

VALIDACIÓN DE MODELOS SATELITALES HELIOSAT-4 Y CIM-ESRA PARA LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR EN LA PAMPA HÚMEDA

A. Laguarda¹, P. Iturbide², X. Orsi², M. J. Denegri^{2,3}, S. Luza²,
B. L. Burgos³, V. Stern² y R. Alonso-Suárez¹

¹Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Udelar), Herrera y Reissig 565, CP:11300, Montevideo, Uruguay.

²Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Univ. Nacional de Luján. Ruta 5 y 7, Luján, CP 6700, Buenos Aires. (54) (2323) 442041.

³Departamento de Tecnología, Univ. Nacional de Luján.
E mail: laguarda@fing.edu.uy

Recibido:31/082021; Aceptado: 31/102021; Publicado en línea: 03-02-2022.

RESUMEN.- En este trabajo se validan las estimaciones de irradiancia solar de los modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la Pampa Húmeda utilizando las mediciones terrestres de 4 estaciones solarimétricas de la región, 2 de Argentina y 2 de Uruguay. Los modelos son de diferente naturaleza y están basados en diferentes satélites, el Meteosat Second Generation (MSG) y GOES-East (GOES16). La evaluación se realiza a escala 10-minutal para toda condición de cielo y para muestras con índice de claridad alto (a lo que llamaremos *condiciones de cielo mayoritariamente despejado*). Se utilizan métricas de desempeño estándar y se evalúan las versiones operativas de ambos modelos. Se encontró un mejor desempeño para el modelo CIM-ESRA, observándose resultados similares en los sitios para los cuáles los parámetros de este modelo fueron ajustados y en sitios independientes.

Palabras clave: Recurso solar. GHI. Heliosat-4. CIM-ESRA. CAMS.

VALIDATION OF HELIOSAT-4 AND CIM-ESRA SATELLITE MODELS FOR ESTIMATING SOLAR IRRADIANCE IN THE PAMPA HÚMEDA

ABSTRACT.- In this work, the solar irradiance estimates of the Heliosat-4 and CIM-ESRA satellite models are validated for the Pampa Húmeda region using ground measurements from 4 solarimetric stations, 2 in Argentina and 2 in Uruguay. The models are of a different nature (physical vs. semi-empirical) and are based, respectively, on the Meteosat Second Generation (MSG) and GOES-East (GOES16) satellites. The evaluation is performed on a 10-minute time scale for all-sky conditions and for samples with high clarity index (which we will call mostly clear-sky conditions). The evaluation is done by using standard performance metrics and the operational versions of both models are assessed. A better performance was found for the CIM-ESRA model, and similar results were observed at stations where the model's parameters were adjusted and at independent stations, where the model was not specifically trained.

Keywords: Solar resource. GHI. Heliosat-4. CIM-ESRA. CAMS.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar incidente es la principal fuente de energía del planeta y uno de los factores clave del desarrollo económico. Conocer las características de la irradiación solar sobre un sitio es esencial para multitud de aplicaciones, que incluyen sistemas de generación de energía eléctrica mediante recurso solar, modelos de crecimiento de cultivos y estimaciones de evapotranspiración entre otros (Chen et al., 2007). La forma más precisa de lograr este conocimiento es con varios años de mediciones de calidad *in-situ*. Esta información no es en general accesible en sitios arbitrarios, principalmente debido a los costos del instrumental, necesidad de supervisión y mantenimiento sostenido durante

años. Una alternativa para suplir estas carencias es el uso de modelos que estiman la irradiancia solar basados en información de satélites geoestacionarios, de gran cobertura espacial y temporal. La incertidumbre de estos modelos puede variar según cada región por diversas causas, como el clima local o la capacidad del satélite para relevar cada región. En ese sentido es necesario contar con medidas en tierra de calidad para caracterizar el desempeño de los modelos sobre un territorio, o incluso complementar y mejorar la calidad de los estimativos obtenidos a través de correcciones o post-procesos (Polo et al., 2016).

En este trabajo se utilizarán medidas de 4 estaciones en la Pampa Húmeda para validar dos modelos satelitales de

diferente naturaleza: CIM-ESRA (Laguarda et al., 2020) y CAMS (Qu et al., 2017). El primero es un modelo semi-empírico que se basa en información del canal visible del satélite GOES-16 (ubicado sobre la latitud 75° W), operado por la NOAA, mientras que el segundo es un modelo físico basado en información del satélite Europeo Meteosat Second Generation (MSG, ubicado sobre el meridiano de Greenwich).

2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS SATELITALES

2.1. Modelo CIM-ESRA.

El modelo CIM-ESRA (Laguarda et al., 2020; Laguarda, 2021) es un modelo híbrido que replica la estrategia utilizada por modelos satelitales como SUNY (Perez et al., 2002; 2015) o Heliosat-2 (Rigollier et al., 2004). En ellos la irradiación global horizontal se estima como la irradiación que habría en condiciones de cielo despejado modulada por un factor empírico basado en un índice de nubosidad (CIM se debe a *Cloud Index Model*) obtenido de información satelital. Es decir,

$$I = I_{cs} F(C) \quad (1)$$

donde I es la irradiación estimada, I_{cs} es la irradiación que habría en condiciones de cielo claro (estimada por un modelo) y F es el factor de atenuación por nubosidad determinado empíricamente que a su vez depende de un índice de nubosidad (C) obtenido a partir de imágenes satelitales. Como modelo de cielo claro, CIM-ESRA utiliza a ESRA (Rigollier et al., 2000), cuya única variable de entrada es la turbidez de Linke para una masa de aire igual a dos, TL (Linke, 1922). Esta variable representa el estado de la atmósfera sin nubes en un solo parámetro, incluyendo los efectos de aerosoles y vapor de agua. En su versión operativa sobre la Pampa Húmeda, CIM-ESRA utiliza un único ciclo estacional de TL determinado previamente como el promedio de los ciclos medios de TL estimados sobre 10 estaciones en la región (Laguarda y Abal, 2016; Laguarda, 2021). El índice de nubosidad C es en esencia el albedo terrestre (o reflectancia planetaria, R), normalizada en cada píxel de la imagen por un rango dinámico de valores máximos y mínimos, que dependen del día del año y de la hora del día,

$$C = (R - R_{min}) / (R_{max} - R_{min}) \quad (2)$$

donde R se obtiene de imágenes del canal visible del satélite geoestacionario GOES-East, y R_{min} y R_{max} representan las reflectancias mínimas y máximas esperadas en un píxel en cierto instante. R_{min} es determinado con una parametrización simple en función de la posición relativa entre el satélite y el Sol a través de un proceso iterativo (Alonso-Suárez, 2017) y R_{max} se asume constante (Laguarda et al., 2018). El factor de atenuación por nubosidad F utilizado es lineal en C y sus dos parámetros son ajustados empíricamente a cada sitio. La versión operativa del modelo utiliza el promedio espacial de los parámetros empíricos obtenidos en diez sitios de la Pampa Húmeda. Esto no supone gran pérdida de precisión, dado que los parámetros presentan baja variabilidad espacial en la región (Laguarda, 2021). En este trabajo se valida por primera

vez la versión operativa de CIM-ESRA y es además su primera evaluación a nivel sub-horario (10-minutal), donde se utilizan medidas de dos sitios de la región en donde el modelo no fue específicamente ajustado.

2.2. Modelo CAMS (Heliosat-4).

El modelo operativo del Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) es el Heliosat-4 (Qu et al., 2017). Este modelo se conforma de dos sub-modelos físicos combinados: McClear (Lefevre et al., 2013), que estima la irradiancia en condiciones de cielo claro, y McCloud, que estima el efecto de la nubosidad. Tanto McClear como McCloud se basan en salidas del modelo de transferencia radiante LibRadTran (Emde et al., 2016), de alto costo computacional. McClear utiliza como entrada información sobre aerosoles, columna de agua precipitable y ozono obtenidas de la base de reanálisis CAMS y estimaciones diarias del albedo terrestre obtenidas por el instrumento satelital MODIS. McCloud estima la atenuación de la radiación solar en superficie en presencia de nubes con imágenes MSG, y la utilización de la metodología APOLLO/SEV. Los estimativos de Heliosat-4 están disponibles en <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service> para la cobertura geográfica del satélite MSG y son de amplia utilización (por su parte, el modelo McClear está disponible con cobertura global). Si bien la información atmosférica utilizada por CAMS tiene frecuencia trihoraria con resolución de 50-150 km y las imágenes MSG tiene frecuencia 15-minutal, el sitio provee estimativos de radiación solar en superficie para cualquier ubicación en su cobertura con resolución temporal de hasta 1 minuto utilizando interpolaciones espaciales y temporales.

3. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la validación los modelos CIM-ESRA y Heliosat-4 se comparan sus estimativos de GHI con medidas en tierra 10-minutales de cuatro estaciones para el período 2018-2020. Dos de ellas son parte de la red solarimétrica que el GERSolar administra junto al INTA y se ubican en Luján y Paraná, Argentina. Las otras dos pertenecen a la Red de Medida Continua de la Irradiancia Solar (RMCIS) que mantiene el Laboratorio de Energía Solar (LES, <http://les.edu.uy/>), Universidad de la República, y se ubican en Colonia y en Montevideo, Uruguay. En la Tabla 1 se indica la información de cada estación, incluyendo la cantidad de datos totales y la cantidad de datos de cielo mayormente despejado, a partir de una discriminación por índice de claridad modificado (Ec. 5).

3.1. Medidas en tierra.

Las estaciones de la Red solarimétrica que GERSolar administra junto al INTA cuentan con adquirentes de datos de la firma Campbell Scientific y piranómetros Kipp & Zonen (K&Z), que son regularmente calibrados en el Laboratorio de Calibración que el GERSolar opera en el predio de la Universidad Nacional de Luján (Righini y Aristegui, 2015). Las estaciones de la RMCIS utilizan adquirentes Fisher Scientific y piranómetros K&Z, calibrados en régimen bi-anual en el LES contra un piranómetro K&Z CMP22 con trazabilidad al patrón mundial del WRC/PMOD en Davos, Suiza. En la Tabla 1 se indican las especificaciones del instrumental de cada estación considerada.

Tabla 1: Ubicación de las estaciones de medida y sus equipos de medición. En las últimas dos columnas se indica el número de muestras (N) 10 minutas utilizadas y el subconjunto de muestras con $ktp > 0,7$ (cielo mayormente despejado). La información es del período 2018-2020.

Estación	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altura (m)	Equipo	N totales	N cielo claro
Luján, ARG	-34,5880	-59,0625	29	KZ CMP11 y CMP21	58.204	30.797
Paraná, ARG	-31,8488	-60,5362	105	KZ CMP11	69.258	36.771
Colonia, URU (La Estanzuela)	-34,3380	-57,6904	70	KZ CMP6	65.911	34.989
Montevideo, URU (F.Ingeniería)	-34,9182	-56,1665	58	KZ CMP6	66.564	34.266

En todas las estaciones se registran medidas con resolución temporal minutil y luego son promediadas de forma de obtener la irradiancia 10-minutil, siguiendo el criterio de que cada promedio cuente con al menos 2/3 de los datos minutales correspondientes. Las series de medidas 10 minutas de GHI son luego sometidas a un algoritmo de control de calidad conformado por cuatro filtros sucesivos y una inspección visual de las series para eliminar períodos de sombreado u otros períodos defectuosos. El objetivo es conformar un conjunto de valores típicos, donde se excluyen tanto datos ausentes o afectados por algún tipo de error, como mediciones válidas pero afectadas por fenómenos aislados o de corta duración (como sobre-irradiancias) (Aristegui et al., 2019). Los filtros de calidad se resumen en la Tabla 2 y se describen a continuación.

El filtro 1 impone una altura solar (α_s) mínima de 7° y tiene el objetivo de eliminar las muestras con más error instrumental, que se corresponden con el amanecer y anochecer. El filtro 2 impone las cotas sugeridas por la BSRN (Long y Shi, 2008) para valores extremadamente raros,

$$-2 \text{ W/m}^2 < I_h < 1,2 I_0 \cos \theta_z^{1,2} + 50 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

donde θ_z es el ángulo cenital. Este criterio, ampliamente utilizado, supone un filtrado básico, eliminando únicamente valores físicamente posibles pero altamente improbables. El filtro 3 consiste en imponer como envolvente superior admitida a los estimativos del modelo de irradiancia solar en condiciones de cielo claro ESRA para una turbidez atmosférica muy baja ($TL = 1,8$, determinado por inspección visual). Este filtro viene ajustado por las cotas según la ecuación:

$$0 \text{ W/m}^2 < I_h < I_h^{ESRA}(TL = 1,8) \quad (4)$$

Por último, el filtro 4 impone un valor máximo al índice de claridad modificado por Pérez, ktp (Perez et al., 1990). Este índice se define como

$$ktp = kt / (1,031 \exp[-1,4 / (0,9 + 9,4/m)] + 0,1) \quad (5)$$

donde kt es el índice de claridad usual (cociente entre la GHI medida en superficie y la irradiancia horizontal en el tope de la atmósfera) y m es la masa de aire. Así definido ktp es análogo al índice de claridad, pero sin su dependencia característica con la altura solar. La cota impuesta a ktp en el filtro 4 es de 0.89, determinada por exploración visual de los datos.

Los filtros 2, 3 y 4 son conceptualmente similares y consisten en proponer un rango de valores permitidos (cota inferior y superior) a los valores de irradiancia a través de diferentes expresiones que dependen de la altura solar. En particular, los filtros 3 y 4 brindan una cota superior más ajustada que la de BSRN. En la penúltima columna de la Tabla 1 se indica el número de muestras que pasan todos los filtros en cada sitio (N totales).

3.2. Estimativos de los modelos.

Se descargaron los estimativos de GHI de Heliosat-4 a escala minutil para las ubicaciones de las estaciones desde el portal web de CAMS. La serie fue luego promediada para obtener una base 10-minutil con el mismo criterio utilizado para las medidas en tierra (exigiendo al menos 2/3 de datos válidos). Con respecto a CIM-ESRA, se descargaron los estimativos de GHI del servicio web que provee el LES para algunos sitios pre-configurados en Sudamérica (<http://les.edu.uy/online/stack-loc/>). Estos estimativos están generados a escala 10-minutil (que es la frecuencia del canal visible del satélite GOES-16). Actualmente el LES cuenta con capacidad de generar estimativos en el período de 2018 a la fecha a nivel 10 minutil para cualquier ubicación de la Pampa Húmeda. Sin embargo, el portal LES se encuentra en construcción y en su estado actual solo provee estimativos generados automáticamente para alrededor de 60 sitios pre-configurados, entre los que se encuentran los considerados para este trabajo.

Para evaluar el desempeño de los modelos se utilizan las métricas usuales en el área: el desvío medio relativo (rMBD) y el error cuadrático medio relativo (rRMSD), ambos expresados en forma porcentual (con respecto a la media de las medidas), y el coeficiente de determinación o correlación de Pearson. Para los análisis estadísticos se utilizaron las herramientas Python y SAS.

Tabla 2: Filtros aplicados a las medidas de tierra.

	Criterio	Descripción
Filtro 1	$\alpha_s > 7^\circ$	Altura Solar mínima
Filtro 2	$-2 \text{ W/m}^2 < I_h < 1,2 I_0 \cos\theta_z^{1,2} + 50 \text{ W/m}^2$	Cotas de la BSRN (Long y Shi, 2008)
Filtro 3	$0 \text{ W/m}^2 < I_h < I_h^{ESRA} (TL = 1,8)$	Cotas de un modelo de cielo claro
Filtro 4	$ktp < 0,89$	Cota al índice de claridad de Pérez

La validación se llevó a cabo considerando dos casos: toda condición de cielo y cielo mayormente despejado. Para el segundo caso se selecciona el subconjunto de muestras que cumplen $ktp > 0,7$. Este criterio no es muy preciso para seleccionar muestras de cielo despejado, pero es conveniente para estudiar el comportamiento del modelo cuando se tienen altos valores de irradiación. El número de datos con este criterio se muestra en la última columna de la Tabla 1.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Toda condición de cielo.

En la Tabla 3 se muestran las métricas de desempeño obtenidas de ambos modelos para toda condición de cielo. En la última fila se indica el promedio de las medidas en cada sitio, cantidad de referencia utilizada en las expresiones

porcentuales. Para cada modelo, las métricas obtenidas muestran valores similares sobre los cuatro sitios. En el caso de CAMS, el desvío medio es negativo con valores entre -1,4 y -2,4%, excepto en Montevideo, donde presenta el mayor desvío, de -5%. Los rRMSD se encuentran en el entorno de 20-22% en todos los casos. El desempeño de CAMS es bueno y comparable a trabajos previos como (Laguarda et al., 2020), sobre todo teniendo en cuenta que la Pampa Húmeda se encuentra fuera del área recomendada para el uso de CAMS debido a los problemas que tiene el MSG en relevar esta región con elevados ángulos de visión (Schroedter-Homscheidt et al., 2018). En el caso del modelo CIM-ESRA, las métricas de desempeño son también similares en todos los sitios, mostrando un desempeño aún superior al de CAMS. En este caso el desvío tiende a ser positivo, con valores medios entre 1 y 2%, y desvíos cuadráticos en el entorno de 15-17%. Las correlaciones son superiores a 0,94 en todos los casos.

Tabla 3: Resultados de las métricas para toda condición de cielo.

GHI para toda condición de cielo (2018-2020)								
Métricas	Luján		Paraná		Colonia		Montevideo	
	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA
R	0,953	0,970	0,946	0,969	0,959	0,973	0,957	0,976
rMBD (%)	-1,4	+1,7	-2,0	+2,2	-2,4	+0,7	-5,0	+1,2
rRMSD (%)	20,8	16,7	21,9	16,5	19,6	15,8	21,0	15,6
GHI media (W/m ²)	442,1		449,7		445,9		437,4	

En la Figura 1 se muestran los diagramas de dispersión para ambos modelos en los sitios de Luján y Montevideo contra los datos medidos. Se indica en colores claros las regiones con mayor densidad de datos. Los diagramas de dispersión muestran que la mayoría de las muestras se encuentran

cercanas a la recta $x=y$, lo que implica una buena correspondencia entre los datos medidos y los estimados. También se observa una mayor dispersión general de puntos en el caso de CAMS con respecto a CIM-ESRA (la nube de puntos en el caso de CAMS es más “ancha”), lo cual se

condice con los resultados mostrados en la Tabla 3. Del análisis de estos gráficos también se desprende que los modelos tienen mayor dificultad para estimar con precisión las irradiancias bajas (menores a 200 W/m^2), y que

presentan mayores dispersiones en valores intermedios (entre $400\text{-}800 \text{ W/m}^2$), debido a alturas solares intermedias o alturas solares altas en condiciones de nubosidad parcial.

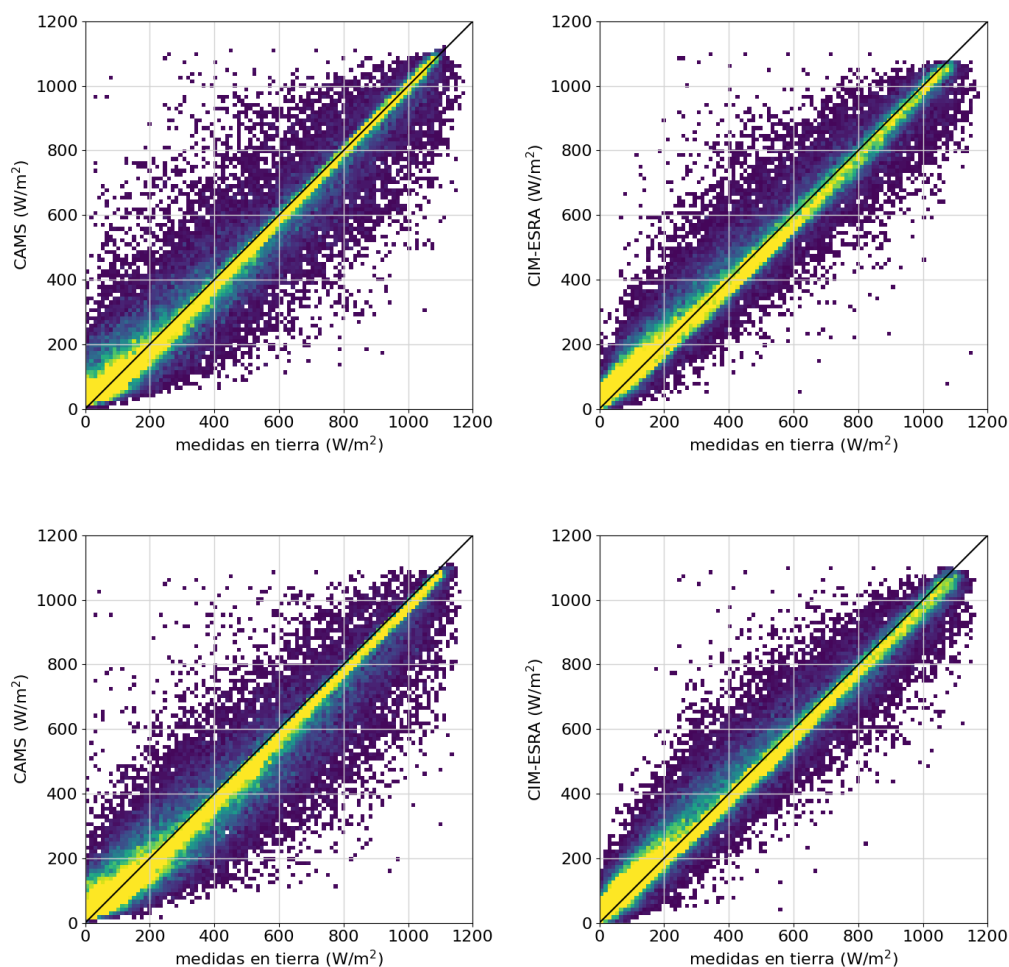


Fig. 1: Diagramas de dispersión para los estimativos de los modelos CAMS y CIM-ESRA contra datos medidos en Luján (arriba) y Montevideo (abajo) para toda condición de cielo. Los diagramas de dispersión para Paraná y Colonia son cualitativamente similares.

Para analizar en mayor profundidad el desempeño, en la Figura 2 se comparan las densidades de probabilidad de los estimativos y de las mediciones. Se observa que para CAMS la región de baja irradiancia (menores a 400 W/m^2) está sobrerrepresentada con respecto a lo que indican las medidas en tierra, mientras que para valores de alta irradiancia pasa lo contrario pero con menor intensidad. A su vez, la mediana de la distribución de CAMS es menor a la de las medidas. Esto está en concordancia con la subestimación observada en los estimativos CAMS. En el caso de CIM-ESRA, las densidades de probabilidad de sus estimativos se ajustan más al comportamiento de las medidas. Las mayores dificultades del modelo se encuentran en la sub-representación de muestras con irradiancias muy altas (mayores a 1.100 W/m^2) o muy bajas (menores a 100 W/m^2), y en una leve sobrerrepresentación en la región de $100\text{-}500 \text{ W/m}^2$. El balance entre estos dos efectos genera el pequeño sesgo medio positivo mostrado en la Tabla 3.

En la Figura 3 se muestra a modo de ejemplo las series de GHI medidos y estimados por los dos modelos en la estación de Montevideo para tres días consecutivos de 2019. En ella puede verse que cuando el día está despejado (día 2), ambos modelos representan muy bien el comportamiento de GHI en superficie, mientras que cuando hay nubosidad (días 1 y 3) el modelo Heliosat-4 no logra captar la rápida variación de la nubosidad y su impacto sobre las mediciones de GHI en tierra. El modelo CIM-ESRA presenta un problema similar, pero su aproximación es mejor que la del Heliosat-4. En el ejemplo de día despejado se puede observar que ambos modelos subestiman levemente. También se observa que los modelos no logran captar de manera exitosa los cambios abruptos en la irradiancia debido a cambios en las condiciones de nubosidad, principalmente CAMS. Es justamente en estos casos donde la dispersión entre los estimativos de los modelos y las medidas se acentúan, como puede verse en la Figura 1.

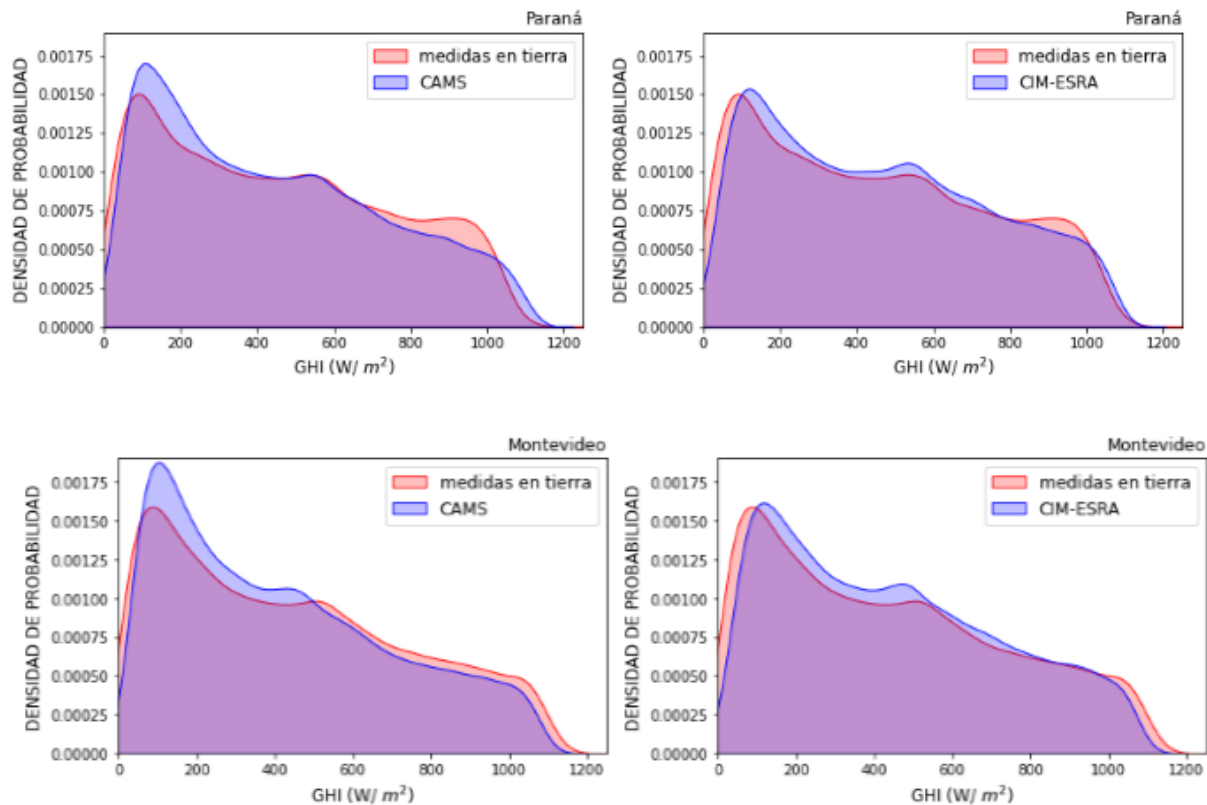


Fig. 2: Densidad de probabilidad para toda condición de cielo en Paraná y Montevideo. Izquierda: CAMS. Derecha: CIM-ESRA. Colonia y Luján no se muestran por ser cualitativamente similares.

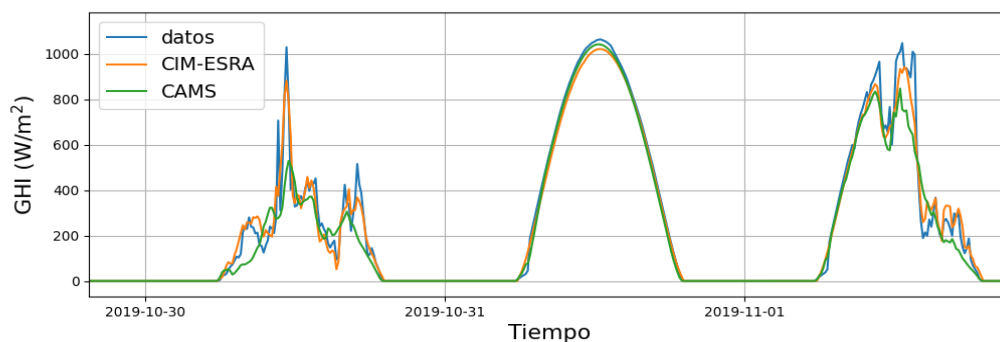


Fig. 3: Detalle de la serie temporal de los modelos considerados para la estación de Montevideo. Se muestran tres días consecutivos, siendo el segundo un día de cielo despejado.

4.2. Cielo mayormente despejado.

Para realizar un análisis más profundo, se repite la validación teniendo en cuenta únicamente las muestras con valores altos de ktp (mayores a 0,7). Estas muestras se conforman típicamente de valores altos de irradiancia y gran parte corresponden a ausencia de nubosidad (cielo claro). No obstante, debido al criterio simplificado para la selección de muestras de cielo despejado, este conjunto contiene también muestras con poca nubosidad parcial o nubosidad intermitente poco prevalente en los 10 minutos. En cualquier caso, este subconjunto de datos es de especial interés porque representa instantes donde el recurso solar disponible es alto.

En la Tabla 4 se muestran las métricas de desempeño obtenidas en este caso. Nuevamente, las métricas de cada modelo son similares en los cuatro sitios. Se observa una gran subestimación por ambos modelos para este

subconjunto de datos, con valores promedio, entre -5,7 y -8,6 % para CAMS y entre -3,5 y -4,7 % para CIM-ESRA. Por otro lado, los desvíos cuadráticos medios caen a la mitad en comparación con la Tabla 3 (entre 11 y 14% para CAMS y alrededor de 8% para CIM-ESRA). En el mismo sentido, las correlaciones son mayores, superiores a 0,967 en todos los casos.

Las métricas de desempeño concuerdan con lo mostrado en los diagramas de dispersión de la Figura 4. Estos gráficos, correspondientes a Luján y Montevideo, muestran que una gran porción de las muestras se ubican próximas a la recta $x=y$, y que presentan una menor dispersión que en el caso anterior (Figura 1). Sin embargo, también se aprecia una gran cantidad de puntos debajo de la recta $x=y$, causantes de la importante subestimación de los modelos. En esta zona se ubican los pares estimativo-medición que verifican que el estimativo de irradiancia es menor que la medida en

tierra. Este efecto es más marcado en el caso del modelo CAMS que en CIM-ESRA. Esto se debe a que los modelos satelitales están considerando una presencia de nubes mayor a la real, posiblemente debido a efectos de paralaje de los satélites y por tanto mayor en el caso de CAMS. La información de nubosidad es incluida en los modelos a través de imágenes de satélite, que según sus ángulos de visión sobre un punto dado de la superficie pueden tener mayores problemas de paralaje. Es decir, por su posición en

la esfera celeste pueden percibir incorrectamente a un píxel como cubierto por nubosidad cuando en realidad no lo está. Para la Pampa Húmeda, este fenómeno se ve acentuado en el caso del MSG, con ángulo de vista mayor a GOES-East (Laguada et al., 2020). El efecto contrario también es posible (el modelo predice incorrectamente cielo claro cuando en realidad hay nubosidad), pero no se observa en este caso por el filtro impuesto de $ktp > 0,7$.

Tabla 4: Resultados de las métricas para condición de cielo mayormente despejado ($ktp > 0,7$).

GHI para condiciones de $ktp > 0,7$ (2018-2020)								
Métricas	Luján		Paraná		Colonia		Montevideo	
	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA
R	0,975	0,986	0,967	0,985	0,977	0,987	0,972	0,989
rMBD (%)	-5,7	-4,4	-6,2	-3,5	-6,2	-4,6	-8,6	-4,7
rRMSD (%)	11,5	8,6	13,0	8,3	11,4	8,5	13,7	8,1
GHI media (W/m ²)	612,4		607,6		614,7		616,2	

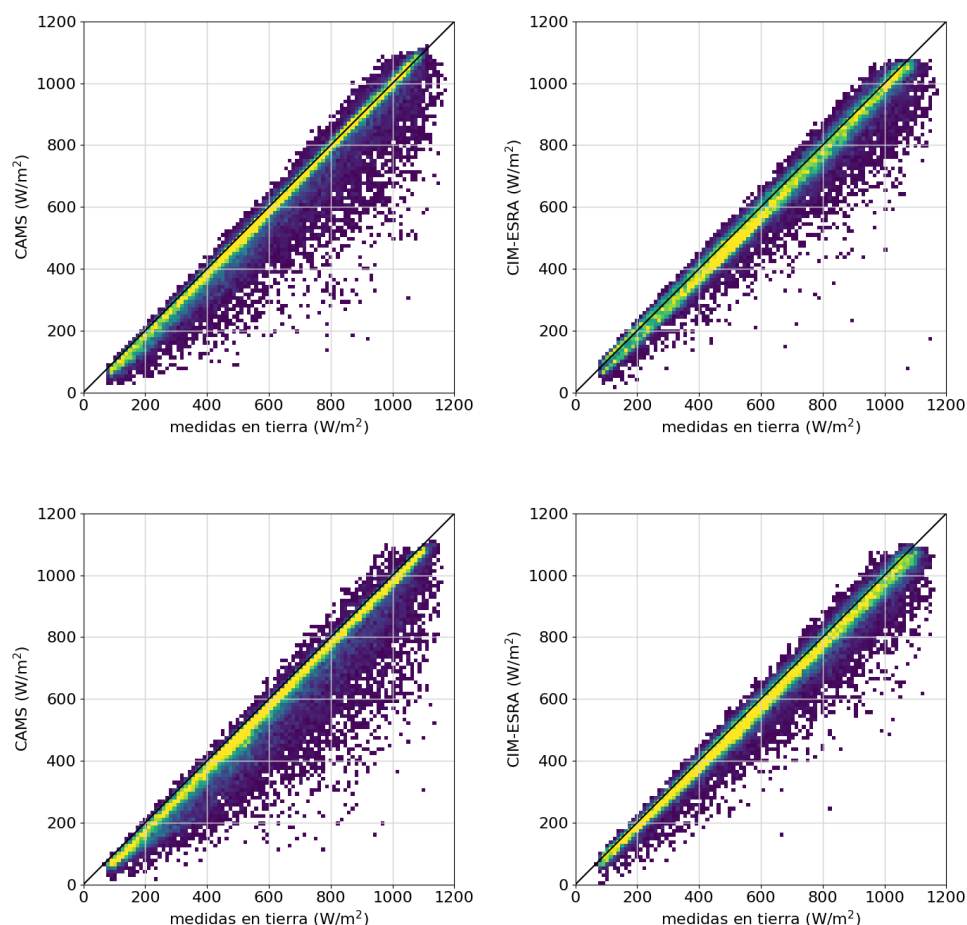


Fig. 4: Estimativos de los modelos CAMS y CIM-ESRA contra datos medidos en Luján (arriba) y Montevideo (abajo) para muestras con ktp mayor a 0,7. Se incluye la recta $x=y$.

En la Figura 5 se muestran las densidades de probabilidad de ambos modelos para altos valores de ktp. Se observa que para valores de irradiancia alta los modelos sub-representan los datos de tierra y para irradiancia baja los modelos sobre-representan. Es decir, se registran mayor cantidad de eventos

de irradiancia alta que la que captan los modelos, y por el contrario, hay menor cantidad de eventos de irradiancia baja que la que indican los modelos. Esto es concordante con la subestimación sistemática de los modelos en condiciones de ktp altos.

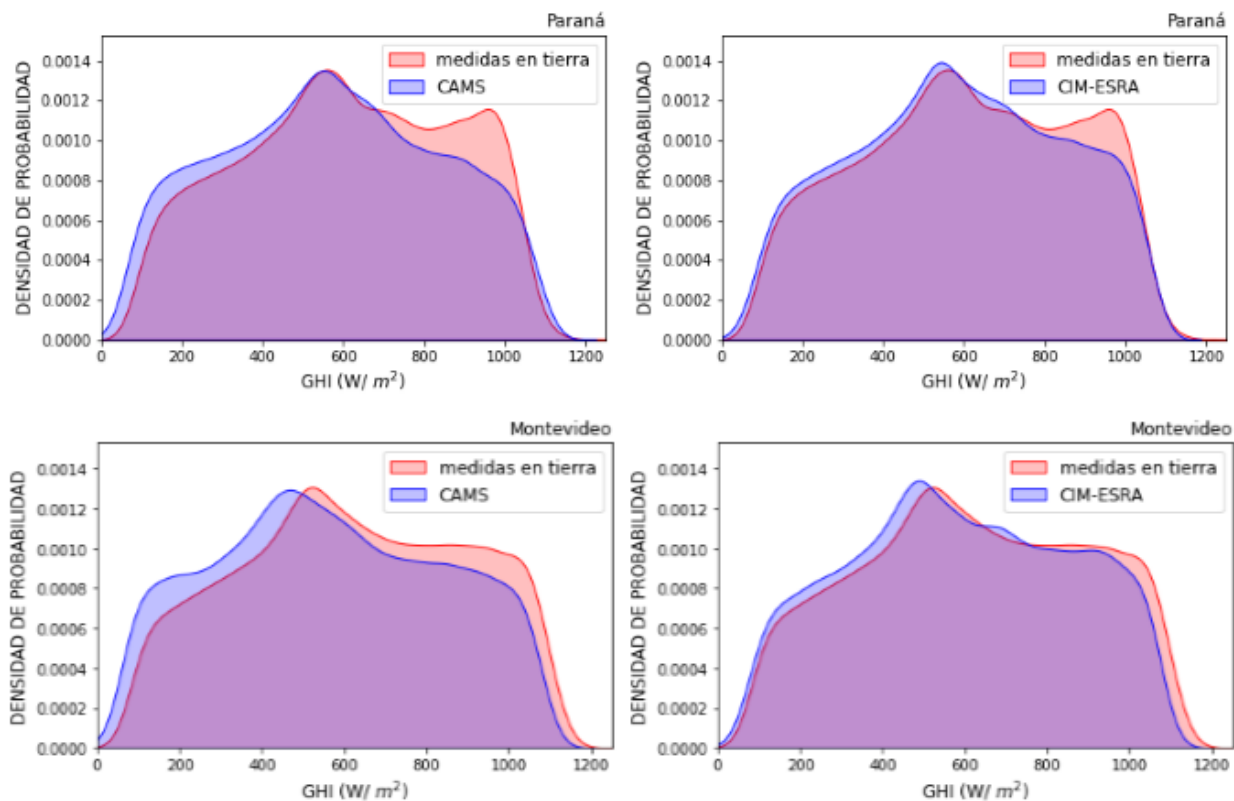


Fig. 5: Densidad de probabilidad para Ktp mayor a 0,7.

5. CONCLUSIONES

Se validaron estimativos de GHI de los modelos satelitales Heliosat-4 (CAMS) y CIM-ESRA a nivel 10-minutal contra medidas en tierra de calidad en cuatro sitios de la Pampa Húmeda. Los modelos se basan en información satelital MSG y GOES-East, respectivamente. La precisión alcanzada por los modelos es buena, y las métricas de desempeño obtenidas presentan homogeneidad territorial para cada uno. De esta comparación se desprende que el modelo CIM-ESRA basado en imágenes GOES-East es más preciso en la región que el modelo CAMS basado en imágenes MSG. El modelo CAMS estima GHI con desvíos cuadráticos en el entorno de 21% y una subestimación de alrededor de -2% (excepto para Montevideo, que es de -5%). La incertidumbre de CIM-ESRA está en el orden de 16% para toda condición de cielo, con una leve sobreestimación de 1%. Es importante notar que el modelo CIM-ESRA mantiene su buen desempeño aún en las estaciones de Montevideo y Paraná, estaciones que no han sido utilizadas en la determinación de los parámetros empíricos del modelo.

Si bien CAMS y CIM-ESRA estiman con precisión la GHI a escala 10-minutal, el estudio de las series temporales muestra que ambos tienden a tener dificultades para captar la rápida variación de GHI producida por cambios drásticos (de pocos minutos) en la nubosidad.

En el estudio específico de condiciones de cielo mayormente despejado ($k_{tp} > 0,7$) el desvío es de -6% para CAMS, llegando a valores del -8 % en el peor de los casos (Montevideo) y de -4 % para el modelo CIM-ESRA. Por otro lado, los rRMSD de ambos modelos se reducen a la mitad con respecto a sus respectivos valores para toda condición de cielo: alrededor de 12% para CAMS y 8% para CIM-ESRA. Estos importantes desvíos negativos sistemáticos dejan en evidencia la mayor dificultad que presenta el modelo CAMS con respecto a CIM-ESRA para estimar GHI en la región. Esta dificultad puede adjudicarse a efectos de paralaje en los satélites, más presentes en el caso del satélite MSG por su posición más alejada a la región.

En resumen, el mejor desempeño general de CIM-ESRA puede deberse a dos factores. Por un lado es un modelo semi-empírico en el que sus parámetros ajustables fueron previamente determinados utilizando información de 10 sitios en la Pampa Húmeda en el período 2010-2017 (Laguarda, 2021). Por otro lado, el modelo se basa en información del satélite GOES-East, que al encontrarse en la posición geoestacionaria de -75°W tiene mejor vista de la región que el satélite utilizado por CAMS, MSG. A futuro este análisis se puede profundizar extendiendo la región de estudio incorporando más estaciones de la red pampeana. También se debe profundizar el análisis a diferentes condiciones como estación del año o discriminación por altura solar para caracterizar de mejor forma el desempeño de estos modelos.

Los resultados del presente trabajo sugieren que el modelo satelital CIM-ESRA con parámetros promedio en la región tiene una alta extrapolabilidad espacial, al menos en la región climática afín de la Pampa Húmeda.

6. REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R. (2017). Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Tesis de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Aristegui, R.; Iturbide, P.; Stern, V.; Lell, J.; Righini, R. (2019). Variabilidad de corto plazo y valores extremos de la irradiancia solar en la Pampa Húmeda Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **23**, 19-30.
- Chen, R.; Kang, E.; Ji, X.; Yang, J. y Wang, J. (2007). An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: A case study in Heihe river basin. *Energy*, **32**, 1148–1157.
- Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., y Bugliaro, L. (2016). The LibRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geoscientific model development*, **9**:1647–1672
- Laguarda, A. (2021). Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre Modelos físicos e híbridos utilizando información satelital sobre la Pampa Húmeda: Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. Tesis de Doctorado en Ingeniería de la Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda region. *Solar Energy*, **199**, 295–307.
- Laguarda, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2018). Modelo semi-empírico de irradiación solar global a partir de imágenes satelitales GOES. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar 2018*, Radiacao Solar, pp. 1–9.
- Laguarda, A. y Abal, G. (2016). Índice de turbidez de Linke a partir de irradiación solar global en Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **20**, 11.35–11.46.
- Linke, F. (1922). Transmissions-koeffizient und trübungsfaktor. *Meteorological Magazine Beitrage zur Physik der Atmosphaere Beitr*, **10**:91–103.
- Long, C. y Shi, Y. (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal*, **2**:23–37.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., F., y Vignola (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, **73**:307–317.
- Perez, R., Schlemmer, J., Hemker, K., Kivalov, S., Kankiewicz, A., y Gueymard, C. (2015). Satellite-to-irradiance modeling - a new version of the SUNY model. En 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 1–7.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy* **45**, 2:111–114.
- Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J., Meyer, R., Gueymard, C., Suri, M., Martín, L., Mieslinger, T., Blanc, P., Grant, I., Boland, J., Ineichen, P., Remund, J., Escobar, R., Troccoli, A., Sengupta, M., Nielsen, K., Renne, D., Geuder, N., y Cebecauer, T. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar Energy* **132**:25–37.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefevre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, **26**(1):33–57.
- Righini R. y Aristegui R. (2015). Caracterización del nuevo laboratorio de calibración del GERSolar. *Avances en Energías Renovables y medio Ambiente*, **3**, 11.01-11.09.
- Rigollier, C., Lefevre, M., y Wald, L. (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, **77**(2):159–169.
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., (2000). On the clear sky model of the ESRA -European Solar Radiation Atlas-with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, **68**, 33–48.
- Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Killius, N., Betcke, J., Lefevre, M., Wald, L., Wey, E., Saboret, L., (2018). User's Guide to the CAMS Radiation Service. Technical Report Copernicus Atmosphere Monitoring Service.