

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ADAPTACIÓN AL SITIO APLICADO A LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL MEDIDA EN LA CIUDAD DE SALTA, ARGENTINA

Salazar G.A.^{1,2}, Alonso-Suárez R.³, Laguarda Cirigliano A.³, Ledesma R.D.²

¹Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia 5150, 4400, Salta Capital, Argentina.

²INENCO - CONICET, Avda. Bolivia 5150, 4408, Salta Capital, Argentina.

³Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565 (6° Piso), 11300, Montevideo, Uruguay.

e-mail: german.salazar@conicet.gob.ar

RESUMEN: En este trabajo se analizan los resultados de aplicar técnicas de adaptación al sitio a estimaciones satelitales 15-minutales de irradiación solar global en plano horizontal (GHI) de las bases de datos CAMS y SOLCAST, utilizando medidas de la ciudad de Salta (Argentina) durante el periodo 2013-2014. Se analizan dos implementaciones de la adaptación lineal simple, la adaptación por CDF, y su combinación CDF+Lineal, utilizando la adaptación lineal de mejor desempeño individual para la combinación. La ganancia de los procesos de adaptación lineal se evalúa por comparación con el desempeño de los estimativos en su versión original, que también se evalúa en este trabajo para el sitio específico. Los resultados muestran que efectivamente no es recomendable utilizar la primera adaptación lineal analizada y que tanto la segunda adaptación lineal como la adaptación por CDF ofrecen buenos resultados para CAMS y marginales para SOLCAST, que ya presenta un buen desempeño en su versión original. La combinación de CDF+Lineal no ofrece una mejora significativa, pero logra eliminar la pequeña tendencia subsistente entre los estimativos adaptados por CDF y las medidas de tierra.

Palabras clave: GHI, modelos satelitales, adaptación lineal, CDF.

INTRODUCCIÓN

La caracterización temporal de la irradiación solar global en plano horizontal (GHI) en sitios específicos es necesaria para el dimensionar emprendimientos que aprovechan la energía solar. Disponer de una serie temporal extensa, completa y precisa de valores de GHI permite realizar una caracterización climatológica del recurso con baja incertidumbre, incluyendo sus valores medios mensuales y anuales, y su variabilidad interanual, aspectos que son centrales en la evaluación del retorno económico y riesgo financiero de un emprendimiento de energía solar (Schnitzer et al., 2012). En los últimos años han sido significativas las mejoras realizadas en los modelos que utilizan imágenes de satélites geoestacionarios para estimar la irradiación a nivel de suelo (Perez et al., 2002; Rigollier et al., 2004; Alonso-Suárez et al., 2012, Qu et al. 2017). Todos los modelos satelitales presentan un cierto grado de error, o desviación, entre los valores reales y los estimados. Así, cuanto menor sea ese error (estadísticamente evaluado) respecto de valores medidos, mayor será la representatividad de sus estimaciones y se podrá utilizar toda la extensión temporal disponible de esas Bases de Datos Satelitales (BDS), que típicamente abarcan casi dos décadas. Es posible hacer esto para el sitio específico y su región cercana, siempre que ésta tenga condiciones climáticas y geográficas afines a las del sitio de validación/adaptación.

Para el caso de la posición geográfica de la ciudad de Salta (Lat:-24.7°, Long: -65.4°, Alt: 1200 msnm)

son pocas las BDS de calidad disponibles, entre las que se encuentra CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*), que utiliza el modelo Heliosat-4 para generar las estimaciones (Qu et al., 2017). En un trabajo previo se comprobó que esta base de datos es mejor que otras (Salazar et al., 2020a). Para el caso de Salta, el RMSE encontrado fue de 5.8% para las medias mensuales de valores diarios de los años 2013 a 2015, utilizando datos terrestres que pasaron los controles de calidad del Baseline Solar Radiation Network BSRN (Long y Shi, 2008). Otras bases mostraron un desvío mayor (LSA-SAF: 7.6%; SSE: 14.8%; Meteonorm: 7.1%) al comparar sus estimaciones para el mismo periodo de tiempo. Si bien la información obtenida en base mensual o diaria es útil, más información puede obtenerse de datos en base horaria o sub-horaria.

El proceso conocido como adaptación al sitio (*site-adaptation* en inglés) es un procedimiento que permite “corregir” las estimaciones satelitales previstas para un sitio específico en base a mediciones terrestres. Es decir, a partir de valores medidos por un periodo de tiempo (estadísticamente representativo) de algunos años es posible obtener correcciones para las estimaciones, pudiendo luego extender esa corrección a toda la serie temporal satelital de largo plazo. Existe una serie de métodos para realizar esta adaptación al sitio descrito en Polo et al. (2020). Dentro de estos métodos destacan dos por su simplicidad y uso extendido: la adaptación lineal y la adaptación en base a funciones de probabilidad acumulada (CDF por *Cumulative Distribution Function*, en inglés), que son objeto del presente trabajo.

En este trabajo se realiza la adaptación al sitio de dos BDS para la ciudad de Salta, Argentina, a escala 15-min. Se consideran los estimativos satelitales del modelo Heliosat-4 (Qu et al., 2017), disponibles en el portal de libre acceso CAMS (<http://www.soda-pro.com/>), y del modelo comercial de la empresa SOLCAST (<https://solcast.com/>), a los que hemos accedido gratuitamente para su uso académico. Se evalúa el desempeño de ambas estimaciones originales para este sitio y se cuantifica la reducción de incertidumbre alcanzada por la adaptación lineal y la adaptación por CDF, y su combinación. Para la adaptación lineal se consideran dos implementaciones. Se analizan otros aspectos de la adaptación local, como la posible generación de datos corregidos sin sentido físico, como es el caso de los valores negativos para los procesos de adaptación lineal. Se concluye que una de las implementaciones de la adaptación lineal (que llamamos Lineal 1) no es adecuada, presentando una importante generación de valores negativos, y que la otra implementación (Lineal 2) y la adaptación por CDF son razonablemente equivalentes en desempeño. Finalmente, se prueba una adaptación híbrida, combinando las adaptaciones por CDF y Lineal 2, no encontrándose valor agregado a este procedimiento respecto a las adaptaciones por separado. Este es el primer trabajo local que analiza los procedimientos de adaptación al sitio de estimaciones satelitales.

METODOLOGÍA

Datos y control de calidad

Para este análisis se utilizaron datos de irradiancia solar global en el plano horizontal (GHI) medidos en el Campus de la Universidad Nacional de Salta, Argentina, durante el periodo 2013-2014. Los valores de GHI fueron medidos cada 1 minuto utilizando un piranómetro Eppley PSP conectado a un *datalogger* CR1000. El control de calidad de los datos fue aplicado a escala minutal utilizando el procedimiento listado a continuación, propuesto por Nollas (2021). El procedimiento considera un límite superior e inferior para la GHI (ítem 1), y un límite inferior (ítem 2) y un límite superior (ítem 3) para el índice de claridad instantáneo (Kt), definido como la GHI minutal normalizada por su correspondiente irradiancia en un plano horizontal en el tope de la atmósfera.

$$1) 0 < \text{GHI} < 1.5 \text{ Gsc S} \cos(\text{SZA})^{1.2} + 100 \text{ W/m}^2$$

$$2) \text{Kt} > (80^\circ - \text{SZA}) * 10^{-4}/^\circ$$

$$3) \text{Kt} < 1.4$$

En el listado anterior Gsc es el valor de la Total Solar Irradiance TSI (1367 W/m²), S es la corrección por

la excentricidad de la órbita terrestre en torno al Sol y SZA es el ángulo cenital (en grados). Los valores medidos que no cumplen estos requisitos fueron descartados.

Para poder compararlos contra los valores de GHI de las BDS, los valores minutales fueron integrados a la base temporal 15-minutal solidaria con las estimaciones, siguiendo el criterio de descarte presentado en Salazar et al. (2020b). Dentro de cada grupo de 15 valores de GHI, si el filtro remueve más de 7 valores (50% de los datos minutales), ese valor de 15-minutos no se genera (se asigna una etiqueta de no válido); caso contrario, se calcula como el promedio de los valores minutales que pasan el procedimiento de filtrado. Luego del filtrado, el 76% de los valores diurnos de GHI 15-minutal quedaron presentes en la base de datos de medidas (siendo un total de 27908 muestras).

En este artículo se aplicaron dos técnicas de adaptación al sitio: la adaptación lineal y la adaptación en base a las funciones de probabilidad acumulada (CDF), conocida como corrección por mapeo cuantílico (Polo et al., 2016; 2020). Estas adaptaciones buscan reducir o eliminar el sesgo sistemático (desvío promedio) de las estimaciones a través de un ajuste a mediciones terrestres. El procedimiento debe ser tal que permita obtener la función de corrección utilizando el período temporal concurrente de estimaciones y medidas, para luego ser aplicado directamente sobre las estimaciones de largo plazo, en períodos donde las mediciones no estarán disponibles. Típicamente, aunque no en todos los casos, esta reducción del sesgo trae aparejada una reducción del desvío cuadrático medio.

Adaptación lineal al sitio

La adaptación lineal busca corregir el sesgo promedio de la estimación a partir de la regresión de primer orden que relaciona los valores estimados con los medidos (i.e. la línea de tendencia de un diagrama de dispersión), y se la utiliza para que la línea de tendencia de los datos corregidos coincida con $y=x$. Una implementación de esta idea propuesta en la bibliografía (Polo et al. 2016, 2020) es utilizar la siguiente expresión: $y_{\text{adap}} = y_{\text{BDS}} - ((a-1)x_{\text{medi}} + b)$, donde y_{BDS} es la estimación satelital, y_{adap} es la estimación corregida, x_{medi} son los valores medidos y los parámetros a y b son la pendiente y el intercepto de la regresión lineal, respectivamente. La ecuación anterior requiere de los datos medidos para aplicar la adaptación, por lo que no sería posible su utilización para corregir una serie completa de la BDS, sino solo el periodo en que se dispone simultáneamente de datos medidos y de la BDS. Por tanto, en este trabajo abordamos otros dos procedimientos de adaptación lineal, que permiten cumplir con el objetivo de reducir el sesgo y obtener una línea de tendencia $x = y$ para los datos corregidos, y que, una vez ajustados en base a las medidas, pueden ser aplicados sobre las estimaciones satelitales sin necesidad de las mediciones. Estas dos alternativas son las siguientes:

$$y_{\text{adap}} = (y_{\text{BDS}} - b) / a \quad (1)$$

donde a y b surgen de $y_{\text{BDS}} = ax_{\text{medi}} + b$.

$$y_{\text{adap}} = ay_{\text{BDS}} + b \quad (2)$$

donde a y b surgen de $x_{\text{medi}} = ay_{\text{BDS}} + b$

Estos procedimientos aseguran que el desvío promedio de la serie satelital corregida será nulo respecto a las mediciones. Sin embargo, uno de los inconvenientes de las adaptaciones lineales es que la serie corregida puede pasar a tener algunos valores negativos (físicamente inconsistentes). Una opción aquí es imponer que los estimativos que artificialmente se hagan negativos en el proceso de adaptación sean igualados a 0 W/m^2 . Otra opción es ignorar estos valores (considerarlos como dato no válido). En cualquiera de ambos casos se trata de una modificación a posteriori de la adaptación lineal que afecta la métrica de desvío promedio, no siendo necesariamente nula luego de esta modificación. En este trabajo tomamos en cuenta en la evaluación de desempeño este inconveniente importante de la generación de valores negativos, que se realiza de la siguiente manera: (i) se contabiliza el porcentaje de datos negativos obtenidos por cada metodología, (ii) los

valores negativos se clasifican como dato “no válido” a efectos del cálculo de las métricas de desempeño.

Adaptación por mapeo cuantílico (CDF)

En la adaptación por CDF se modifican las estimaciones satelitales para que su función de probabilidad acumulada (CDF) se aproxime mejor a la de los datos medidos (Polo et al., 2016, 2020). Esto se realiza utilizando ambas CDFs, la de los valores medidos (CDF_{medi}) y la de los valores de la BDS (CDF_{BDS}), a través de la siguiente ecuación:

$$y_{adap} = CDF_{medi}^{-1}(CDF_{BDS}(y_{BDS})) \quad (3)$$

El procedimiento de mapeo cuantílico no genera valores negativos en la serie satelital corregida, y logra también los objetivos anteriores requeridos para la adaptación de sitio.

Métricas de desempeño

Las métricas de desempeño que se utilizarán son el desvío promedio (MBE por *Mean Bias Error*, en inglés), el desvío absoluto promedio (MAE por *Mean Absolute Error*, en inglés) y el desvío cuadrático medio (RMSE por *Root Mean Square Error*, en inglés). Sus definiciones son las estándar. El signo del MBE es tal que es positivo si los estimativos sobreestiman sistemáticamente sobre las medidas, y negativo en caso contrario. Esas cantidades se pueden expresar en forma relativa como porcentaje de la medida de las medidas, que en este trabajo es de 409 W/m². Finalmente, para las metodologías de adaptación al sitio se contabilizan la cantidad de valores negativos producidos, y se expresan como porcentaje de la cantidad de medidas válidas (N = 27908).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan los resultados de desempeño de las metodologías de adaptación al sitio descritas en la sección anterior. La línea de base está dada por la incertidumbre de cada modelo satelital sin adaptación local. En ese sentido, la Tabla 1 presenta la evaluación de desempeño de los estimativos originales contra los datos medidos en Salta para el periodo de estudio (2013-2014) y en base 15-minutal. Complementariamente, la Figura 1 muestra los gráficos de dispersión entre las medidas y los estimados. Es posible ver que los estimativos SOLCAST presentan un desempeño significativamente mejor que los estimativos CAMS en todas las métricas. Esto es también fácilmente observable en la Figura 1, donde la dispersión de los estimativos CAMS respecto a las medidas es mayor que la de los estimativos SOLCAST. De los indicadores de desempeño, destaca especialmente el bajo MBE (+0.8%) de los estimativos SOLCAST originales. Su RMSE (23.6%) se encuentra dentro de valores típicos. Destaca también el alto MBE (+6.1%) y RMSE (37.2%) de los estimativos CAMS. A modo de referencia, en Laguarda et al. (2021) se hallaron para la Pampa Húmeda (una región de características climáticas diferentes a las de Salta, cuyo centro se ubica unos 900 km al sureste) indicadores 10-minutales de MBE=-2% y RMSE=21% para estimativos CAMS y de MBE=+1% y RMSE=16% para estimativos del modelo semi-empírico CIM-ESRA localmente ajustado en la región (Laguarda, 2021). En suma, los estimativos SOLCAST presentan en Salta el desempeño típico de modelos satelitales de buenas prestaciones sin ajuste local, es decir, sin ajustar del modelo a las particularidades de la región (procedimiento muy distinto al de adaptar estimativos al sitio). Por su parte, los estimativos CAMS presentan para Salta una alta incertidumbre.

Métrica	MBE (W/m ²)	MBE (%)	MAE (W/m ²)	MAE (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)
CAMS	+25	+6.1	91	22.2	152	37.2
SOLCAST	+3	+0.8	58	14.2	96	23.6

Tabla 1. Indicadores de desempeño de los estimativos originales. La media de normalización es 409 W/m².

Más allá que se trata de modelos de naturaleza distinta, con distinta caracterización y modelado de las condiciones de cielo claro y de la nubosidad, una diferencia sustancial entre ambas estimaciones es la información satelital que utilizan como base. La plataforma SOLCAST utiliza el satélite geoestacionario más adecuado para cada región, siendo el satélite GOES-East (EUA, posición geoestacionaria -75°W) para la región de Salta, mientras que el CAMS trabaja exclusivamente con el satélite MSG (Europa, posición geoestacionaria 0°). El ángulo de visión elevado del satélite MSG para esta región afecta significativamente el desempeño de los estimativos CAMS, especialmente en condiciones de nubosidad (Laguarda et al., 2020). Estos sets de estimativos con desempeño tan distintos permiten evaluar las metodologías de adaptación a sitio en escenarios diferentes: estimativos de alta incertidumbre (CAMS) y estimativos de incertidumbre típica (SOLCAST).

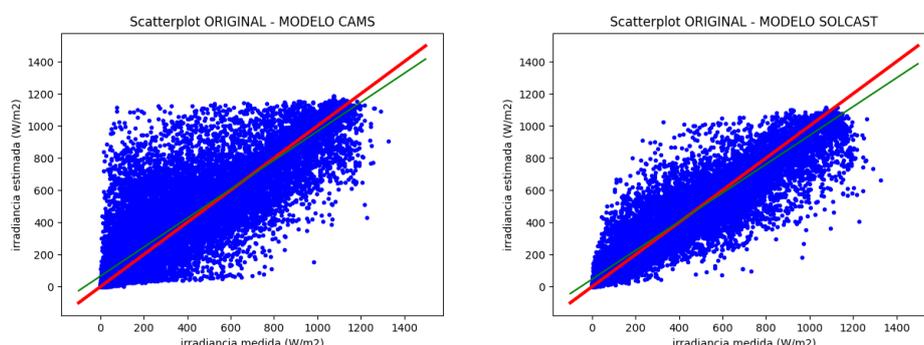


Figura 1. Estimativos de los BDS sin procesar CAMS (izq.) y SOLCAST (der.) contra las medidas en tierra. La recta roja representa $y=x$ mientras que la verde indica la tendencia de los datos.

Adaptación de sitio lineal

Para realizar esta adaptación se aplican las ecuaciones 1 o 2 a los pares de datos medidos y estimados (que llamaremos métodos Lineal 1 y Lineal 2, respectivamente). La Figura 2 muestra el resultado de ambas adaptaciones lineales para ambos conjuntos de datos. Es posible observar que en todos los casos se logra el objetivo de que la línea de tendencia de los estimativos corregidos coincida con la línea $x = y$. En las Tabla 2 y 3 se muestran las métricas de desempeño de las series adaptadas por los métodos Lineal 1 y 2, respectivamente. En la última columna de estas Tablas se indica el porcentaje de datos que pasan a ser negativos en cada caso luego de la adaptación.

La adaptación lineal bajo la implementación Lineal 1 disminuye el sesgo de los modelos pero tiende a aumentar el MAE y el RMSE, a la vez que genera una alta proporción de valores negativos (17.9 y 8.6% para CAMS y SOLCAST, respectivamente). Los valores negativos generados por esta metodología son muestras de baja irradiancia asociadas al inicio y final del día, y por tanto, si bien los valores negativos generados son pequeños, esta metodología no resulta adecuada. En la Figura 2 (paneles superiores) estos valores negativos se encuentran eliminados, dado que no participan de la evaluación de desempeño. El fenómeno es más apreciable para los estimativos CAMS, donde la necesidad de adaptación local es mayor. Los valores no nulos y no pequeños de MBE para esta adaptación están directamente relacionados con esta alta proporción de valores negativos. Tanto por los valores negativos generados, como por la baja disminución de MBE y el aumento de MAE y RMSE, esta implementación no debe considerarse.

Métrica	MBE (W/m ²)	MBE (%)	MAE (W/m ²)	MAE (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)	Negativos (%)
CAMS	+20	+4.8	113	27.6	173	42.3	17.9
SOLCAST	+4	+1.0	66	16.2	104	25.5	8.6

Tabla 2. Indicadores de desempeño para la adaptación lineal según la Ec. (1) de los estimativos originales.

Métrica	MBE (W/m ²)	MBE (%)	MAE (W/m ²)	MAE (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)	Negativos (%)
CAMS	0	0.0	93	22.7	145	35.5	0.00
SOLCAST	0	0.0	57	13.9	97	23.6	0.9

Tabla 2. Indicadores de desempeño para la adaptación lineal según la Ec. (1) de los estimativos originales.

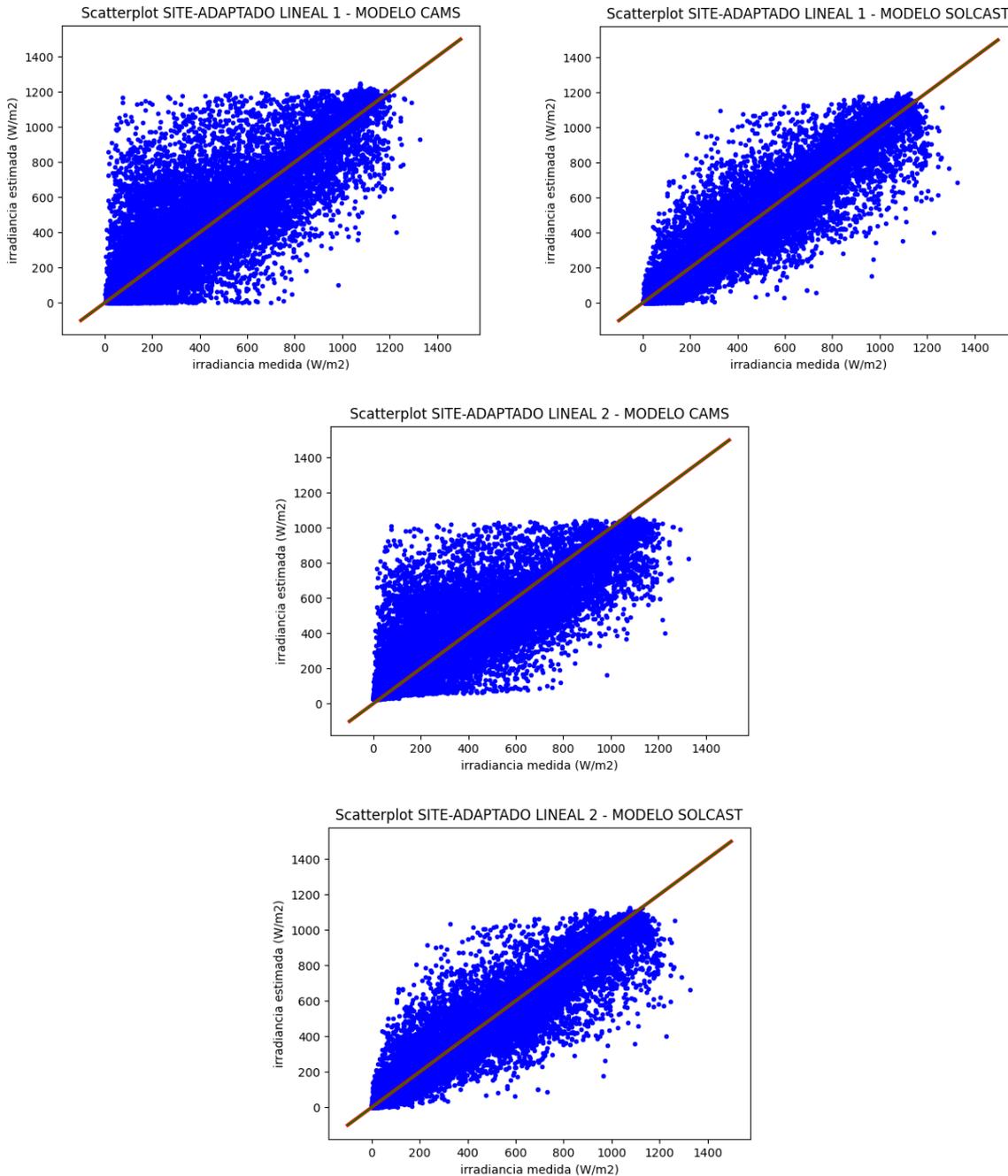


Figura 2. Estimativos de los BDS CAMS (izq.) y SOLCAST (der.) modificados por las dos técnicas de ajuste lineal: Lineal 1 (arriba) y Lineal 2 (abajo). La recta roja representa $x = y$, y coincide con la recta de tendencia (verde) de los estimativos adaptados.

La adaptación lineal bajo la implementación Lineal 2 no presenta estas dificultades: la cantidad de valores negativos generados es significativamente menor, el MBE se hace igual a cero y se logra reducir el MAE y RMSE. Es posible observar que su efecto es importante para los estimativos de mayor incertidumbre (CAMS), logrando reducir algunos puntos el RMSE, aunque no el MAE. En el caso de los estimativos de menor incertidumbre (SOLCAST), la adaptación aumenta en aproximadamente 2% tanto MAE como RMSE. En lo que refiere a valores negativos, no se observan para el caso CAMS y es menor al 1% para el caso SOLCAST.

Adaptación de sitio usando la función de distribución acumulativa (CDF)

Los resultados de la adaptación por CDF (Ec. 3) se muestran en la Tabla 4 y en la Figura 3. Este método muestra buenos resultados eliminando el sesgo para ambos modelos y logrando que la línea de tendencia de los datos adaptados aproxime más que la original la recta $x = y$ (notar que la mejora en este sentido no es perfecta). En el caso de la adaptación CAMS el MAE y el RMSE disminuyen, mientras que para SOLCAST se mantienen estables. Por otro lado, por su construcción, el método por CDF no genera valores negativos de irradiancia al modificar las series originales, como se verifica en la última columna de la Tabla 4. A diferencia de los métodos de adaptación lineal, la corrección de series por CDF puede generar series modificadas que presentan tendencia con respecto a las mediciones, como se observa en la Figura 3. Este efecto se puede corregir combinando la técnica de CDF con la Lineal 2, como se muestra a continuación.

Métrica	MBE (W/m ²)	MBE (%)	MAE (W/m ²)	MAE (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)	Negativos (%)
CAMS	0	0.0	90	22.1	150	36.6	0.00
SOLCAST	0	0.0	57	14.1	98	23.9	0.00

Tabla 4. Indicadores de desempeño para la adaptación por CDF según la Ec. (3) de los estimativos originales. La media de normalización es 409 W/m².

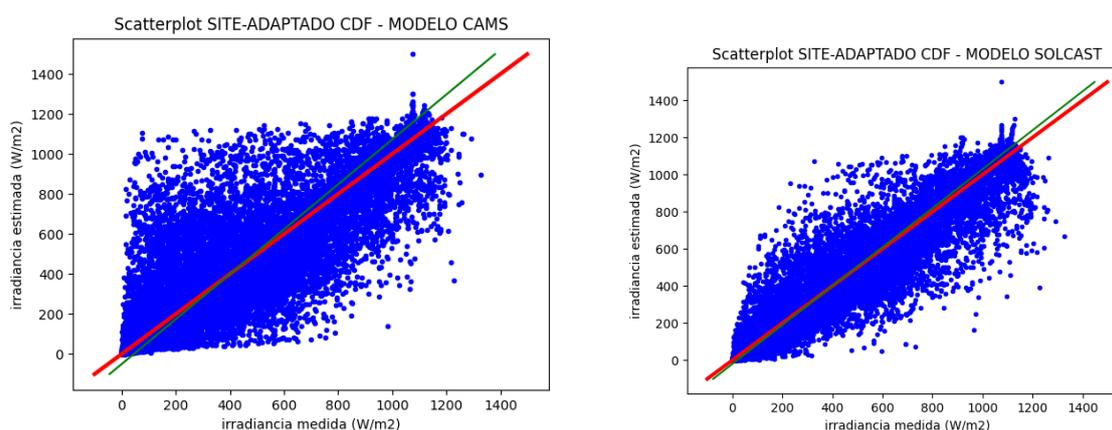


Figura 3. Estimativos de los BDS CAMS (izq.) y SOLCAST (der.) post-procesados por CDF. La recta roja representa $x=y$ mientras que la verde indica la tendencia de los datos.

Adaptación de sitio combinada por CDF y lineal

En la Tabla 4 se muestran las métricas de desempeño de los estimativos de las BDS procesados utilizando el método híbrido de CDF+Lineal 2 (en ese orden), con el fin de remover la tendencia que se observa en la Figura 3. Las curvas de dispersión de los estimativos modificados por este método se muestran en la Figura 4. Las series obtenidas por este método presentan métricas muy similares a las obtenidas por la adaptación Lineal 2, a la vez que la CDF de las series modificadas coinciden con la de las medidas. La ganancia del método híbrido con respecto al Lineal 2 es marginal.

Métrica	MBE (W/m ²)	MBE (%)	MAE (W/m ²)	MAE (%)	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)	Negativos (%)
CAMS	0	0.0	95	23.2	146	35.6	0.00
SOLCAST	0	0.0	57	14.0	97	23.6	0.00

Tabla 5. Indicadores de desempeño para la adaptación combinada de CDF y lineal (bajo la Ec. (3)) de los estimativos originales. La media de normalización es 409 W/m²

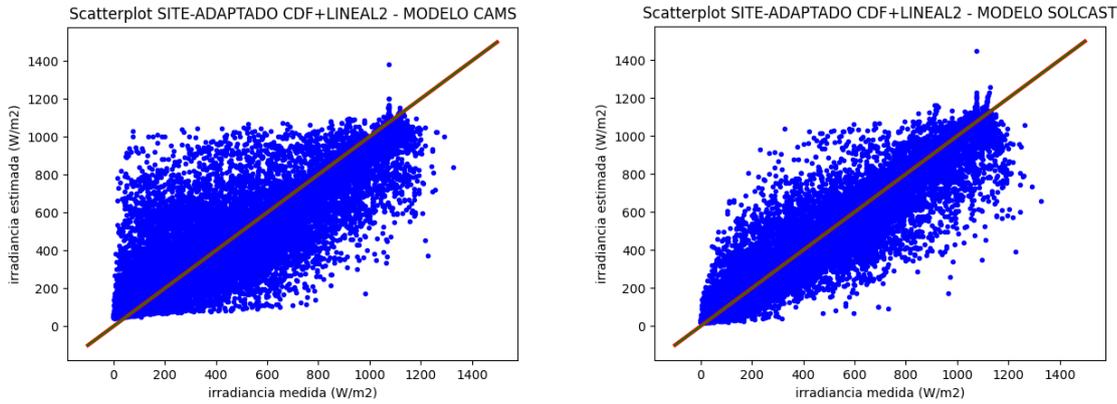


Figura 4. Estimativos de los BDS CAMS (izq.) y SOLCAST (der.) post-procesados por CDF y Ajuste Lineal 2. La recta roja representa $x=y$, y coincide con la recta verde en este caso.

Finalmente, en la Figura 5, se muestran las CDFs de las series de CAMS y SOLCAST originales y de las cuatro adaptaciones al sitio implementadas. También se agrega la CDF de los datos como referencia en azul. Se observa que la serie obtenida con la adaptación por CDF (línea amarilla) coincide con la CDF de las medidas (azul). Esto es de esperarse por la construcción del método. Para CAMS (Figura 5, izq.), se observa la diferencia entre la CDF de la serie original con los datos. A nivel cualitativo se aprecia como los métodos Lineal 2 y CDF son los más satisfactorios. El método híbrido muestra buenos indicadores, pero tiene problemas en los valores bajos de irradiancia (menores a 70 W/m²).

Por último, la CDF obtenida por el método Lineal 1 muestra no ser adecuada, lo que condice con los resultados mostrados en la Tabla 2. Para SOLCAST (Figura 5, der.) se observan características similares, con la salvedad de que la CDF del modelo original ya presenta un comportamiento satisfactorio. La ganancia del proceso de adaptación lineal se evidencia en estimativos de alta incertidumbre. En suma, los métodos Lineal 2 y CDF son satisfactorios, el método CDF+Lineal es bueno, pero muestra un comportamiento artificial para valores muy bajos de irradiancia, y el método Lineal 1 no es adecuado.

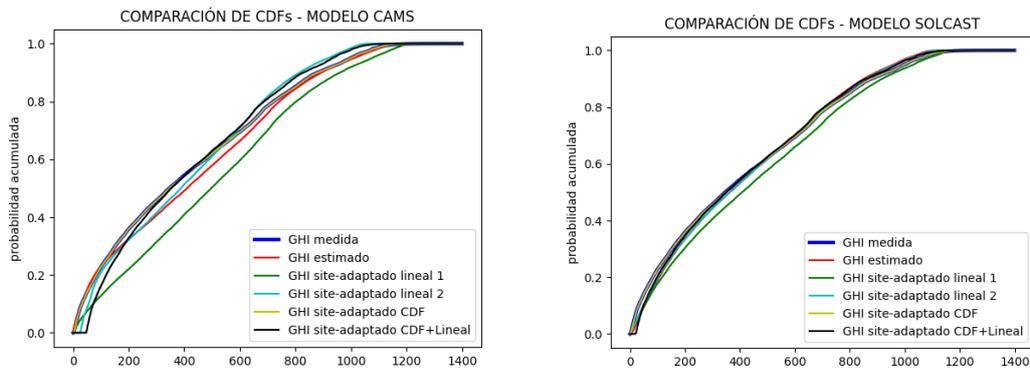


Figura 5. CDFs las medidas en tierra, de los estimativos originales de los BDS y de los estimativos post-procesados por los cuatro métodos mencionados, CAMS (izq.) y SOLCAST (der.).

CONCLUSIONES

Se implementan y evalúan cuatro métodos de adaptación local o site-adaptation sobre estimativos de dos bases de datos disponibles para la localidad de Salta: CAMS y SOLCAST. La serie original de SOLCAST muestra un buen desempeño (MBE de 0.6% y RME de 23.6%), por lo que al aplicar los procedimientos de adaptación al sitio no se observan mejoras considerables en su incertidumbre, más allá de la reducción de sesgo sistemático. En el caso de CAMS, sus estimativos sin procesar muestran en promedio una alta subestimación y alta incertidumbre (MBE de 6.1% y RME de 37.2%), y por tanto son más susceptibles a mejoras por las adaptaciones locales estudiadas.

Los métodos de adaptación local aplicados son: dos versiones de la adaptación lineal, una adaptación por CDF (mapeo cuantílico) y una combinación de las anteriores (CDF+Lineal), donde se utiliza el mejor procedimiento lineal de los dos analizados. La ganancia de las distintas adaptaciones implementadas se mide con respecto al desempeño de referencia, obtenido de la evaluación de los estimativos en su forma original. Se destaca la adaptación Lineal 2, que remueve totalmente el sesgo de los estimativos generando muy pocos valores negativos (menos del 1%). Su implementación es simple y su aplicación sobre las series originales de CAMS y SOLCAST implica una ganancia, en términos de RMSE, de 1.7% para el primero y marginal para el segundo, respectivamente. El efecto de la adaptación por CDF muestra un resultado muy similar al de la adaptación Lineal 2, pero en este caso sin la generación de ningún valor negativo (por la construcción del método). Sin embargo, este método genera estimativos con tendencia en los estimativos modificados respecto a las mediciones terrestres. Para suplir este fenómeno se implementa un método híbrido combinando los métodos de CDF + Lineal 2. Esta estrategia no genera una ganancia apreciable con respecto a la adaptación individual por CDF o Lineal 2. Por último, en vista de los resultados obtenidos, no se recomienda el uso de la adaptación Lineal 1, dado que el desempeño de los estimativos no mejora significativamente (y empeora en algunos casos), a la vez que se genera una alta proporción de valores negativos que hay que descartar.

REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., and Musé, P. (2012). Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: application to Uruguay. *Solar Energy* 86(11):3205–3215.
- 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., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M.J., Luza, S., Burgos, L., Stern, V., Alonso-Suárez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. En evaluación en Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA, ASADES).
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., 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.
- 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., Kmieciak, M., Chain, C., George, R., and Vinola, F. (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, 73(5):307–317.
- Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J.A., Meyer, R., Gueymard, C., Sári, M., Martín, L., Mieslinger, T., Blanc, P., Grant, I., Boland, J., Ineichen, P., Remund, J., Escobar, R., Troccoli, A., Sengupta, M., Nielsen, K.P., Renne, D., Geuder, N., Cebecauer, T. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar*

Energy 132:25-37.

- Polo, J., Fernández-Peruchena, C., Salamalikis, V., Mazorra-Aguiar, L., Turpin, M., Martín-Pomares, L., Kazantzidis, A., Blanc, P., Remund, J. (2020). Benchmarking on improvement and site-adaptation techniques for modeled solar radiation datasets. *Solar Energy* 201:469-479.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., and Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterization for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- Rigollier, C., Lefevre, M., and Wald, L. (2004). The method Heliosat-2 for deriving short wave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2):159–169.
- Schnitzer, M., Thuman, C., and Johnson, P. (2012). The impact of solar uncertainty on project financeability: mitigating energy risk through on-site monitoring. In *Proceedings of the American Solar Energy Society (ASES)*, pages 1–5, Denver, Colorado, UnitedStates.
- Salazar, G., Duran, G., Romano Armada, M., Marzo, A., Farias, R., Castro Vilela, O. (2020a). Estudio de valores diarios medios mensuales de GHI medidos en Argentina y Brasil. Comparación contra Bases de Datos Satelitales. *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza (Brasil)*.
- Salazar, G., Gueymard, C., Bezerra Galdino, J., Castro Vilela, O., Fraidenraich, N. (2020b) Solarirradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117; 109478
- Nollas, F. Comunicación personal. 2021.

ABSTRACT: In this work the application of site-adaptation procedures to CAMS and SOLCAST's 15-min global horizontal solar irradiance (GHI) estimates is assessed by using 2013-2014 ground measured data at Salta city (Argentina). Two implementations of the simple linear site-adaptation procedure, the CDF site-adaptation and their combination CDF+Linear are evaluated, using the linear site-adaptation procedure with individual better performance for the combination. The gain of the inspected procedures is quantified by comparison with the performance of the satellite estimated in their original form, that is also assessed in this work for the specific site. The results show that the first analyzed linear adaptation procedure is not recommended, and that both the second linear adaptation procedure and the CDF adaptation provide an improvement over the original estimates' performance. This is significant for the CAMS estimates but marginal for the SOLCAST estimates, which have a good performance for the site in their original version. The combination of site-adaptation procedures (CDF+Linear) does not provide a significant improvement, but allows to eliminate the small trend between the CDF site-adapted estimates and the measured data.

Keywords: GHI, satellite models, linear site-adaptation, CDF.