, m!$ representa todas las clasificaciones posibles de los m modelos, n_j es la frecuencia observada del orden j , $n = \sum_{j=1}^{m!} n_j$ y $v_j(i)$ es el orden dado al objeto i en la clasificación j .

La Tabla 2 recoge los resultados de la clasificación y la frecuencia de ocurrencia de cada tipo de cielo.

Tabla 2. Clasificación de la bondad de los modelos evaluados por tipo de cielo y globalmente. El modelo que presenta un comportamiento mejor en cada caso ha sido sombreado

Modelo	Tipo de cielo ISO/CIE															Global
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Liu y Jordan	12	13	8	10	5	10	10	17	8	11	14	13	13	15	16	13
Bugler	9	11	4	9	1	8	7	11	15	16	18	19	19	19	19	17
Temps y Coulson	19	19	19	19	19	19	19	19	17	19	17	14	15	9	11	18
Klucher	15	15	12	14	4	12	17	15	10	13	15	9	14	8	9	9
Steven y Unsworth	3	6	1	4	7	7	15	12	13	8	6	2	1	4	2	4
Hay y Davies	10	9	5	7	3	6	1	1	9	7	7	12	11	14	8	7
Willmott	5	7	7	8	9	9	2	2	12	12	11	18	16	16	14	8
Ma y Iqbal	13	12	14	15	16	2	13	13	18	17	9	10	12	11	12	12
Koronakis	17	17	16	16	12	16	16	16	6	9	13	11	8	12	15	16
Gueymard	1	5	3	6	11	13	5	6	1	1	5	4	5	6	7	5
Perez et al. 1	8	4	6	3	6	1	9	9	3	6	4	5	6	3	5	2
Perez et al. 2	4	1	10	1	10	5	4	3	4	3	1	3	3	1	1	1
Reindl et al.	14	14	11	11	2	11	3	4	7	4	2	7	7	10	6	6
Tian et al.	11	10	13	12	15	15	12	14	16	15	19	17	18	18	18	15
Badescu	7	8	15	13	14	14	14	10	14	14	16	16	17	17	17	14
Muneer et al.	2	3	2	5	13	4	8	8	5	2	3	1	2	2	3	3
Olmo et al.	18	18	17	18	18	18	18	18	19	18	12	6	4	5	4	19
Demain et al.	6	2	9	2	8	3	6	7	2	5	8	8	9	7	10	10
Yao et al.	16	16	18	17	17	17	11	5	11	10	10	15	10	13	13	11
Frecuencia (%)	4.7	2.3	9.2	3.8	4.8	4.4	1.9	1.8	3.0	8.0	5.6	11.2	14.7	12.9	11.6	100

De acuerdo con la clasificación lineal mostrada en la Tabla 2, el modelo de Perez et al. 2 presenta el mejor comportamiento global, así como en 5 de los 15 tipos de cielo estándar ISO/CIE. En la clasificación global le sigue el modelo de Perez et al. 1, que difiere del anterior en la consideración de la componente circunsolar; puntual en el caso de Perez et al. 2 y con un semiángulo de apertura de 25° del área circunsolar en Perez et al. 1. La tercera posición la ocupa el modelo de Muneer et al. que obtiene la primera posición para el tipo de cielo 12. A pesar de ocupar la séptima posición en la clasificación global, el modelo Hay y Davies presenta el mejor comportamiento para los tipos de cielo ISO/CIE 7 y 8.

Las últimas posiciones de la clasificación están ocupadas por los modelos de Olmo et al., en última posición, y Temps y Coulson. Ambos modelos han obtenido errores especialmente elevados para los tipos de cielo cubiertos (tipos 1 a 5) e intermedios (tipos 6 a 10). Sin embargo, llama la atención que el modelo de Bugler, que se encuentra en el puesto 17 de la clasificación, ocupa el primer puesto para el cielo 5 (cielo homogéneo de la CIE).

CONCLUSIONES

Como en otros análisis de calidad de los modelos de cálculo de irradiancia sobre plano inclinado, este trabajo pone de manifiesto la calidad del modelo de Perez et al. 2 ya que es el mejor clasificado. Pero el hecho de que su variante 2 se comporte especialmente bien en aquellos tipos de cielo que por su distribución de radiancia/luminancia exhibirían una corona circunsolar, merece un análisis más profundo.

Las buenas posiciones obtenidas por los modelos de Bugler y Steven y Unsworth en algunos de los tipos de cielos cubiertos revelan, por un lado, que en estos cielos un modelo sencillo como el de Bugler puede resultar suficiente y, por otro, que con un valor adecuado del parámetro b que incluye este modelo, el modelo de Steven y Unsworth es muy acertado.

El hecho de que el modelo de Demain et al., que resulta de la combinación de los modelos de Perez et al. 2, Willmott y Bugler, no haya ocupado en ningún cielo estándar los primeros puestos de la clasificación, pone de manifiesto que, manteniendo su idea básica, deberían realizarse análisis posteriores, por tipo de cielo, que comprendieran otras combinaciones posibles de modelos y con pesos relativos de cada uno de ellos diferentes de los originales.

Los resultados del modelo de Yao et al., el último en publicarse, no son todo lo buenos que se podría esperar. Si se descarta que haya alguna mala interpretación del modelo publicado o de los valores de sus coeficientes o que éstos sean muy dependientes del lugar para el que se han obtenido, la complicación añadida por su consideración de la partición del cielo en cuatro zonas en lugar de las tres de Perez, no parece estar justificada.

De acuerdo con los resultados obtenidos, es evidente que ningún modelo presenta el mejor comportamiento para todos los tipos de cielo estándar ISO/CIE. Una posible línea de investigación futura que se deriva de este trabajo es la mejora de los resultados mediante la selección del modelo más adecuado para cada tipo de cielo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto IRILURREFLEX (ENE2017-86974-R), financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

REFERENCIAS

- Alvo, M., y Yu, P. L. H. (2014). Exploratory Analysis of Ranking Data. In *Statistical Methods for Ranking Data* (pp. 7–21). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1471-5_2
- Badescu, V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy*, 26(2), 221–233. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00123-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00123-9)
- Bartzokas, A., Kambezidis, H. D., Darula, S., y Kittler, R. (2005). Comparison between winter Kipp & Zonen summer sky-luminance distribution in Central Europe and in the Eastern Mediterranean. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(7), 709–718. <https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2004.12.008>
- Bugler, J. W. (1977). The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. *Solar Energy*, 19(5), 477–491. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90103-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90103-7)

- CIE. (1994). Guide to recommended practice of daylight measurement. Technical Report CIE 108:1994.
- Demain, C., Journée, M., y Bertrand, C. (2013). Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 50, 710–721. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.07.031>
- Evseev, E. G., y Kudish, A. I. (2009). An assessment of a revised Olmo et al. model to predict solar global radiation on a tilted surface at Beer Sheva, Israel. *Renewable Energy*, 34(1), 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.012>
- García, I., de Blas, M., y Torres, J. L. (2020). The sky characterization according to the CIE Standard General Sky: Comparative analysis of three classification methods. *Solar Energy*, 196, 468–483. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.12.039>
- Gueymard, C. A. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy*, 38(5), 367–386. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(87\)90009-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(87)90009-0)
- Hay, J. E., y Davies, J. A. (1980). Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. *Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, 59–72.
- Hoyer-Klick, C., Dumortier, D., Tsvetkov, A., Polo, J., Torres, J. L., Kurz, C., y Ineichen, P. (2008). D 1.1.2 Existing Ground Data Sets. *Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge*. CA – Contract No. 038665.
- ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003. (2004). *Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky*.
- Klucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23(2), 111–114. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90110-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90110-5)
- Koronakis, P. S. (1986). On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar Energy*, 36(3), 217–225. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90137-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90137-4)
- Liu, B. Y. H., y Jordan, R. C. (1961). Daily insolation on surfaces tilted towards equator. *ASHRAE Journal*, 10, 53–59.
- Ma, C. C. Y., y Iqbal, M. (1983). Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy*, 31(3), 313–317. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90019-1)
- Muneer, T. (1987). *Solar Radiation Modelling for the United Kingdom*. Council for National Academic Awards.
- Muneer, T. (1990). Solar radiation model for Europe. *Building Services Engineering Research and Technology*, 11(4), 153–163. <https://doi.org/10.1177/014362449001100405>
- Muneer, T., Gueymard, C. A., y Kambezidis, H. (2004). Hourly Slope Irradiation and Illuminance. In *Solar Radiation and Daylight Models* (pp. 143–221). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075065974-1/50012-7>
- Olmo, F., Vida, J., Foyo, I., Castro-Diez, Y., y Alados-Arboledas, L. (1999). Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance. *Energy*, 24(8), 689–704. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00025-0)
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. J., y Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., y Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 39(3), 221–231. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2)
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., y Duffie, J. A. (1990). Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45(1), 9–17. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90061-G](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90061-G)
- Steven, M. D., y Unsworth, M. H. (1979). The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(445), 593–602. <https://doi.org/10.1002/qj.49710544507>

Steven, M. D., y Unsworth, M. H. (1980). The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447), 57–61. <https://doi.org/10.1002/qj.49710644705>

Temps, R. C., y Coulson, K. L. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19(2), 179–184. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90056-1)

Tian, Y. Q., Davies-Colley, R. J., Gong, P., y Thorrold, B. W. (2001). Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1), 67–74. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00245-3)

Willmott, C. J. (1982). On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, 28(3), 205–216. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90159-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90159-1)

Yang, D. (2016). Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks. *Solar Energy*, 136, 288–302. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.06.062>

Yao, W., Li, Z., Zhao, Q., Lu, Y., y Lu, R. (2015). A new anisotropic diffuse radiation model. *Energy Conversion and Management*, 95, 304–313. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.01.016>