

EVALUACIÓN EN URUGUAY DEL PRODUCTO DSR GOES-16 DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL

R. Ledesma¹, R. Alonso-Suárez^{2,3}, A. Monetta², A. Laguarda³, O. Vilela⁴, G. Salazar¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

²Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del Litoral, CENUR Litoral Norte, Udelar

³Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Udelar

⁴Departamento de Energía Nuclear, Centro de Tecnología, Universidad Federal de Pernambuco

E-mail: rdledesma@exa.unsa.edu.ar, r.alonso.suarez@gmail.com

RESUMEN: La información sobre el recurso solar es esencial para el desarrollo de aplicaciones que utilicen esta fuente energética. En ausencia de mediciones terrestres o estimaciones satelitales con modelos localmente adaptados, los usuarios tienden a recurrir a otras bases de datos disponibles. Estas bases de datos usualmente se componen de estimaciones de origen satelital o modelado atmosférico que no siempre alcanzan desempeños adecuados. Conocer el desempeño de tales herramientas es por tanto importante para asesorar de mejor manera a los usuarios del sector solar. En este estudio se evalúa por primera vez en Uruguay el desempeño del producto GOES-16 de irradiancia solar global horizontal (DSR) elaborado por la NESDIS/NOAA. El modelo Heliosat-4, largamente evaluado en esta región, se incluye en el análisis como referencia. La comparación demuestra que el producto GOES-DSR presenta un desempeño inferior al de Heliosat-4 en la región. Se obtuvo un RMSE porcentual de 19-20 %, un desvío estándar de 88 W/m² y un MBE porcentual de +3 % para el GOES-DSR, en comparación al 17-18 %, 70 W/m², y -1.5 %, respectivamente, del Heliosat-4. Los indicadores del Heliosat-4 son consistentes con evaluaciones previas en Uruguay.

Palabras clave: irradiancia solar, GHI, estimación satelital, Uruguay, GOES-DSR, Heliosat-4

INTRODUCCIÓN

El diseño y dimensionamiento de emprendimientos de aprovechamiento de la energía solar requiere información del recurso solar disponible en el emplazamiento elegido. El tamaño del proyecto, en particular, el volumen de la inversión, determina la calidad exigida para los datos base de radiación solar que serán utilizados. Los emprendimientos de gran escala requieren información de recurso muy precisa y de baja incertidumbre, dado que pequeñas diferencias entre la predicción del recurso y la realidad futura puede resultar en menores rentabilidades de las esperadas o afectar críticamente el flujo de caja de los proyectos (Schnitzer et al., 2012; McMahan et al., 2013). En cambio, para proyectos más chicos, por ejemplo, residenciales, empresariales o industriales de bajo porte, información menos precisa puede ser suficiente, siempre que los sesgos de los valores mensuales y anuales de largo plazo estén caracterizados. En este contexto, la evaluación de las fuentes de datos disponibles es información relevante para poder asesorar a los usuarios, atendiendo la aplicación específica de cada uno. Esto es especialmente importante para las fuentes de datos de libre distribución, dado que en ausencia de mejor información, los usuarios tienden a confiar en ellas sin visión crítica ni mayores cuestionamientos.

Existen varias bases de datos de acceso gratuito que proveen información de radiación solar para sitios arbitrarios, es decir, en ubicaciones que un usuario puede elegir ad-hoc ingresando las coordenadas geo-

30 gráficas o seleccionando en un mapa. Dependiendo de la escala temporal en que se provee la información
31 (10-minutal, horaria, diaria, mensual, anual), estas bases pueden estar compuestas de interpolaciones de
32 medidas terrestres, datos de reanálisis de modelos numéricos de atmósfera, o estimaciones por satélite.
33 Dado que la medición terrestre presenta serias limitaciones de extrapolación espacial y los modelos de
34 atmósfera tienden a subrepresentar la nubosidad, la única opción capaz de producir estimaciones confia-
35 bles de radiación solar para sitios arbitrarios es la de origen satelital. Naturalmente, si uno cuenta con
36 mediciones de calidad de radiación solar en sitio por varios años en el emplazamiento del proyecto, o
37 cercano a él, esta sería la mejor información disponible, no obstante, es una situación muy infrecuente.
38 La estimación de la irradiancia solar mediante imágenes satélites surge como una herramienta útil en
39 situaciones en donde no se cuenta con información medida en el sitio específico, lo que es la situación
40 más común. Para poder hacer uso de esta información, adaptarla al sitio, o desarrollar modelos satelitales
41 localmente ajustados, la información medida en tierra es absolutamente fundamental, pero alcanza con
42 que esté disponible dentro de la región climática afín. Esto relaja el requerimiento de disponibilidad de
43 medida terrestre, en especial, la densidad espacial necesaria de las mediciones, un aspecto en que una
44 red de medida en tierra no podría competir con la información satelital (Perez et al., 1997; Zelenka et al.,
45 1999). En suma, la medición terrestre y la información satelital tienen una relación de complementari-
46 dad, donde la medida terrestre aporta la referencia para ajuste y/o validación de modelos, y la información
47 satelital provee la espacialidad. La ganancia de espacialidad conlleva el costo de un aumento de incerti-
48 dumbre respecto a lo que se lograría con una medida de calidad en el sitio específico. Aún así, resulta en
49 información de menor incertidumbre y más detallada que la interpolación de mediciones terrestres si los
50 sitios de medición están separados más de algunas pocas decenas de kms. El estudio a escala diaria de
51 Gallegos y Lopardo (1988) demostró que en la Pampa Húmeda, al igual que en otras regiones, el error al
52 extrapolar la irradiancia solar medida puede ser alto incluso para distancias cortas.

53 La nueva serie de satélites geoestacionarios GOES de la NOAA¹ (GOES16 y GOES17) implementa el
54 producto llamado DSR (Downward Shortwave Radiation) mediante el cual se puede obtener una estima-
55 ción de irradiancia global horizontal (GHI) de las imágenes satelitales (Laszlo et al., 2020). Este nuevo
56 producto fue desarrollado por la STAR/NESDIS/NOAA² principalmente en el marco de la evaluación
57 del balance radiativo terrestre, fundamental para entender la dinámica atmosférica, la circulación oceáni-
58 ca y el calentamiento global, entre otros fines. Las estimaciones se generan a través de un modelo de
59 transferencia radiativa (RTM) que utiliza las imágenes hiperespectrales GOES (reflectancias en el es-
60 pectro solar), propiedades de nubes, aerosoles, agua precipitable, ozono, y albedo de superficie terrestre
61 obtenidos de productos GOES, e información auxiliar de modelos atmosféricos. Las estimaciones del
62 GOES-DSR son de libre acceso y están integradas a los mecanismos de distribución de información sate-
63 lital GOES. Los datos de GHI provistos por este producto han sido evaluados contra las mediciones de la
64 red SURFRAD en Estados Unidos (Laszlo et al., 2020) y en varios sitios de Oceanía, Asia y América del
65 Norte (Li et al., 2023). En particular, en Li et al. (2023) se compara el desempeño del GOES-DSR contra
66 otras bases de datos satelitales disponibles que utilizan RTM, encontrando un desempeño relativamen-
67 te bajo para este producto. Dicho trabajo incluye un único punto en Sudamérica (Florianópolis, Brasil),
68 pero no desglosa el desempeño en dicho sitio. Por tanto, el producto GOES-DSR aún no ha tenido una
69 evaluación específica en Latinoamérica.

70 En este trabajo se evalúa el desempeño de la estimación de GHI horaria del producto GOES-DSR en
71 dos sitios de Uruguay ubicados al norte y al sur del país. Se utiliza una estadística de tres años de datos
72 en cada sitio (2020-2022) y se compara el desempeño con la base de datos satelital CAMS³ que provee
73 estimaciones del modelo Heliosat-4 (Qu et al., 2017). Este modelo se toma como referencia debido a
74 su fácil acceso y a que ha sido evaluado previamente en esta región en varios trabajos (Gonzalez et al.,
75 2019; Laguarda et al., 2020, 2021; Iturbide et al., 2023; Sarazola et al., 2023). Esto permite establecer
76 dónde se ubica este nuevo producto en términos de desempeño, dado que el producto CAMS ya ha sido

¹National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Estados Unidos.

²Center for Satellite Applications and Research (STAR), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), Estados Unidos.

³Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

77 intercomparado en los trabajos previos con otras bases de información satelital disponibles. La evaluación
78 del GOES-DSR presentada aquí es la primera dedicada a sitios en Latinoamérica, y por extensión, en la
79 Pampa Húmeda sudamericana, donde se ubica el territorio de Uruguay.

MEDICIONES TERRESTRES

80 Los datos medidos fueron provistos por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República,
81 Uruguay. Se trata de datos horarios de irradiancia solar global horizontal (promediada en la hora) para
82 el periodo 2020-2022 y de dos sitios de dicho país, al Norte (LE) y al Sur (LB), según se muestran en
83 la Tabla 1. Estas medidas fueron registradas a escala minutal con piranómetros Kipp & Zonen CMP10,
84 de Clase A y respuesta espectral plana según la norma ISO 9060:2018. Estos datos son representativos
85 de un clima templado-cálido y húmedo con veranos calurosos, típico de la Pampa Húmeda, categorizada
86 como Cfa en la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007).

Tabla 1: Sitios de Uruguay analizados. LE: Norte del país. LB: Sur del país.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (metros s.n.m)
LB	-34.6720	-56.3401	38
LE	-31.2827	-57.9181	56

87 Cuando se dispone sólo de la medida de GHI, los controles de calidad que se pueden aplicar a las me-
88 diciones son relativamente limitados. En este caso, se aplicó un filtro de envolvente máxima basado en
89 el modelo de cielo claro ESRA (Rigollier et al., 2000). Este modelo de cielo claro depende de un único
90 parámetro conocido como Turbidez de Linke, T_L . Para utilizarlo como filtro de valores máximos de GHI,
91 se utiliza un valor bajo de turbidez, en este caso, $T_L = 2$, lo que es un valor suficientemente bajo para
92 actuar de esta manera en el territorio de Uruguay (Abal et al., 2017).

ESTIMACIÓN SATELITAL

93 La estimación satelital de GHI es un proceso por el cual se usan –principalmente– las imágenes de un sa-
94 télite geoestacionario para estimar la cantidad de irradiancia solar que llega a la superficie terrestre (Perez
95 et al., 2002). Esto es útil para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la evaluación y pronóstico
96 de recursos de energía solar, la planificación agropecuaria, y la modelización climática. Los modelos
97 basados en satélites tienen la ventaja de poder producir estimaciones en alta resolución espacial (1-2 km)
98 y temporal (10-15 mins) de la radiación solar sobre extensas regiones territoriales. Existen diversos ser-
99 vicios de datos que implementan algún modelo de estimación satelital, entre ellos se encuentran NASA
100 POWER Data Series, la National Solar Radiation Data Base del NREL⁴, LSA-SAF de EUMETSAT⁵ y
101 el servicio de CAMS, entre otras. Este trabajo analiza el producto DSR que ofrece la NESDIS/NOAA en
102 base a la nueva serie de satélites GOES.

103 *El satélite GOES-16*

104 El GOES16 es un satélite meteorológico de la nueva serie de satelites GOES que se lanzó en el año
105 2016 por la NOAA. Este satélite cuenta con una amplia gama de sensores que se utilizan para monitorear
106 y proporcionar información sobre la actividad meteorológica en tiempo real. Algunos de los sensores
107 incluidos en el GOES16 son: el ABI (Advanced Baseline Imager), que proporciona imágenes de alta
108 resolución de la Tierra en tiempo real y permite vigilancia meteorológica y elaboración de diversos pro-
109 ductos satelitales; el GLM (Geostationary Lightning Mapper) que se utiliza para detectar y monitorear la
110 actividad eléctrica en las nubes (rayos) en tiempo real; y el SEISS (Space Environment In-Situ Suite), que
111 se utiliza para monitorear la actividad solar y su impacto en la Tierra. La información de los sensores es
112 manipulada y combinada entre sí generando productos que pueden ser utilizados para diversos estudios

⁴National Renewable Energy Laboratory (NREL), Estados Unidos.

⁵European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), Alemania.

113 meteorológicos, del Sol, y del clima espacial. Puede consultarse la lista de los productos generados por
114 la serie GOES en <https://www.goes-r.gov/products/overview.html>.

115 ***El modelo DSR***

116 La sigla DSR se refiere a la radiación solar descendente de onda corta que llega a la superficie terrestre. El
117 producto GOES-DSR (Laszlo et al., 2020) utiliza el algoritmo híbrido ESP SRB (Enterprise Processing
118 System Shortwave Radiation Budget), desarrollado para estimar la DSR y la RSR (radiación solar refle-
119 jada al espacio exterior) a partir de las imágenes de reflectancia del ABI dentro del espectro solar. Este
120 proceso implica varios pasos, que incluyen la calibración de los datos del sensor, la corrección atmosférica
121 para el caso de cielo despejado, y la determinación de la cantidad de nubes y aerosoles presentes.

122 La implementación del algoritmo SRB se realiza de manera individual a nivel de píxeles. A cada píxel
123 se le asigna una de cuatro categorías: cielo despejado sin nieve/hielo, cielo despejado sobre nieve/hie-
124 lo, nube de agua y nube de hielo. El algoritmo considera dos caminos para establecer la estimación en
125 función de la disponibilidad de información de entrada de Nivel 2 (L2)⁶. Si se dispone de estimaciones
126 L2 de albedo de superficie, profundidad óptica de aerosoles y albedo de dispersión simple para escenas
127 despejadas, o profundidad óptica de nubes/radio/altura de tope para escenas nubladas, se selecciona una
128 secuencia de procesamiento denominada ruta directa. Si falta alguno de estos valores necesarios, se utili-
129 za otra secuencia denominada ruta indirecta. La disponibilidad de productos L2 de agua precipitable total
130 y ozono no se considera en la selección de la ruta, debiéndose tener en ambos casos. En caso de no haber
131 estimaciones L2 de estas cantidades, la información se toma del GFS (Global Forecast System).

132 La ruta directa es una adaptación del modelo CERES (Rutan et al., 2015; Fillmore et al., 2022), donde
133 se utilizan tablas de búsqueda precalculadas con el RTM de Fu y Liou (1993) utilizando como entrada
134 las variables descritas anteriormente, en particular, propiedades de nubes y aerosoles, albedo de super-
135 ficie, columna de agua precipitable y ozono. El RTM considera 18 bandas espectrales, lo que permite un
136 modelado adecuado de la dispersión de Rayleigh, la absorción por ozono y la absorción en el infrarrojo
137 cercano por otros gases minoritarios, procesos críticos para la radiación en cielo despejado. Para el caso
138 nublado, se utilizan las estimaciones L2 de la profundidad óptica de nubes, el tamaño de las partículas en
139 la nube y la altura del tope nuboso. Este enfoque es aplicado a escenas claras y nubladas, con distintas
140 tablas de búsqueda en cada caso, y con una serie de entradas que sea compatible con las capacidades
141 computacionales, dado que la cantidad de simulaciones escala en forma exponencial con la cantidad de
142 entradas y de bandas espectrales consideradas.

143 La ruta indirecta se utiliza cuando no se pueden obtener los productos L2 requeridos. En este caso, se
144 utilizan las reflectancias del ABI y relaciones precalculadas entre la transmisividad de la atmósfera y la
145 reflectividad en el tope de la atmósfera para los casos de cielo claro y cielo nublado (Pinker y Laszlo,
146 1992). Estas relaciones precalculadas dependen de otra serie de parámetros atmosféricos que se deben
147 estimar. Para ello se adoptan las mismas tablas de búsqueda que las utilizadas en la ruta directa, garanti-
148 zando un cálculo coherente de la transferencia radiativa. Estas tablas se interpolan, primero y para ambos
149 casos (despejado y nublado), con el ángulo cenital solar, la elevación del terreno, y la cantidad de vapor
150 de agua y de ozono. Para cielo despejado se interpolan además con el valor climatológico del albedo de
151 dispersión simple para aerosoles, y para cielo nublado por el radio efectivo de las nubes y la altura de
152 tope nuboso. Como resultado, se obtienen los valores faltantes para establecer la relación transmitancia-
153 reflectancia, y así calcular los flujos de radiación de onda corta. Más detalles se pueden consultar en
154 Laszlo et al. (2020).

155 ***Acceso a las estimaciones GOES-DSR***

156 Los estimativos de GOES-DSR fueron obtenidos mediante el servicio en la nube Amazon S3 proporci-
157 onado por la NOAA para hacer disponible la descarga de las imágenes satelitales y productos de GOES. En

⁶Esta es una forma usual de referirse a los productos satelitales derivados de la información medida por el satélite, usualmente por modelos, parametrizaciones, o combinaciones de bandas espectrales.

158 <https://github.com/awslabs/open-data-docs/tree/main/docs/noaa/noaa-goes16> puede consultarse la docu-
 159 mentación para descargar los estimativos. De la descarga se obtiene el producto GOES-DSR para toda la
 160 imagen full-disk (disponible a todas las horas en punto), de las cuales se construyeron las series tempo-
 161 rales para los sitios de estudio.

RESULTADOS

162 Los valores de GHI medidos fueron comparados contra las estimaciones del modelo Heliosat-4, descar-
 163 gado del portal CAMS, y del producto GOES-DSR para ambos sitios de estudio. Las métricas utilizadas
 164 para la evaluación del desempeño son la desviación estándar STD, el error absoluto medio MAE, la des-
 165 viación media del sesgo MBD y el desvío cuadrático medio RMSE, que se definen como,

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}, \quad \text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}, \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}, \quad \text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}},$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}},$$

166 donde y e \hat{y} son los valores de GHI medidos y estimados por los modelos, respectivamente, $e = \hat{y} - y$ es
 167 el error de estimación, n es el tamaño de la muestra, y \bar{x} denota la media de la variable. Los indicadores
 168 de la primera fila pueden expresarse en términos relativos como porcentaje de la media de las medidas
 169 (\bar{y}), denominados aquí MBE %, MAE %, RMSE %, y STD %, respectivamente.

170 *Evaluación de los modelos*

171 En la Tabla 2 se muestran los distintos indicadores del desempeño en valores absolutos de cada uno de
 172 los modelos. En ambos sitios se observa que el modelo Heliosat-4 presenta una subestimación respecto
 173 a la medida con $\text{MBE} \simeq -6 \text{ W/m}^2$, por el contrario, en términos generales GOES-DSR sobrestima el
 174 recurso entorno con un $\text{MBE} \simeq +15 \text{ W/m}^2$. Esta es una diferencia marcada entre ambos estimativos. El
 175 resto de las métricas son consistentes entre sí, y muestran un desempeño inferior del GOES-DSR frente
 176 al Heliosat-4, con mayor dispersión en las tres métricas consideradas y menor correlación.

Tabla 2: Indicadores de desempeño en términos absolutos.

Código de estación	Modelo satelital	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	STD (W/m ²)	r (adim.)
LB	Heliosat-4	-6.3	43.2	71.4	71.1	0.97
LB	GOES-DSR	14.0	50.0	88.5	87.3	0.95
LE	Heliosat-4	-7.0	42.1	69.1	68.8	0.97
LE	GOES-DSR	15.1	52.0	90.8	89.6	0.95

177 La Tabla 3 muestra los indicadores de desempeño porcentuales expresados en términos relativos respecto
 178 a la media de la medida. En términos cuantitativos, se obtuvieron, para LE y LB respectivamente, valores
 179 de MBE de -1.5 % y -1.6 %, y RMSE % de 17.0 % y 18.0 % para el Heliosat-4, mientras que para GOES-
 180 DSR se encontraron MBE de 3.2 % y 3.1 % y RMSE de 19.3 % y 19.8 %. El valor de 17-18 % obtenido
 181 para los estimativos del portal CAMS es consistente con los hallados en Laguarda et al. (2020), donde se
 182 encontró un RMSE % promedio en Uruguay de 17.9 %, y de 17.3 % y 17.5 % respectivamente para estos
 183 sitios. Esto permite establecer que la comparación realizada aquí es consistente y puede ser tomada como
 184 referencia para comparar con otras evaluaciones de modelos satelitales realizadas en la región. Esto ubica
 185 al modelo GOES-DSR cómo un modelo con desempeño un poco inferior a otras alternativas disponibles
 186 en la región, de los evaluados hasta la fecha (Sarazola et al., 2023).

Tabla 3: Indicadores de desempeño expresados en términos relativos.

Código de estación	Modelo satelital	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)	STD (%)
LB	Heliosat-4	-1.6	10.5	17.0	16.9
LB	GOES-DSR	3.1	11.15	19.8	19.5
LE	Heliosat-4	-1.5	9.0	18.0	14.6
LE	GOES-DSR	3.2	11.0	19.3	19.0

187 En las Figs. 1 y 2 se presentan los gráficos de dispersión entre la medición terrestre y la estimación de
 188 cada modelo, para las estaciones de LE y LB respectivamente. A simple vista se observa una mayor
 189 dispersión de las estimaciones del modelo GOES-DSR en comparación al Heliosat-4 para condiciones
 190 de baja irradiancia en ambos sitios.

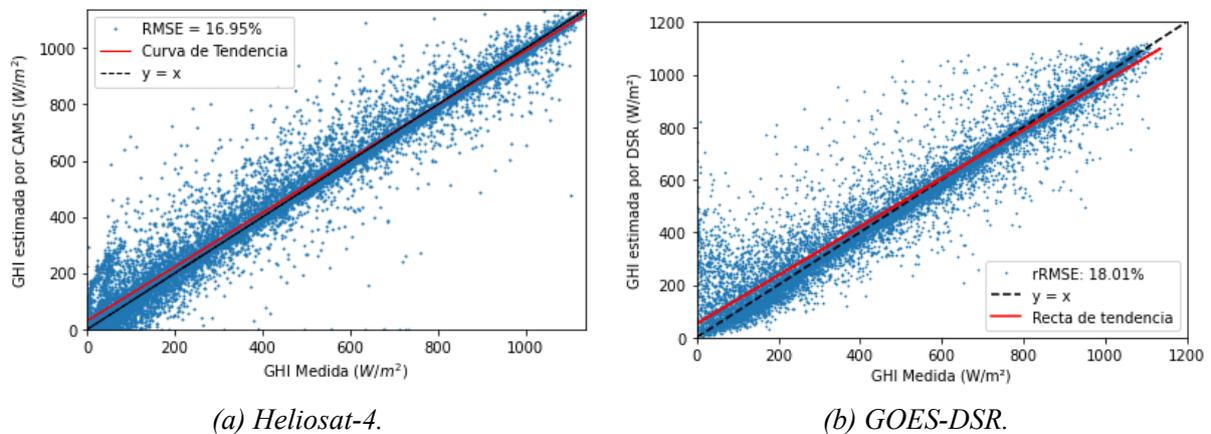


Figura 1: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para la estación LE.

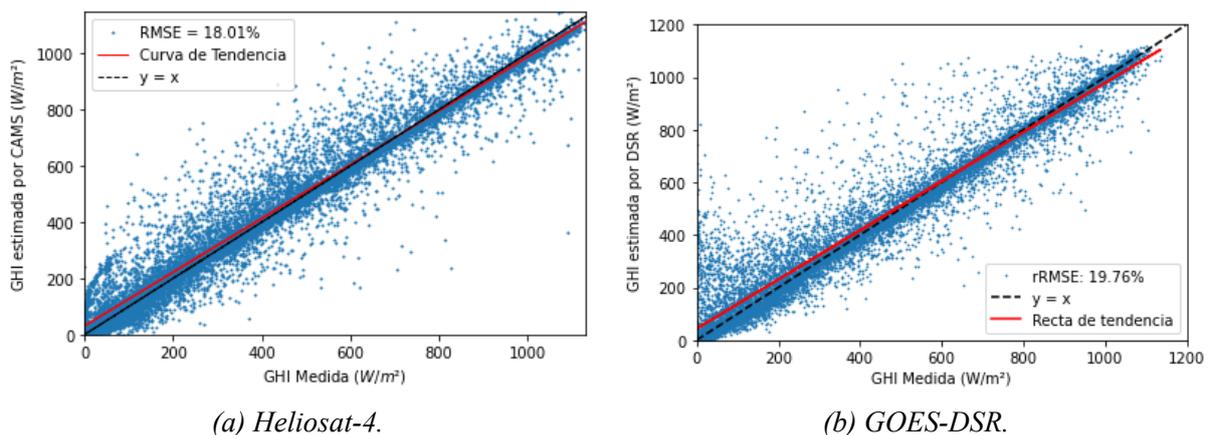


Figura 2: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para la estación LB.

191 Discriminación del desempeño

192 Para profundizar la evaluación y comparación de los modelos, se evaluó el RMSE % en función de la
 193 altura solar (α_s) y el índice del claridad (k_t), definido como el cociente entre la GHI y el correspondiente
 194 valor en el tope de la atmósfera, y la declinación solar, como proxy para la evolución anual.

195 La variación del desempeño como función de α_s y k_t se muestra en las Figs. 3 y 4, respectivamente.
 196 En ambos casos se observa un menor desempeño del GOES-DSR en comparación al Heliosat-4 para la
 197 mayoría de las condiciones, exceptuando las condiciones de cielo despejado ($k_t > 0.65$) donde ambos

198 presentan desempeños similares. Cabe destacar que para condiciones de alta claridad, i.e. $k_t \simeq 0.75$, el
 199 GOES-DSR funciona levemente mejor que CAMS, ya que su RMSE % es menor por aproximadamente
 200 un 1%. La diferencia de desempeños se acentúa notoriamente para alturas solares bajas ($\alpha_s < 20^\circ$) y
 201 cielo totalmente cubierto por nubosidad ($k_t < 0.25$), donde el desempeño del GOES-DSR disminuye
 202 notoriamente, superando en RSMD % en más de un 300% al de CAMS para $\alpha_s < 10^\circ$. Notar que los
 203 valores porcentuales de error se disparan para k_t muy bajo debido a que la media de normalización es
 204 significativamente menor en estas condiciones.

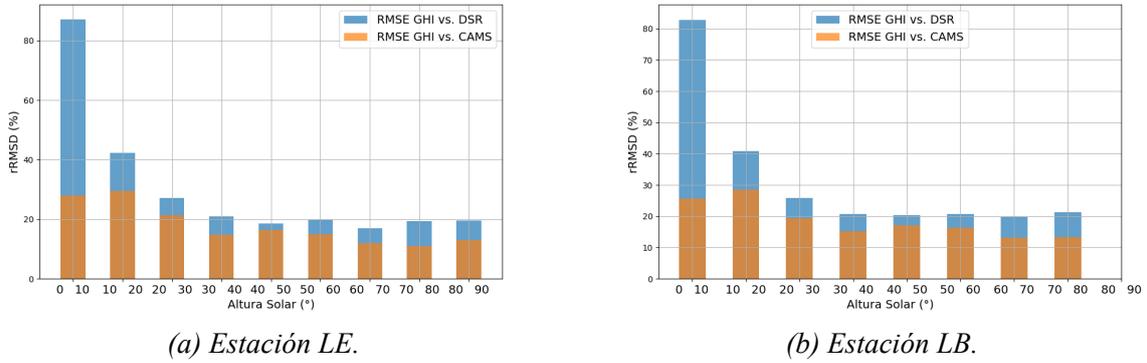


Figura 3: RMSE % como función de la altura solar.

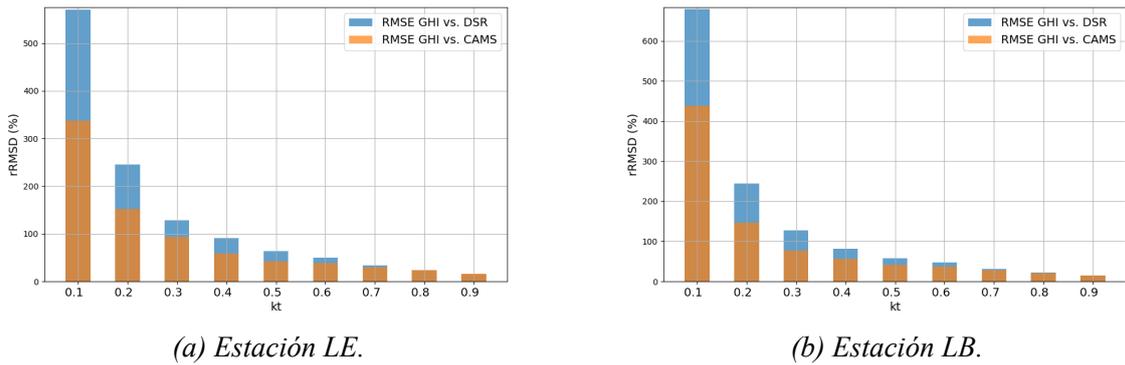


Figura 4: RMSE % como función del índice de claridad.

205 La variación del RMSE % con el ángulo de declinación solar se muestra en la Fig. 5. Se puede observar
 206 que el error de ambos modelos tiende a incrementarse en los días correspondientes al otoño austral. Esta
 207 es la primera vez que se analiza la estacionalidad del error de la estimación satelital en la región, dado
 208 que en general es un comportamiento que se estudia poco a pesar de ser relevante.

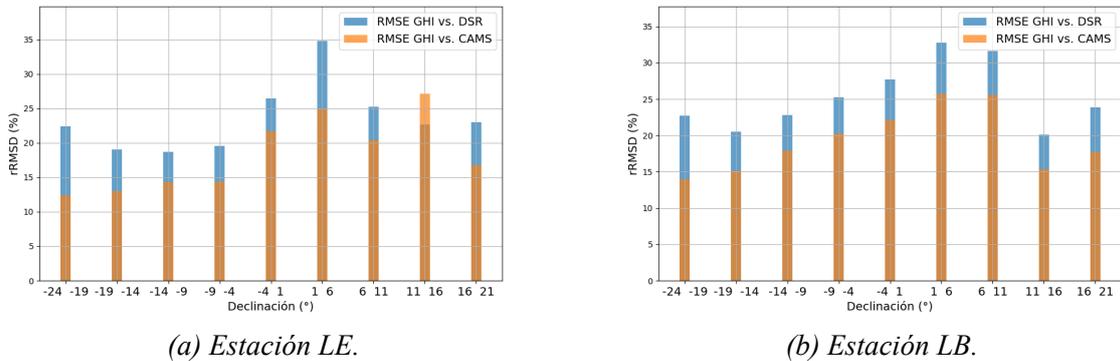


Figura 5: RMSE % como función de la declinación solar.

CONCLUSIONES

209 El modelo GOES-DSR presenta una mayor incertidumbre en Uruguay respecto a los valores estimados
210 por el modelo Heliosat-4. En condiciones de cielo claro ambos modelos tienen un RMSE % similar,
211 teniendo incluso el modelo GOES-DSR un 1 % de ganancia para las condiciones de cielo muy despejado.
212 Dejando esa condición particular de lado, el modelo GOES-DSR presenta menor desempeño para el resto
213 de las condiciones, en particular, para valores de nubosidad intermedia y total, y para todas las alturas
214 solares. Para altos niveles de nubosidad y muy baja altura solar la diferencia entre ambos modelos se
215 incrementa significativamente.

216 Ambos modelos presentan un error que aumenta conforme disminuye la altura solar y el índice de cla-
217 ridad. Este aspecto ya fue estudiado para el CAMS en Laguarda et al. (2020), obteniéndose el mismo
218 comportamiento. Este problema es mayor en la estimación del modelo GOES-DSR (su manual reco-
219 mienda la utilización de este producto para alturas solares mayores a 20°). Los modelos satelitales de
220 estimación de irradiancia solar asumen en general ciertas características atmosféricas y geométricas. A
221 alturas solares bajas, estas suposiciones pueden volverse menos precisas debido a efectos atmosféricos y
222 geométricos más pronunciados. Por lo tanto, es importante considerar estas limitaciones al interpretar las
223 estimaciones de irradiancia solar en diferentes momentos del día y en diferentes ubicaciones geográficas.

224 El desempeño evaluado para el Heliosat-4 coincide con otras evaluaciones hechas para la misma región.
225 La comparación relativa entre ambos permite ubicar aproximadamente a las estimaciones GOES-DSR
226 en un ranking de desempeño regional. Resulta claro que este modelo presenta un desempeño menor al
227 de CAMS, que de por sí no es la mejor opción satelital para la región bajo estudio. Esto se debe a que
228 el portal CAMS utiliza imágenes del satélite Meteosat como entrada al modelo Heliosat-4, que tiene un
229 elevado ángulo de visión sobre la Pampa Húmeda. La comparación hecha aquí ubica al GOES-DSR como
230 una alternativa satelital de desempeño inferior a otras alternativas satelitales disponibles en la región, pero
231 mejor que datos de reanálisis de modelos numéricos de atmósfera como MERRA2.

AGRADECIMIENTOS

232 Los coautores del Laboratorio de Energía Solar agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Cien-
233 tífica (CSIC), Udelar, por el apoyo financiero a través de su programa de Grupos de I+D.

REFERENCIAS

- 234 Abal, G., Aicardi, D., Suárez, R. A., y Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse
235 fraction in Uruguay. *Solar Energy*, 141:166–181.
- 236 Fillmore, D., Rutan, D., Kato, S., Rose, F., y Caldwell, T. (2022). Evaluation of aerosol optical depths and
237 clear-sky radiative fluxes of the CERES Edition 4.1 SYN1deg data product. *Atmospheric Chemistry
238 and Physics*, 22(15):10115–10137.
- 239 Fu, Q. y Liou, K. N. (1993). Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *Journal of
240 Atmospheric Sciences*, 50(13):2008 – 2025.
- 241 Gallegos, H. G. y Lopardo, R. (1988). Spatial variability of the global solar radiation obtained by the
242 solarimetric network in the Argentine pampa húmeda. *Solar Energy*, 40(5):397–404.
- 243 Gonzalez, J., Teixeira-Branco, V., y Alonso-Suárez, R. (2019). Evaluation of the Heliosat-4 and
244 FLASHFlux models for solar global daily irradiation estimate in Uruguay. En *ISES Conf. Pro-
245 ceedings, Solar World Congress*. URL: [https://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0197-
246 TeixeiraAlvesBranco.pdf](https://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0197-TeixeiraAlvesBranco.pdf).
- 247 Iturbide, P., Alonso-Suarez, R., y Ronchetti, F. (2023). An analysis of satellite-based machine learning
248 models to estimate global solar irradiance at a horizontal plane. En Naiouf, M., Rucci, E., Chichizola,
249 F., y De Giusti, L., editores, *Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics*, pp. 118–128, Cham.
250 Springer Nature Switzerland.

- 251 Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted cams
252 database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over
253 the pampa húmeda. *Solar Energy*, 199:295–307.
- 254 Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M., Luza, S., Burgos, B., Stern, V., y Alonso-Suárez, R.
255 (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia
256 solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48:1–9.
- 257 Laszlo, I., Kim, H.-Y., y Liu, H. (2020). *Algorithm Theoretical Basis Document For Downward Short-*
258 *wave Radiation (Surface), and Reflected Shortwave Radiation (TOA), Enterprise Processing System*
259 *(EPS) Version*. NOAA/NESDIS/STAR.
- 260 Li, R., Wang, D., Wang, W., y Nemani, R. (2023). A GeoNEX-based high-spatiotemporal-resolution
261 product of land surface downward shortwave radiation and photosynthetically active radiation. *Earth*
262 *System Science Data*, 15(3):1419–1436.
- 263 McMahan, A., Grover, C., y Vignola, F. (2013). Evaluation of resource risk in solar-project financing.
264 En Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 81–95. Academic Press,
265 Boston.
- 266 Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate
267 classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11:1633–1644.
- 268 Perez, R., Ineiche, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., y Vignola, R. G. F. (2002). A new operational
269 model for satellite-derived irradiances: Description and validation. *Solar Energy*, 73:307–317.
- 270 Perez, R., Seals, R., y Zelenka, A. (1997). Comparing satellite remote sensing and ground network
271 measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, 60(2):89–96.
- 272 Pinker, R. T. y Laszlo, I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global
273 scale. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31(2):194 – 211.
- 274 Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, C., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L.,
275 Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing
276 the surface solar irradiance: the Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- 277 Rigollier, C., Bauer, O., y Ward, L. (2000). On the clear sky model of the esra– european solar radiation
278 atlas– with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, p. 33–48.
- 279 Rutan, D., Kato, S., Doelling, D., Rose, F., Nguyen, L., Caldwell, T., y Loeb, N. (2015). CERES synoptic
280 product: Methodology and validation of surface radiant flux. *Journal of Atmospheric and Oceanic*
281 *Technology*, 32(6):1121 – 1143.
- 282 Sarazola, I., Laguarda, A., Ceballos, J. C., y Alonso-Suárez, R. (2023). Benchmarking of modeled solar
283 irradiation data in uruguay at a daily time scale. *IEEE Latin American Transactions*, 21(9):1040–1048.
- 284 Schnitzer, M., Thuman, C., y Johnson, P. (2012). The impact of solar uncertainty on project financeability:
285 mitigating energy risk through on-site monitoring. En *Proceedings of the American Solar Energy*
286 *Society (ASES)*, pp. 1–5, Denver, Colorado, United States.
- 287 Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., y Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly
288 irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62(3):199–207.

289
290

EVALUATION OF THE GLOBAL SOLAR IRRADIANCE MODEL DSR FROM GOES-16 IN URUGUAY

291 **ABSTRACT:** Solar resource information is essential for the development of solar energy applications.
292 In the absence of quality ground measurements or satellite estimates with locally adapted models, users
293 tend to rely on the available databases. These databases are usually composed of generic satellite-based
294 estimates or atmospheric modeling data that do not always achieve adequate performance. Knowing the
295 performance of such tools is therefore important to better advise solar sector's users. This study evaluates
296 for the first time in Uruguay the performance of the GOES-16 solar global horizontal irradiance (DSR)
297 product developed by NESDIS/NOAA. The Heliosat-4 model, long evaluated in this region, is included in
298 the analysis as a reference. The comparison shows that the GOES-DSR product does not outperform in the
299 region the Heliosat-4 estimates, with a relative RMSE of $\simeq 19-20\%$, a standard deviation of $\simeq 95\text{ W/m}^2$
300 and a relative MBE of $\simeq +3\%$ compared to the Heliosat-4's RMSE of 17-18%, STD of 70 W/m^2 , and
301 MBE of -1.5% . The Heliosat-4 metrics are consistent with previous evaluations in Uruguay.

302 **Keywords:** solar irradiance, GHI, satellite-based estimation, Uruguay, GOES-DSR, Heliosat-4