

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO LCIM PARA LA ESTIMACION DE RADIACION SOLAR EN LA SUPERFICIE DE SALTA CAPITAL Y EL ROSAL

Nicolás Rivera¹, Germán Salazar¹, Agustín Laguarda²

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

²Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, UdelaR
E-mail: nicolasrivera2297@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo se analiza el desempeño del modelo satelital LCIM para la estimación de la irradiancia solar en plano horizontal (GHI) en toda condición de cielo sobre dos sitios de la provincia de Salta, fuera de su región de entrenamiento: Salta Capital (1200 msnm) y El Rosal (3355 msnm). Este modelo semi-empírico ha sido desarrollado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, Uruguay (LES) para la Pampa Húmeda. En segunda instancia, se propone y analiza un reentrenamiento sobre los parámetros empíricos del modelo para mejorar su precisión de sus estimativos de GHI en los sitios estudiados. Para ello se necesitó contar con: (i) medidas de GHI en ambos sitios, para entrenamiento y validación, (ii) un modelo preciso para estimar GHI en condiciones de cielo claro (modelo ESRA para Salta Capital y modelo McClear para El Rosal) e (iii) información del canal visible del satélite GOES-East. Además, como referencia se evalúan los estimativos del modelo Heliosat-4, provisto por el servicio de acceso gratuito de Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Los resultados muestran que el modelo LCIM original adapta mejor respecto a las mediciones en tierra que el modelo Heliosat-4 (rRMSE de LCIM: 20,1% y 15,1%, mientras que Heliosat-4: 27,7% y 29,4%, para Salta Capital y El Rosal respectivamente). En segunda instancia, se analiza y ajusta el cálculo del índice de nubosidad para su aplicación sobre una zona de alto albedo superficial como El Rosal. Las desviaciones rRMSE de las adaptaciones fueron del 19,7% y 12,9% para Salta y El Rosal (con el nuevo índice) respectivamente, mejorando su desempeño en su versión original en ambos sitios (20,1% y 15,1%).

Palabras clave: irradiancia solar en plano horizontal, modelo satelital, all-sky models, LCIM, Heliosat-4.

INTRODUCCIÓN

La forma más directa de comprender las características de la radiación solar en un lugar específico es mediante mediciones de largo plazo en el sitio mismo. Sin embargo, en regiones con características orográficas variables (como en la provincia de Salta), medir en cada sitio es impracticable por el costo considerable tanto en recursos materiales como humanos. Se requieren, además, mediciones de mediano-largo plazo, dado que la radiación solar posee características climáticas que varían en el tiempo. Surge así, la opción complementaria de utilizar información de satélites meteorológicos geostacionarios, que tiene la ventaja de cubrir grandes áreas por largos periodos de tiempo. La información satelital suele tener alta frecuencia de muestreo, generalmente subhoraria, en varios canales espectrales, especialmente en el rango visible. Esta información es útil para captar la nubosidad, de gran impacto en la irradiación global horizontal. Dado esto, existen modelos que estiman la irradiancia solar en superficie sobre el campo de visión del satélite.

Un ejemplo es el modelo satelital LCIM (L de LES y CIM de Cloud Index Model), desarrollado por el grupo de investigación del Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República (LES, <http://les.edu.uy/>) para la Pampa Húmeda (Laguarda, 2021). El LES proporciona información de Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) bajo demanda para una gran región de Sudamérica utilizando imágenes de *Geostationary Operational Environmental Satellite – East* (GOES-East) específicamente GOES-13 (desactivado en 2017-2018) y GOES-16 (desde 2018). Estos satélites se ubican sobre el ecuador en una longitud de -75 grados y son operados por la National Oceanic and Atmospheric Administration, EUA (NOAA). El LCIM es de naturaleza semi-empírica ya que se basa en un modelo físico para estimar la radiación en condiciones de cielo claro y en una parametrización fenomenológica para modelar el efecto de las nubes. Esta parametrización cuenta con dos parámetros empíricos determinados en Laguarda (2021) específicamente para aplicación del modelo a la región climática de la Pampa Húmeda, clasificada según Köppen-Geiger (Peel et al., 2007) como Cfa (clima templado, sin estación seca y con veranos calurosos) y con alturas dentro de un rango desde los 0 a 500msnm. Sin embargo, su desempeño no fue analizado en sitios de características climáticas y orográficas diferentes, como los de la provincia de Salta, donde nos encontramos con cinco clasificaciones climáticas según Köppen-Geiger (BWk, BSh, BSk, Cwa, Cwb) y con variaciones de altura que van desde los 300msnm a más de 6000msnm.

En este contexto, se propone evaluar el modelo satelital LCIM en su forma original y reentrenando sus parámetros empíricos, compararlo con el modelo de referencia Heliosat-4 (proporcionado por el servicio de CAMS), utilizando como referencia mediciones de radiación solar tanto en Salta Capital como en El Rosal, situados en latitud = 24,728611° (S), longitud = 65,40944° (O), altura = 1233 metros sobre el nivel del mar (msnm) y latitud = 24,39278° (S), longitud = 65,76806° (O), altura = 3355 msnm, respectivamente.

Las mediciones, realizadas en el campus de la Universidad Nacional de Salta y en la Escuela N°4526 “El Rosal”, se utilizarán para evaluar el desempeño de los modelos: LCIM, su adaptación local, y el modelo Heliosat-4 mediante métricas como el coeficiente de determinación (R^2), el sesgo medio (MBD), el error cuadrático medio (RMSE) y sus respectivos relativos como porcentaje (rMBD y rRMSE), con el fin de determinar la correspondencia entre las estimaciones de radiación solar de los modelos satelitales.

MEDIDAS EN TIERRA

Las mediciones en tierra de irradiancia solar se llevaron a cabo en dos sitios de la provincia de Salta: Salta Capital y El Rosal cuyas clasificaciones climáticas son Cwb y Bsk según Köppen-Geiger respectivamente, con una diferencia de más de 2000 metros de altura entre estos sitios y aproximadamente 130 km de distancia. Las mediciones se realizaron a nivel minutal y la Tabla 1 brinda información acerca de los sitios, equipo y periodo de medición.

Tabla 1: descripción de los sitios, equipo y periodo en que fueron tomados los datos de GHI

Sitio	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Altura (m)	Piranómetro	Inicio	Fin
Salta Capital	24,728611	65,40944	1233	Eppley PSP	10/8/22	31/10/23
El Rosal	24,39278	65,7806	3355	Kipp & zonen CMP3	16/5/23	31/12/23

Los piranómetros fueron calibrados a partir de un sensor patrón (Kipp & Zonen CM21), y constantemente se los supervisan, para realizar limpieza y la baja de datos (una vez al mes), de esta forma controlar posibles fallas o errores. Las salidas analógicas de ambos sensores fueron conectadas a Dataloggers Campbell CR1000 registrando datos con frecuencia minutal.

A las mediciones de GHI se les aplicó un exigente control de calidad detallado en Rivera et al., (2024), algunos de los cuales fueron propuestos por la Baseline Surface Radiation Network (BSRN; Long y

Dutton, 2002), así como por Nollas et al. (2023). Además, filtros específicos por sombreado sobre el sensor y filtros manuales para eliminar ruido eléctrico sobre un periodo de tiempo. Posteriormente, los datos fueron ajustados a una nueva escala temporal, pasando de mediciones minutales a intervalos de 10 minutos, ya que la evaluación de los modelos en condiciones de todo tipo de cielo se realizará con esa cadencia. Después de este cambio de escala, se obtuvieron 24895 datos de GHI a 10 minutos para Salta Capital y 13188 para El Rosal.

DESCRIPCION DE LOS MODELOS

Modelo LCIM

El modelo LCIM (Laguarda, 2021) es un modelo híbrido o semi-empírico que estima GHI (Laguarda et al., 2020) y DNI (Laguarda et al., 2023) en condiciones de todo tipo de cielo para la Pampa Húmeda. En este trabajo estudiaremos únicamente la componente GHI. Para sus estimativos a partir de 2018, se basa en información del canal visible del GOES-16, de frecuencia 10 minutal. El modelo estima la GHI como una fracción de la que habría en condiciones de cielo claro según la Ec. (1). El modelo es semi-empírico o híbrido dado que utiliza un modelo físico de cielo claro modificado empíricamente a partir de un índice de nubosidad calculado a partir de información satelital. Estos tipos de modelos, son llamados modelos de índice de nubosidad o CIM (Cloud Index Model) y se pueden expresar como:

$$GHI = GHI_{cc} \times F(\eta), \quad (1)$$

donde:

- GHI es el estimativo de Irradiancia sobre el plano horizontal en condiciones de todo tipo de cielo a escala 10-minutal.
- GHI_{cc} es el estimativo de la Irradiancia solar sobre el plano horizontal en condiciones de cielo claro a escala 10-minutal.
- η es el índice de nubosidad.

La función $F(\eta)$, que utiliza el modelo LCIM detallada en Laguarda (2020, 2021) para el índice de nubosidad es la siguiente:

$$F(\eta) = a \times (1 - \eta) + b \quad (2)$$

La Ec. (2) representa una función lineal, cuyos parámetros $a = 0,855$ y $b = 0,111$ fueron establecidos para la Pampa Húmeda en Laguarda (2021). El modelo de cielo claro que utiliza LCIM en la Ec. (1) es el modelo ESRA (Rigollier et al., 2000) a partir de datos del factor de Turbidez de Linke (Louche et al., 1986; Linke, 1992) promediada para 10 sitios en la Pampa Húmeda.

El índice de nubosidad (η) se obtiene de datos satelitales del Canal 2 (centrado en 640 nm) del instrumento Advanced Baseline Imager (ABI) a bordo del satélite geoestacionario GOES-16, a través de la reflectancia planetaria ρ_p ,

$$\rho_p = \frac{(\pi \times \frac{L_\lambda}{S_\lambda})}{\cos \theta_z} = \frac{F_R}{\cos \theta_z}, \quad (3)$$

donde L_λ es la radiancia espectral medida por el detector para un píxel (elemento de imagen), S_λ es el resultado de modular el espectro solar extraterrestre (considerando la distancia Tierra-Sol) por la respuesta espectral del instrumento, θ_z el ángulo cenital solar. La radiancia es sensible a las características de las nubes presentes, estas reflejan la irradiancia incidente de forma anisotrópica. La cantidad $\pi \times L_\lambda$ evalúa la irradiancia emergente de la atmósfera (suponiendo isotropía del flujo), mientras que $S_\lambda \times \cos \theta_z$ estima el flujo incidente. La Ec. (3) define una medida aproximada de la reflectancia planetaria asociada a un píxel; la imagen bajada por el usuario consiste en la distribución geográfica del factor F_R . Un proceso de filtrado adecuado aplicado a F_R permite deducir el factor de

reflectancia de fondo (F_{R0}), asociado a la radiación reflejada por la superficie y la atmosfera en la ausencia de nubes.

Los valores de F_R utilizados son obtenidos de la base de imágenes satelitales GOES-East que mantiene el LES. En el caso de GOES-16, tienen una frecuencia 10 minutal (desde el 2018) y una resolución nominal en el nadir de 500 m. Este tamaño en el píxel no representa en forma adecuada lo ocurrido en el sitio, y hay ganancia de desempeño al promediar la información satelital en el espacio (Alonso-Suárez, 2017).

El modelo LCIM utiliza una integración de la información satelital en una celda optimizada para estimar la irradiancia promedio en intervalos de 10 minutos. Esta optimización demuestra que el uso de celdas de 10 minutos de arco por lado (aproximadamente $15 \text{ km} \times 18 \text{ km}$ en la región de estudio, considerando latitud y longitud) proporciona una mayor precisión en la estimación de los estimativos de radiación solar (Laguada, 2021).

η es una normalización de ρ_p , por lo tanto, es un número adimensional entre 0 y 1 que cuantifica la cantidad de nubosidad. La expresión de η queda descrita por:

$$\eta = \frac{\rho_p - \rho_0}{\rho_{max} - \rho_0} = \frac{F_R - F_{R0}}{\rho_{max} \times \cos \theta_z - F_{R0}}, \quad (4)$$

donde:

- ρ_0 es la reflectancia de fondo.
- F_{R0} es el factor de reflectancia de fondo.
- ρ_{max} es la reflectancia que se asocia a condiciones de nubosidad.

Tanto ρ_0 y F_{R0} son campos escalares que presentan variaciones estacionales. Para reflectancias entre la mínima y la máxima, los valores de η están acotados entre 0 y 1, cuando $\rho_p < \rho_0$ es 0 y cuando $\rho_p > \rho_{max}$ es 1. Los valores extremos del índice de nubosidad indican que si es igual a 1 estamos presencia de nubosidad con alto espesor óptico, mientras que si es 0 no encontraremos en situación de cielo claro.

La reflectancia de fondo ρ_0 que utiliza el modelo LCIM es obtenida mediante la parametrización del factor de reflectancia de fondo, F_{R0} , utilizando para ello el método propuesto por Tarpley (1979) y adaptado por Alonso-Suarez (2017). ρ_{max} fue determinado por Laguada (2021) de modo de optimizar el desempeño de LCIM a partir de un análisis estadístico a través de la métrica RMSE. Allí se reporta $\rho_{max} = 0,85$, valor utilizado en este trabajo.

Modelo HELIOSAT-4

El modelo Heliosat-4 es un modelo satelital de base física que estima GHI y DNI para toda condición de cielo. Sus estimaciones están provistas por el sitio CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation>). Este modelo surge de la combinación de los modelos físicos McClear y McCloud. Este último, calcula la atenuación de la radiación solar en superficie en presencia de nubes utilizando índices de cielo claro (para GHI y DNI) que se fundamentan en ábacos con cuatro variables de entrada: (i) albedo de la superficie, (ii) profundidad óptica de las nubes, (iii) cobertura de nubes y (iv) tipo de nube (Qu et al., 2017). La información de nubes se obtiene a través de imágenes del satélite MSG (Meteosat Second Generation) con resolución temporal de 15 minutos. Entonces, se generan estimaciones de irradiancia para todo el campo de visión del satélite MSG. Sin embargo, no se asegura que la precisión en áreas donde el ángulo cenital del satélite θ_s exceda los 60° . Cuando $\theta_s > 60^\circ$, los errores de paralaje, la curvatura terrestre y otros factores (Johnson et al., 1994) aumentan la incertidumbre en la localización y caracterización de las propiedades de las nubes, lo que repercute en las estimaciones de irradiación. Dado que los sitios de interés se encuentran a un ángulo cenital $\theta_s > 60^\circ$, este modelo se utilizará solo como referencia en las comparaciones con el modelo LCIM y los datos medidos.

ADAPTACION LOCAL DEL MODELO LCIM

Los parámetros a y b de la Ec. (2), fueron ajustados en Laguarda et al. (2020) para 10 sitios de la Pampa Húmeda. La baja variabilidad espacial de estos parámetros en sitios permite una aplicación del modelo en esa región utilizando parámetros fijos sin gran pérdida de precisión.

En este trabajo se evaluará en primera instancia al modelo LCIM con los parámetros preestablecidos (LCIMo, LCIM original), y en segunda instancia estos serán re-ajustados a partir de un entrenamiento con datos medidos para la ciudad de Salta y El Rosal, respectivamente y se evaluará al nuevo LCIM (LCIME). Esta re-adaptación del LCIMo incluye reconsiderar el modelo de cielo claro de mayor precisión para cada sitio.

La adaptación realizada para obtener el modelo LCIME, en una primera etapa se mantiene la estructura del modelo utilizando como entrada el mismo índice de nubosidad que el modelo LCIMo. En segunda instancia se mejora el cálculo de índice para su aplicación a una zona árida de alto albedo superficial como lo es El Rosal. Sobre la versión adaptada a los sitios de estudio se espera obtener una mejor respuesta en comparación con LCIMo.

La Ec. (5) muestra la estructura de LCIM, desarrollándola, llegamos a la expresión de la Ec. (8). Procederemos a encontrar los parámetros $k1$ y $k2$ los cuales estarán ajustados a cada sitio de estudio, para así obtener un ajuste local del modelo. Estos parámetros se obtienen realizando un ajuste lineal de la Ec. (8), en donde para ello se necesitará contar con η (obtenida a partir de los datos satelitales de F_R , del modelo de brillo de fondo F_{R0} y ρ_{max}), GHI_{cc} , y los datos de GHI medidos en superficie a los que se le realizaron un control de calidad.

En Rivera et al., (2024) se tiene que el modelo ESRA es el que mejor se ajusta a las condiciones de cielo claro en Salta Capital, mientras que el modelo McClear (MCC; Lefevre et al., 2013) muestra un mejor desempeño para El Rosal, con dispersiones relativas porcentuales (rRMSE) de 3.9% y 2.9%, respectivamente.

Se agrega (t) para distinguir entre las variables que dependen del tiempo y los parámetros de la función.

$$GHI(t) = GHI_{cc}(t) \times [a \times (1 - \eta(t)) + b] \quad (5)$$

$$GHI(t) = GHI_{cc}(t) \times [(a + b) - a \times \eta(t)] \quad (6)$$

$$GHI(t) = [GHI_{cc}(t) \times (a + b)] - [a \times GHI_{cc}(t) \times \eta(t)] \quad (7)$$

$$GHI(t) = k1 \times x1(t) + k2 \times x2(t) \quad (8)$$

Donde:

$$x1(t) = GHI_{cc}(t) \quad (9)$$

$$k1 = (a + b) \quad (10)$$

$$x2(t) = GHI_{cc}(t) \times \eta(t) \quad (11)$$

$$k2 = -a \quad (12)$$

El procedimiento implica realizar una técnica de muestreo aleatorio y validación cruzada, lo que significa analizar los datos de manera independiente al dividirlos en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de prueba. La separación se realizó dividiendo aleatoriamente los datos en dos mitades, utilizando una mitad para entrenamiento y la otra para pruebas y validación. Estos conjuntos de entrenamiento y prueba consisten en datos de $GHI(t)$, $GHI_{cc}(t)$ y $\eta(t)$.

El ajuste se realizó utilizando la Ec. (8) como función de ajuste, utilizando los datos de entrenamiento como entrada en la función “curve_fit” de Python. Esta función encuentra los parámetros de una función (en este caso, $k1$ y $k2$) que mejor se ajustan a los datos proporcionados. Este proceso se repitió 1000

veces para obtener independencia estadística de los resultados, seleccionando nuevos conjuntos de datos aleatorios en cada iteración.

En cada iteración se determinaban los parámetros $k1$ y $k2$, con los cuales se obtenía la estimación correspondiente de GHI. Después de realizar las 1000 iteraciones, se procedió a promediar los parámetros $k1$ y $k2$ obtenidos en cada una de ellas.

OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS EN TODA CONDICIÓN DE CIELO

Los datos de GHI estimados correspondientes al modelo LCIMo fueron obtenidos del servicio proporcionado por el LES en <http://les.edu.uy/online/stack-loc/>. Estos datos medidos en superficie en la escala temporal 10-minutal fueron sometidos a un nuevo filtro debido a que los datos correspondientes al modelo LCIMo poseían algunos huecos temporales debido a imágenes faltantes. Estos huecos representan aproximadamente el 3,7% y el 7,7% para la ciudad de Salta y El Rosal del total de los datos. La obtención de los datos de GHI correspondientes al modelo de Heliosat-4 (al cual en gráficas nos referiremos a él como CAMS) se llevó a cabo utilizando el servicio en <http://www.soda-pro.com/>. Estos datos se descargaron en intervalos temporales de un minuto y se promediaron para obtener una escala de 10 minutos correspondiente.

Dado los modelos LCIMo, LCIMe y Heliosat-4 se llevará a cabo una evaluación de sus rendimientos utilizando métricas, comparándolos contra datos medidos en tierra para cada sitio de estudio. Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos frente a las medidas son:

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})]^2}{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]} \quad (15)$$

donde:

- x : Valor medido
- y : Valor estimado
- n : Tamaño de la muestra
- \bar{x} : Media de los valores medidos
- \bar{y} : Media de los valores estimados

Estos indicadores también son presentados en términos relativos como porcentaje de la media, denominados aquí como rMBD y rRMSE.

En Laguarda et al., (2021) se reportó que los errores rRMSE en las evaluaciones del modelo LCIM y Heliosat-4 para la Pampa Húmeda están en un rango del 16% y 21%, mientras que rMBD 1,5% y -0,2% respectivamente, a escala 10-minutal.

RESULTADOS

Resultados del ajuste

Dado el proceso de obtención de los parámetros $k1$ y $k2$ a partir de la validación cruzada y llevándolos a su forma a y b , se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla 2:

Tabla 2: Parámetros a y b ajustados para el modelo LCIME

Sitio	Parámetros	
	a	b
Pampa Húmeda (LCMo)	0,855	0,111
Salta	0,876	0,095
El Rosal	0,939	0,052

De esta manera las expresiones finales de la función de GHI estimada del modelo LCIME resultan ser:

i) Salta:

$$GHI(t) = GHI_{ESRA}(t) \times [0,876 \times (1 - \eta(t)) + 0,095] \quad (16)$$

ii) El Rosal:

$$GHI(t) = GHI_{McClear}(t) \times [0,939 \times (1 - \eta(t)) + 0,052] \quad (17)$$

Evaluación de los modelos en toda condición de cielo

A partir de los modelos LCIMo, LCIME y Heliosat-4 se realizaron las evaluaciones de su rendimiento, las cuales se muestran en la Tabla 3. Estas evaluaciones consisten en comparaciones con datos medidos en tierra, utilizando las medias de GHI medidas en Salta y El Rosal, con valores promedio de 512 W/m² y 699 W/m², respectivamente para normalizar las métricas.

Tabla 3: Métricas de rendimiento para los distintos modelos en condición de todo tipo de cielo

Sitio	Modelo	MBD (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	rMBD(%)	rRMSE(%)	R ²
Salta Capital	LCIMo	15,9	103,3	3,1	20,1	0,949
	LCIME	10,5	100,6	2,0	19,7	0,950
	Heliosat-4	-7,0	142,0	-1,3	27,7	0,903
El Rosal	LCIMo	-44,6	105,8	-6,3	15,1	0,944
	LCIME	2,1	90,8	0,3	13,0	0,949
	Heliosat-4	-107,6	207,5	-15,2	29,4	0,827

Acompañados de las métricas mostradas, se muestran los diferentes gráficos: Figura 1 y Figura 2 de dispersión correspondientes a cada modelo para Salta Capital y El Rosal respectivamente. Se observa que en El Rosal se tiene un mejor ajuste en relación a la recta $y=x$ que en la Capital para los modelos LCIMo y LCIME, mientras que el modelo Heliosat-4 presenta la mayor dispersión en ambos sitios.

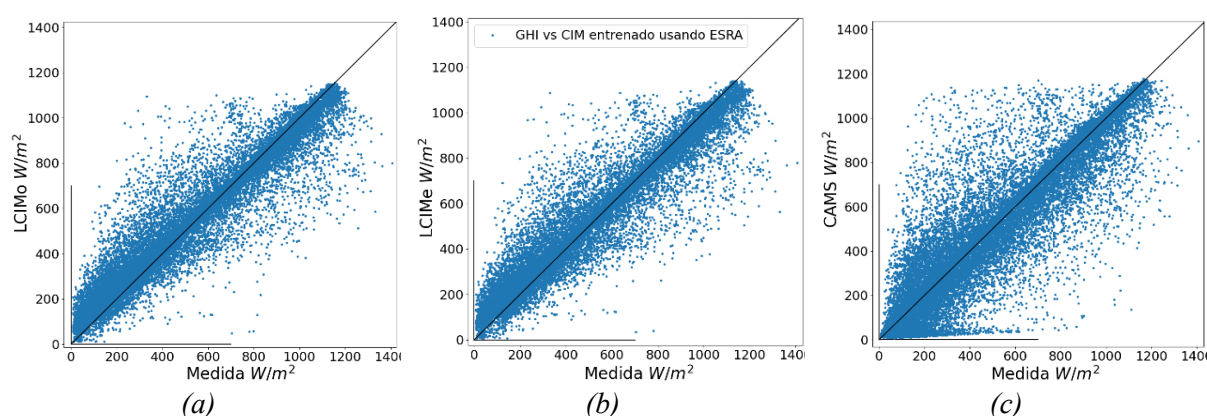


Figura 1: Dispersiones entre datos en tierra con modelos en condición de todo tipo de cielo para Salta Capital, (a) LCIMo., (b) LCIME., (c) Heliosat-4.

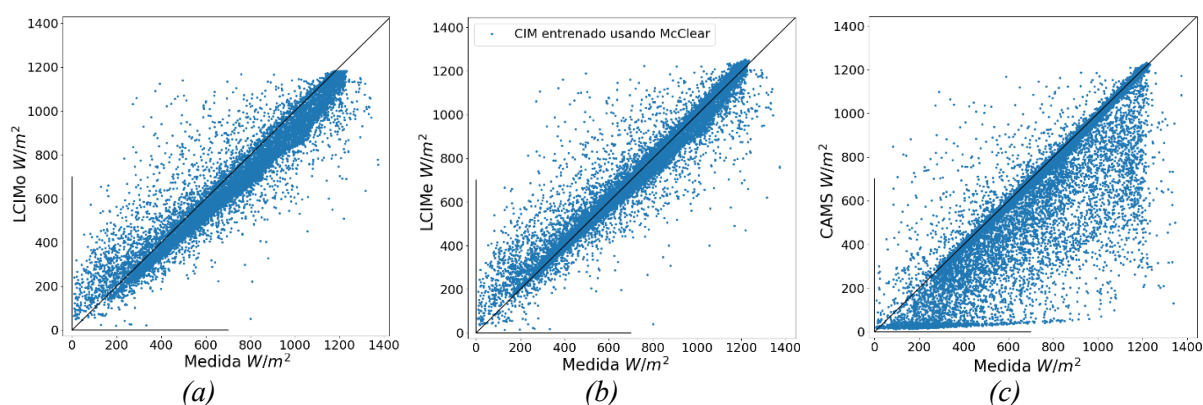


Figura 2: Dispersiones entre datos en tierra con modelos en condición de todo tipo de cielo para El Rosal, (a) LCIMo., (b) LCIME., (c) Heliosat-4.

DISCUSIÓN

Salta Capital

Al observar las métricas presentadas en la Tabla 3, se tiene que el modelo LCIMo posee un desempeño superior al modelo Heliosat-4, lo cual es coherente con lo que se aprecia en las gráficas de Salta Capital. Gráficamente (Figura 1a), se observa que el modelo LCIMo sobrestima los valores bajos de GHI y subestima los valores altos. Además, se observa en la Tabla 3 que el modelo LCIME (Figura 1b) para la ciudad de Salta reduce tanto los errores rMBD como rRMSE en comparación con el modelo LCIMo en un 1,1% y 0,4%, respectivamente.

Según la información de la Tabla 3, se destaca que el sesgo (MBD y rMBD) de Heliosat-4 es inferior al de LCIMo; este aspecto se refleja en la dispersión de puntos en la Figura 1c, donde se aprecian más puntos alejados de la línea de tendencia $y=x$ tanto por encima como por debajo. Dado esto, se observa que el modelo Heliosat-4 tiende a subestimar en comparación con las mediciones terrestres, mientras que LCIMo y LCIME tienden a sobrestimar.

En la Figura 3 se ilustran los comportamientos de los modelos para dos días, en diferentes estaciones del año y condiciones climáticas. El primero corresponde a un día nublado (Figura 3a, 18 de enero de 2023), mientras que el segundo corresponde a un día de cielo claro (Figura 3b, 17 de junio de 2023), representando un día de verano y otro cercano al invierno, respectivamente. Para el primer día, el modelo LCIME exhibe levemente una mayor proximidad a los datos reales en contraste con el modelo LCIMo, estos modelos muestran un patrón similar al medido. Se observa que el modelo Heliosat-4 muestra un seguimiento menos preciso en comparación con la curva de datos medidos. Por otro lado, En la Figura 3b, se presenta un día de cielo claro, y todos los modelos describen correctamente estas condiciones. Sin embargo, el modelo Heliosat-4 muestra una mayor amplitud con respecto a los datos reales. Los modelos LCIMo y LCIME discrepan muy poco entre sí y muestran una excelente aproximación a las mediciones en tierra para este día de cielo claro.

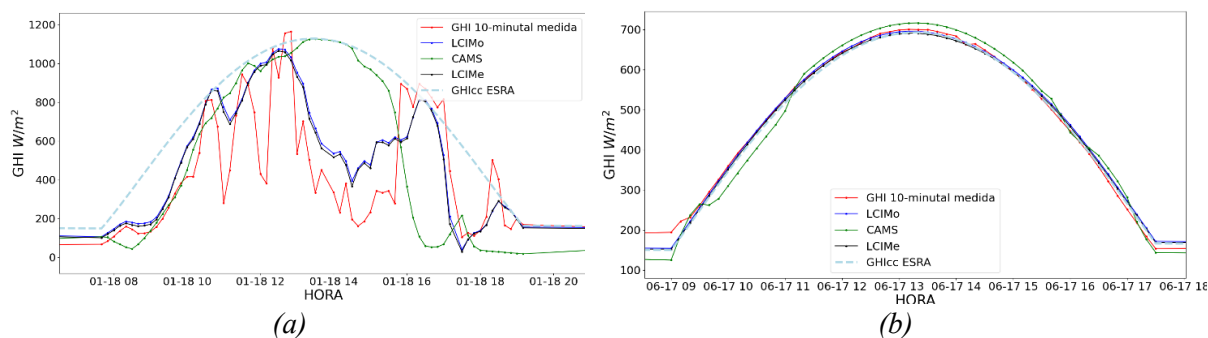


Figura 3: GHI estimada por los modelos y medida en tierra, (a) 18/01/23., (b) 17/06/23.

El Rosal

Según lo indicado en la Tabla 3, se observa que tanto los modelos LCIMo como Heliosat-4 tienden a subestimar. Sin embargo, Heliosat-4 el que presenta una mayor subestimación que LCIMo. Esto se evidencia gráficamente en la Figura 2c, donde los valores de Heliosat-4 muestran una cantidad significativa de puntos por debajo de la recta ($y=x$). Esta tendencia sugiere que el modelo Heliosat-4 estaría interpretando incorrectamente la presencia de nubosidad. Al analizar las gráficas Figura 2a y Figura 2b, se confirma lo observado en la tabla: LCIMe es el modelo que mejor se ajusta a la línea de igualdad, lo cual es coherente con un valor de R^2 superior para este modelo en comparación con su versión original y el modelo Heliosat-4. Se tiene que el modelo LCIMo muestra un patrón tanto en El Rosal, como en Salta que tiende a sobrestimar para valores de GHI bajos y a subestimar para valores de GHI altos. Este comportamiento fue notado en Laguarda (2021). Además, LCIMo exhibe una dispersión (rRMSE) menor que la del modelo Heliosat-4, con una reducción del 14,3%.

Es importante señalar que, además de las limitaciones inherentes a la geometría de la posición del satélite Meteosat, la frecuencia de captura de imágenes es de una cada 15 minutos. Por lo tanto, las estimaciones minuto a minuto publicadas en www.soda-pro.com se obtiene mediante técnicas de “downscaling” lo que podría introducir errores reflejados en los promedios de 10 minutos. Cabe destacar que la mayor concentración de puntos en las Figuras 1c y 2c se encuentra muy cercana a la línea $y=x$. La comparación de medias 10-minutales de observación con datos satelitales originales correspondientes a 15 minutos no fue abordada para el presente trabajo. Además, en las Figuras 1c y 2c se observa una alta densidad de puntos cercanos a cero en las estimaciones del modelo Heliosat-4. Esto se debe a que identifica cielos nublados a cielos que no lo son (este problema podría estar relacionado con el ángulo desde el cual el satélite observa esta región).

Adaptación del índice de nubosidad para zona de alto albedo superficial para El Rosal

Al analizar visualmente los valores de GHI medidos, estimados y de cielo claro a lo largo de la línea temporal, se encontró que tanto el modelo LCIMo como el modelo LCIME presentaban un desfase y la interpretación de nubosidad en donde no corresponde con respecto a las mediciones reales y al modelo de cielo claro McClear (MCC), como se muestra encerrado en verde en la Figura 4 para distintos días.

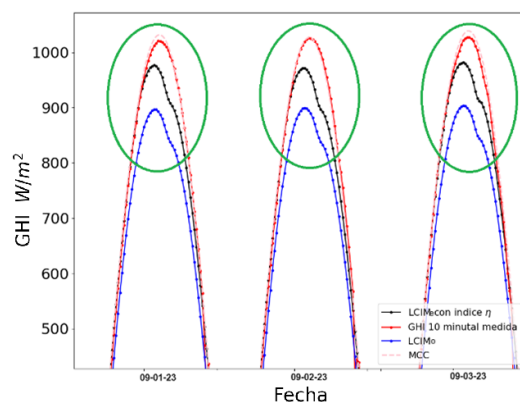


Figura 4: Desfase y atenuación del modelo LCIMo y LCIME con GHI medida, días 1/9/23 al 3/9/23.

Visto esto a través de una gráfica con el coseno del ángulo cenital con respecto al modelo LCIMo (Figura 5a), se observa un bucle indeseado. Se observó que tanto el modelo LCIMo como el LCIME mostraban perturbaciones como si estuvieran en presencia de nubosidad en días donde las mediciones correspondían a días de cielo claro. La Figura 5b se toma como referencia de esto, y para entenderlo mejor, se graficó el índice de nubosidad η , ρ_p y ρ_0 .

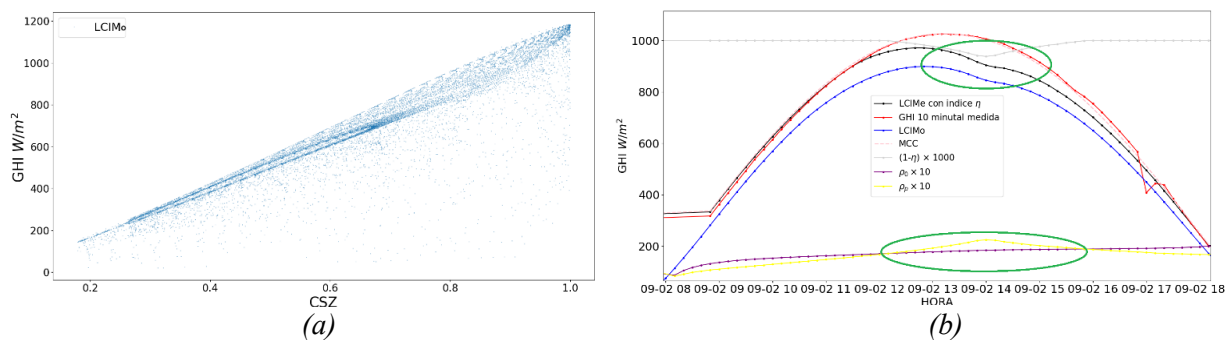


Figura 5: Graficas correspondientes al desfase, (a) CSZ vs LCIMo., (b) Variables vs línea temporal. Día 2/9/2023.

De la Figura 5b se observa, delimitado en verde en la parte superior, una atenuación en las GHI estimadas (LCIMo y LCIME), lo cual sugiere un aumento en el índice de nubosidad (η). En un día de cielo claro, η debería indicar ausencia de nubosidad ($\eta = 0$), por lo tanto $(1-\eta) \times 1000$ debería permanecer constante en 1000. Sin embargo, esto no sucede, como muestra la línea gris. Tras analizar los datos, encontramos que este comportamiento sucede debido a que, en algunos momentos de ausencia de nubosidad, no se verifica $\rho_p < \rho_0$, por lo que $\eta \neq 0$, lo que el modelo interpreta como nubosidad. Esto se puede observar destacado en verde en la parte inferior; aunque la medida de GHI 10-minutal muestra un día claro, $\rho_p > \rho_0$. Este comportamiento sugiere que la parametrización del brillo de fondo no es precisa, sugiriendo nubes donde no las hay. Es decir, si bien el brillo de fondo fue entrenado específicamente para El Rosal, la aridez del lugar hace que su albedo superficial presente valores muy altos en algunos momentos, haciendo que supere la parametrización sugerida por Tarpley (1979) incluso en algunos momentos de ausencia de nubes. Buscar alternativas para captar de forma realista el brillo de fondo en regiones áridas requiere un estudio más profundo y excede el alcance de este trabajo.

Como solución exploratoria, se incrementa a la parametrización del brillo de fondo en 0,05 unidades (definido por inspección visual de la serie), de modo de evitar que en cielo claro se tenga $\rho_0 > \rho_p$. Implementando este cambio, se obtiene un nuevo índice de nubosidad η_3 y realizando con este una nueva adaptación al modelo LCIMo, se obtuvieron los nuevos parámetros a y b que se encuentran en Tabla 4, el cual mejora el modelo cualitativamente y cuantitativamente ya que los indicadores de desempeño mejoran (Tabla 5 y Figura 6).

Tabla 4: Parámetros a y b ajustado para el modelo LCIME con los distintos índices η

El Rosal	Parámetros	
	a	b
LCIME con η	0,938	0,052
LCIME con η_3	0,986	-0,024

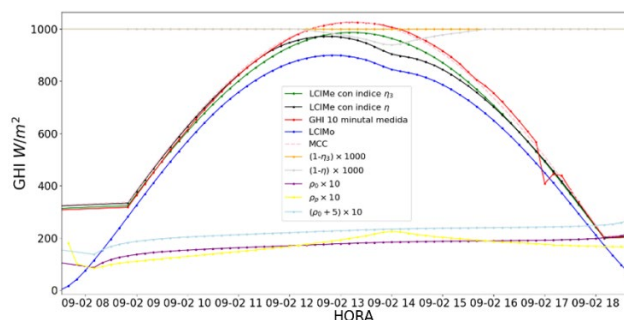


Figura 6: Variables sobre línea temporal corregida, día 2/9/2023.

De la Figura 6, la curva verde muestra el modelo LCIME con este último índice, en donde se observa que está en fase con el modelo McClear y además no muestra la atenuación artificial debida a la

reflectancia del suelo, dado que en naranja se observa que este índice es igual a 0. En celeste se observa el nuevo ρ_0 el cual es mayor que ρ_p . A partir de este modelo LCIME con η_3 se procedió a calcular sus indicadores de desempeño contra los valores medidos en tierra, el resultado de estas métricas se encuentra en la siguiente Tabla 5:

Tabla 5: Métricas de desempeño utilizando modelos LCIM con distintos η . El Rosal

Modelo	MBD (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	rMBD (%)	rRMSE (%)	R ²
LCIMo	-44,6	105,8	-6,3	15,1	0,944
LCIME con η	2,1	90,8	0,3	13,0	0,949
LCIME con η_3	1,8	90,6	0,2	12,9	0,945

Se mantiene el rendimiento a nivel cualitativo del modelo LCIME con η (mejorando levemente las métricas de desempeño) a la vez que se corrigen artificios indeseados a partir de η_3 . No obstante, esto aún puede mejorarse mediante estudios sobre la reflectancia del suelo en El Rosal. De igual manera que para la Capital, la Tabla 5 muestra que el modelo LCIME para El Rosal reduce tanto los errores rMBD como rRMSE en comparación con el modelo LCIMo en un 6,0% y 2,2%, respectivamente.

CONCLUSIONES

Se evaluaron los modelos LCIM y Heliosat-4, cuyos errores en los sitios de estudio son del 20,1% y 27,7% para Salta, y del 15,1% y 29,4% para El Rosal, respectivamente, utilizando las métricas rRMSE normalizadas con el promedio de las medidas, 512 W/m² y 699 W/m². Se observó a partir de la Tabla 3 que el modelo LCIMo se ajusta mejor que el modelo Heliosat-4 en ambos sitios.

El modelo LCIMo se reentrenó localmente recalculando sus parámetros empíricos. Los nuevos valores son $a = 0,875$ y $b = 0,095$ para la ciudad, y $a = 0,986$ y $b = -0,024$ para El Rosal (con el modelo LCIME entrenado usando η_3) en comparación con los valores originales $a = 0,855$ y $b = 0,111$. Según la desviación rRMSE, el modelo LCIME tiene un error del 19,7% y 12,9%, mientras que el modelo LCIMo tiene un error del 20,1% y 15,1% para Salta Capital y El Rosal, respectivamente. Esto indica que el ajuste proporciona una reducción de este error del 0,4% para Salta Capital, lo cual no es muy significativo considerando que aún queda margen para reducir este error tomando como referencia la Pampa Húmeda donde el rRMSE es del 16% (Laguarda et al., 2021). Para El Rosal, este ajuste proporciona una reducción del rRMSE del 2,2 %, lo cual es relevante, teniendo en cuenta que el error del modelo LCIME aplicado al paraje ya es menor que el correspondiente para la Pampa Húmeda.

Aunque no se cuenta con una serie temporal de datos de GHI de más de un año, se observó que el modelo LCIMo se ajusta mejor en El Rosal en comparación de Salta Capital. No obstante, en El Rosal, el modelo LCIMo muestra artificios al compararlo con las mediciones terrestres. En algunos momentos del año el modelo interpreta que hay presencia de nubes debido a valores de albedo del suelo más altos en este lugar que para los que fue desarrollado. El procedimiento realizado mostró que existe espacio de mejora en el modelo del brillo de fondo actualmente utilizado en el modelo LCIMo cuando se aplica en zonas áridas. Los resultados a partir del nuevo índice η_3 muestran que el modelo admite varias mejoras en ese sentido, quedando estas mejoras fuera del alcance de este trabajo.

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R. (2017). Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. *Universidad de la Republica. Facultad de Ing.*
- Johnson, D. B., Flament, P. y Bernstein, R. (1994). High-resolution satellite imagery for mesoscale meteorological studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5-33.
- 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. *Solar Energy*, 199, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.005>

- Laguarda, A. (2021). Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre: Modelos físicos e híbridos utilizando información satelital sobre la Pampa Húmeda. *Udelar. FI*.
- Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M., Luza, S., Burgos, B., Stern, V. y Alonso-Suarez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48, 1-9.
- Laguarda, A., Alonso-Suarez, R. y Abal, G. (2023). Improved estimation of hourly direct normal solar irradiation (DNI) using geostationary satellite visible channel images over moderate albedo areas. *Solar Energy*, 259, 30-40. doi:10.1016/j.solener.2023.04.042.
- Lefevre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-klick, C. y Arola, A. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. (C. P. Göttingen, Ed.) *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2403-2418.
- LES, a. d. (s.f.). En LES – Laboratorio de Energía Solar. URL: <<http://les.edu.uy>> [consulta: mayo 2024]
- Linke, F. (1992). Transmission-koeffizient und trubungsfaktor. *Beitr. Phys. Atmos.*, 10, 91-103.
- Louche, A., Peri, G. y Iqbal, M. (1986). An analysis of Linke turbidity factor. *Solar energy*, 37(6), 393-396. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90028-9).
- Peel, M., Fynlayson, B., y McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633 - 1644.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., Gschwind, B. y Klüser, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1), 33-57.
- Rigollier, C., Bauer, O. y Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68(1), 33-48. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9).
- Rivera, N., Salazar, G. y Laguarda, A. (2024). Analisis de la calidad de mediciones de la irradiancia solar en plano horizontal (GHI) y evaluacion del desempeño de los modelos de GHI en codiciones de cielo claro para dos sitios en la Provincia de Salta. *En Revisión*.
- Tarpley, J. (1979). Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary. *Journal of Applied Meteorology*, 18(9), 1172-1181.

IMPLEMENTATION OF THE LCIM MODEL FOR ESTIMATING SOLAR RADIATION AT THE SURFACE IN SALTA CAPITAL AND EL ROSAL

ABSTRACT: This work analyzes the performance of the LCIM satellite model for estimating Global Horizontal Irradiance (GHI) under all-sky conditions at two sites in the province of Salta, Argentina, outside its training region: Salta Capital (1200 meters above sea level) and El Rosal (3355 meters above sea level). This semi-empirical model was developed by the Laboratorio de Energía Solar of the Universidad de la Republica, Uruguay (LES), for the Pampa Húmeda. Additionally, a retraining of the model's empirical parameters is proposed and analyzed to improve the accuracy of its GHI estimates at the studied sites. For this purpose, the following data were required: (i) GHI measurements at both sites for training and validation, (ii) a precise model to estimate GHI under clear sky conditions (the ESRA model for Salta Capital and the McClear model for El Rosal), and (iii) information from the visible channel of the GOES-East satellite. Furthermore, the estimates from the Heliosat-4 model, provided by the free access service of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), were evaluated as a reference. The results show that the original LCIM model adapts better to ground measurements than the Heliosat-4 model (LCIM rRMSE: 20.1% and 15.1%, while Heliosat-4: 27.7% and 29.4%, for Salta Capital and El Rosal, respectively). Additionally, the calculation of the cloud index was analyzed and adjusted for its application to a high surface albedo area like El Rosal. The rRMSE deviations of the adaptations were 19.7% and 12.9% for Salta and El Rosal (with the new index), respectively, improving its performance over the original version at both sites (20.1% and 15.1%).

Keywords: solar irradiance on a horizontal plane, satellite model, all-sky models, LCIM, Heliosat-4.