

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE MEDICIONES DE IRRADIANCIA SOLAR EN PLANO HORIZONTAL (GHI) Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS DE GHI EN CONDICIONES DE CIELO CLARO PARA DOS SITIOS EN LA PROVINCIA DE SALTA

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 llevó a cabo un análisis sobre la calidad de los datos de irradiancia solar medidos en Salta Capital y en El Rosal. Las mediciones fueron realizadas a nivel minutar, en los periodos del 10/08/2022 al 31/10/2023 y del 16/05/2023 al 31/12/2023, respectivamente. A partir de estos datos se evaluaron modelos de irradiancia solar global en el plano horizontal en condiciones de ausencia de nubes o cielo claro (CC): ESRA, ARG-P, ARG-P2 y McClear. La evaluación se realizó mediante análisis estadísticos para determinar el grado de correlación entre los valores medidos y los obtenidos por los diferentes modelos. Se utilizaron métricas de desempeño como el sesgo medio relativo (rMBD), error cuadrático medio porcentual (rRMSE), indicador de similitud (KSI) y coeficiente de regresión lineal (R^2), para evaluar la precisión de los modelos en relación con la radiación efectivamente recibida en la superficie terrestre en ambas ubicaciones en condiciones de cielo claro. Los resultados obtenidos indican que el modelo ESRA, es quien mejor se ajusta a los valores en tierra para la Capital, mientras que el modelo McClear para el paraje El Rosal, con un rRMSE de 3,9% y 2,9%, respectivamente. Además, el modelo ARG-P2 muestra un mejor desempeño en ambos sitios que su versión anterior ARG-P.

Palabras clave: irradiancia solar en plano horizontal, control de calidad, modelos de cielo claro.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de cielo claro (CC) son herramientas utilizadas en meteorología y energía solar para estimar la irradiancia solar incidente (en W/m^2) en la superficie terrestre en ausencia de nubes u otras obstrucciones meteorológicas. Su importancia radica en su utilidad para una variedad de aplicaciones, como la planificación de proyectos solares, la evaluación de la radiación en una ubicación específica, técnicas de pronóstico de radiación solar y la investigación climática. Estos modelos dependen de la geometría del sistema Sol-Tierra, considerando la ubicación geográfica, época del año y hora del día. Además, los modelos más precisos consideran algunos parámetros que representan el estado de la atmosfera.

Para su uso en ubicaciones específicas, es importante realizar una validación que permita evaluar cuán precisas son estas estimaciones en comparación con datos reales de radiación solar en condición de cielo claro observados en el terreno. Si bien existen estudios a nivel mundial como Antonanzas-Torres et al. (2019); Engener y Mills (2015); Gueymard (2012) y a nivel regional Laguarda y Abal (2017); Laguarda et al. (2020); Russo et al. (2022) las condiciones atmosféricas, geográficas y climáticas varían de un lugar a otro y a lo largo del tiempo como puede ser en nuestros sitios de estudio. Un modelo que funciona bien en un lugar o período podría no ser preciso en otro.

En este trabajo se utilizan medidas de irradiancia global horizontal (GHI) a las cuales se les aplica un exigente control de calidad. Luego, de ese conjunto se identifican las muestras correspondientes a condiciones de cielo claro (GHI_{cc}) utilizando para ello un algoritmo automático. Estos datos se utilizarán como referencia para evaluar discrepancias con estimaciones de modelos de cielo claro. Estas discrepancias se cuantifican con métricas de desempeño usuales en el área.

La evaluación se realiza en dos sitios, Salta y El Rosal (Tabla 1), mediante un análisis estadístico, comparando modelos CC y las mediciones en tierra durante los períodos del 10/08/2022 al 31/10/2023 (Salta Capital) y 16/05/2023 al 31/12/2023 (El Rosal), ambos con datos a escala minutal. Los modelos evaluados fueron: McClear (Lefevre et al., 2013), ARG-P (Salazar et al., 2010), ARG-P2 (Ledesma et al., 2022) y ESRA (Rigollier et al., 2000). Para realizar esta comparación, se aplicaron filtros de control de calidad a los datos de GHI medidos, 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, se implementaron filtros específicos por sombreado sobre el sensor y filtros manuales para eliminar ruido eléctrico sobre un periodo de tiempo. Estos filtros se describen en la sección de metodología. Posteriormente, se aplicó un algoritmo automático para selección de muestras correspondientes a cielo claro basado en la propuesta de Reno y Hansen (2016).

MEDIDAS EN TIERRA

Salta Capital se encuentra en una región clasificada como clima subtropical de altura, Cwb, según la clasificación climática de Köppen-Geiger Peel et al. (2007). Este tipo de clima se caracteriza por veranos cálidos a calurosos con lluvias frecuentes y tormentas, mientras que los inviernos son frescos y secos. El paraje El Rosal se encuentra situado en el Departamento de Rosario de Lerma, en la provincia de Salta. Este paraje se clasifica como BSk según el sistema Köppen-Geiger. Esto indica que la región experimenta un clima semiárido con una temporada seca durante el verano y temperaturas relativamente moderadas a frías durante el invierno. Este tipo de clima es común en regiones de transición entre zonas desérticas.

Las mediciones de GHI para la Capital, fueron realizadas en el campus de la Universidad Nacional de Salta, las mediciones correspondientes al paraje El Rosal fueron realizadas sobre la Escuela N°4526 “El Rosal”, Rosario de Lerma, Salta, con una diferencia de más de 2000 metros de altura entre estos sitios y aproximadamente 130 km de distancia. La siguiente Tabla 1 brinda información acerca de los sitios y el 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.

MODELOS DE CIELO CLARO UTILIZADOS

Modelo ARG-P

El modelo ARG-P Salazar et al. (2010), es un modelo de CC de tipo empírico, tiene como entrada la altura sobre el nivel del mar (A) y genera como resultado un índice representativo de claridad (k_{tr}), calculado para cada sitio en particular. Mediante este índice, la masa de aire óptica relativa y la irradiancia extraterrestre es posible estimar el índice de claridad instantánea (k_t). A k_{tr} se realiza la corrección introduciendo la presión atmosférica en la definición de masa de aire óptico relativa propuesta

por Kasten y Young (1989).

Este modelo permite calcular la irradiancia solar global sobre el plano horizontal de cielo claro (GHI_{cc}) a partir de:

$$GHI_{cc} = G_{0h}(k_{t-r-p})^{Ma^{0,678}} \quad (1)$$

Donde:

G_{0h} : Irradiancia solar extraterrestre sobre el plano horizontal

Ma : Masa de aire óptico relativa propuesta por Kasten

Esta evaluación fue realizada para Salta Capital, situada a 1233 metros sobre el nivel del mar (msnm) y para El Rosal situado a 3355 msnm, de esta forma el modelo propone la siguiente correlación para encontrar el valor de k_{t-r-p}

$$k_{t-r-p} = 0,7 + 1,6391 \times 10^{-3} \times A^{0,55} \quad (2)$$

Modelo ARG-P2

El modelo ARG-P2 Ledesma et al. (2022), se obtiene a partir de un análisis detallado del funcionamiento detallado del modelo ARG-P junto con el servicio de irradiación McClear Clear-Sky y del Servicio de Monitoreo de la Atmosfera de Copernicus. Entonces, este modelo es una corrección al modelo mencionado anteriormente (ARG-P).

El ajuste para dar con ARG-P2 viene dado en la siguiente función definida sobre k_{trp} (para sitios de más de 1000mts):

$$k_{t-r-p}(A) = 0,649 + 0,02 \times A^{0,28} \quad (3)$$

Introduciendo esta nueva definición a la Ec. (5) se obtendrá GHI_{cc} .

Modelo McClear

El modelo McClear (MCC, Lefevre et al., 2013), es un modelo avanzado y moderno de cielo claro de radiación solar desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas (CNRM) en Francia. Este modelo se ha diseñado para proporcionar estimaciones precisas y detalladas de la radiación solar en la superficie terrestre bajo condiciones de cielo claro.

El modelo McClear utiliza información atmosférica, como la cantidad de vapor de agua, el ozono y el aerosol, para calcular cómo interactúa la radiación solar con la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre. Esto permite una mayor precisión al tener en cuenta los efectos de absorción y dispersión de la radiación.

McClear utiliza datos globales de satélite para alimentar su modelo, lo que significa que puede proporcionar estimaciones en una amplia gama de ubicaciones en todo el mundo.

Los datos de radiación CC estimados por el modelo McClear están disponibles en el portal del proyecto europeo Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) y fueron obtenidos a partir del siguiente enlace: <https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>, introduciendo como entradas las ubicaciones de los lugares en forma precisa y en los periodos de tiempo de medición.

Modelo ESRA

El modelo ESRA, European Solar Radiation Atlas Rigollier et al. (2000), es otro modelo de cielo claro desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas (CNRM) en Francia, al igual que el modelo McClear.

El modelo ESRA utiliza como única entrada sobre el estado de la atmosfera al factor de Turbidez de Linke, T_L (Louche et al., 1986; Linke, 1992). Este factor incluye los efectos de aerosoles y vapor de agua presentes en la atmosfera y se puede interpretar como el número de atmósferas limpias y secas

equivalentes necesarios para una atenuación atmosférica observada en un determinado momento y lugar.

Los valores diarios medios mensuales de turbidez de Linke relacionados a los sitios de estudio, para este trabajo, fueron tomado del artículo Salazar y Raichijk (2014) y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de T_L para Salta Capital y El Rosal

MES	Salta Capital	El Rosal
ENE	3,9	2,8
FEB	3,9	2,7
MAR	3,6	2,4
ABR	3,8	2,5
MAY	3,2	2,1
JUN	3,1	2,0
JUL	2,8	1,9
AGO	2,9	2,0
SET	3,3	2,2
OCT	3,5	2,3
NOV	3,8	2,5
DIC	3,8	2,7

METODOLOGIA

Control de calidad

Los datos para su uso con este trabajo fueron previamente tratados mediante filtros de control de calidad. Estos filtros están separados por:

- Filtro 0: Este filtro tiene como objetivo filtrar todos los valores en los que no se disponga del recurso solar (filtro Ec. 4)
- Filtrado manual de datos con sombreado (Salta): A través de una inspección visual. Se detectaron sombreado en el instrumento de la estación de Salta Capital debido a un árbol situado al Este. Durante el primer trimestre de medición se observan mediciones afectadas en las primeras horas del día
- Filtrado manual de datos con sombreado (El Rosal): De forma similar a Salta, se detectaron datos afectados por sombreado para el paraje debido por las montañas en el horizonte
- Filtros GHI: Incluye una serie de criterios, incluidos el filtro BSRN (Long y Dutton, 2002) para valores de irradiancia global extremadamente raros y los filtros 2 (Ec. 6) y 3 (Ec. 7) del grupo 1 de GHI propuestos por Nollas (2023)
- Filtro de altura solar: Se descartan mediciones correspondientes a alturas solares menores a 7 grados para evitar el error del coseno de los instrumentos

Filtrado manual de datos con sombreado (Salta)

Este filtro fue realizado de manera manual. En el diagrama solar (Figura 1b) puede apreciarse el efecto producido por la sombra de un árbol (Figura 1a). A partir de este diagrama, realizando una máscara de manera manual, se procedió a la sustracción de valores que cayeran en el recuadro en verde. Este recuadro comprende valores de ángulos de elevación entre 0° y 15° y ángulos azimutales dentro de un rango de 70° y 80° .

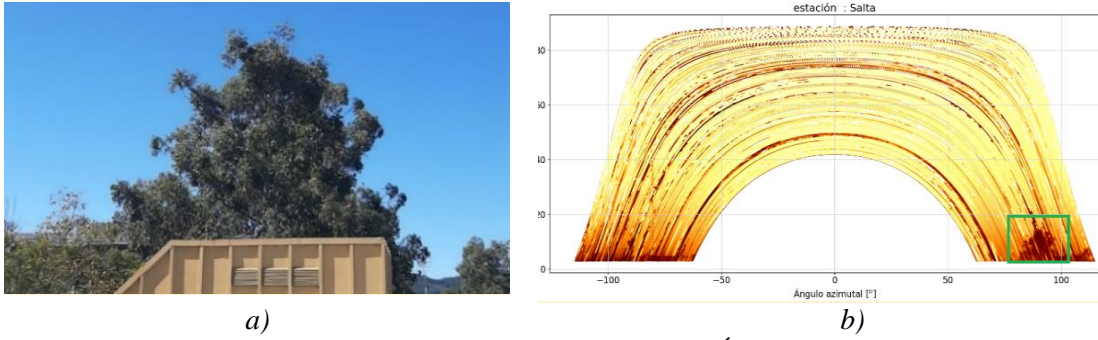


Figura 1: Sombra producida por el árbol, a) Árbol situado al Este del sensor., b) Diagrama solar parametrizado en GHI sin filtro de sombra.

Filtrado manual de datos con sombreado (El Rosal)

En la Figura 2, se observa los recuadros en verde el efecto generado por las sombras provocadas por las montañas en el horizonte. Estos valores deben ser eliminados mediante este filtro, ya que representan valores de GHI atenuadas por sombra. Para llevar a cabo las evaluaciones correspondientes con los modelos de CC y modelos en condición de todo tipo de cielo, estos valores no deben ser considerados. El recuadro abarca valores de ángulos de elevación entre 0° y 15° , así como ángulos azimutales en un rango de -70° a 180° .

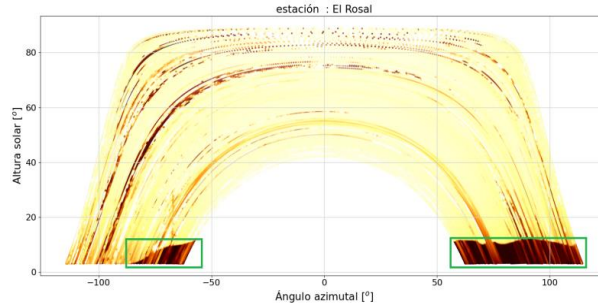


Figura 2: Diagrama solar parametrizado en GHI sin filtro de sombra El Rosal.

Filtros GHI

Filtros BSRN:

$$GHI > -2 \frac{W}{m^2} \quad (4)$$

$$GHI < G_{sc} \times 1,5 \times (CSZ)^{1,2} + 50 \frac{W}{m^2} \quad (5)$$

donde:

CSZ coseno del ángulo cenital

G_{sc} es la constante solar (tomada como 1361.7 W/m^2)

Filtros de Nollas et al. (2023):

$$GHI > (6,5331 - 0,065502 \times \theta_z + 1,8312 \times 10^{-4} \times \theta_z^2) / (1 + 0,01113 \times \theta_z) \quad (6)$$

$$k_t < 1,4 \quad (7)$$

Siendo:

θ_z el ángulo cenital

k_t el índice de claridad

Detección de muestras de cielo claro

Para realizar una evaluación a través de métricas a los modelos de CC se necesita contar con datos medidos que correspondan a cielo claro, para esto se aplicó un algoritmo de selección de muestras de cielo claro a los datos que pasaron los filtros de control de calidad. El algoritmo, proporcionado por

Reno y Hansen (2016), se utilizó para identificar períodos de tiempo con GHI similar a la que ocurre durante condiciones de cielo claro a partir de una serie temporal de mediciones. Para implementarlo, se utilizó la función `clearsky.detect_clearsky` del módulo `pvlb` de Python, que aplica el algoritmo RENO-2016. Esta función identifica períodos con GHI equivalentes a cielo claro comparando las características de las series temporales de mediciones de GHI con el resultado correspondiente de un modelo de cielo claro, en este trabajo, la comparación se realizó con el modelo McClear.

VALIDACION Y RESULTADOS

Resultados del control de calidad

Tomando como el 100% a los datos que superaron el filtro 0, se aplicaron los filtros restantes. Las Tablas 3 y 4, muestran la cantidad de datos finales a utilizar correspondiente a cada sitio de estudio, siendo el 71,5% y el 81,4% de los datos quienes pasaron todos los filtros de control de calidad para la ciudad de Salta y El Rosal respectivamente.

Se realizó otro filtro para Salta Capital en el que se quitaron días que presentaban ruido eléctrico, es decir, valores de GHI con perturbaciones. Este filtro se definió como “filtro de días”, filtrando el periodo desde el 28/11/2022 al 23/12/2022, este periodo fue filtrado a través de inspección visual sobre la serie temporal.

Tabla 3: Cantidad de datos al pasar por los diferentes filtros Salta Capital

Filtros	N° Datos	Porcentaje
Filtro 0 (Ec. 4)	350184	100%
Filtro BSRN (Ec. 5)	305554	87,2%
Filtro Nollas 2 (Ec. 6)	304784	87,0%
Filtro Nollas 3 (Ec. 7)	299205	85,4%
Filtro Sombras (Figura 1a)	263972	75,4%
Filtro de días	250478	71,5%

Tabla 4: Cantidad de datos al pasar por los diferentes filtros El Rosal

Filtros	N° Datos	Porcentaje
Filtro 0 (Ec. 4)	163296	100%
Filtro BSRN (Ec. 5)	161019	98,6%
Filtro Nollas 2 (Ec. 6)	158429	97,1%
Filtro Nollas 3 (Ec. 7)	157230	96,2%
Filtro Sombras (Figura 2)	132851	81,4%

Dadas la Figura 3a para Salta y 3b para El Rosal, los valores GHI no filtrados se representan en gris, mientras que los datos en azul datos quienes superan los controles de calidad en función del coseno del ángulo cenital.

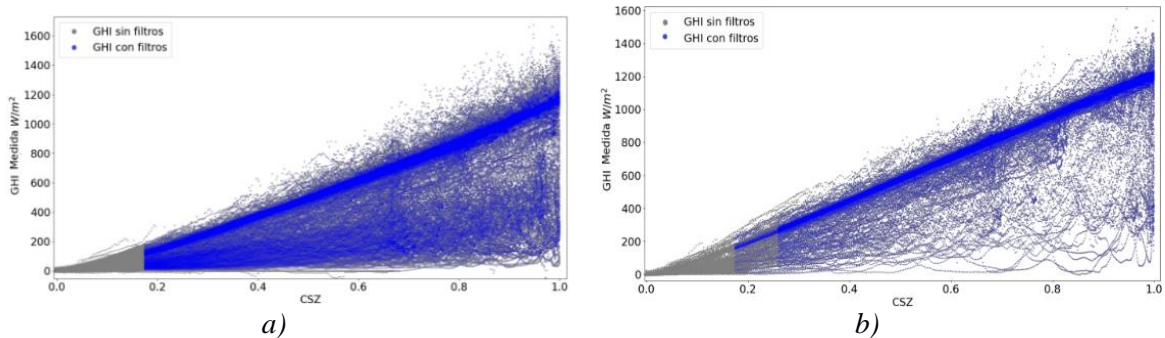


Figura 3: GHI medida en función del CSZ con y sin filtros aplicados, a) Salta Capital., b) El Rosal.

Filtro de detección de datos de cielo claro

Aplicado el algoritmo, se identificaron para ciudad de Salta y El Rosal, 94648 y 79175 datos correspondientes al 37,79% y 59,60% respectivamente, del total de datos previamente seleccionados después de aplicar los filtros de calidad. Estos datos fueron validados a partir de inspección visual. En la Figura 4a y en la Figura 4b, se pueden observar en azul los datos que corresponden a días de cielo claro, mientras que en gris se muestran los datos en condición de todo tipo de cielo para los dos sitios.

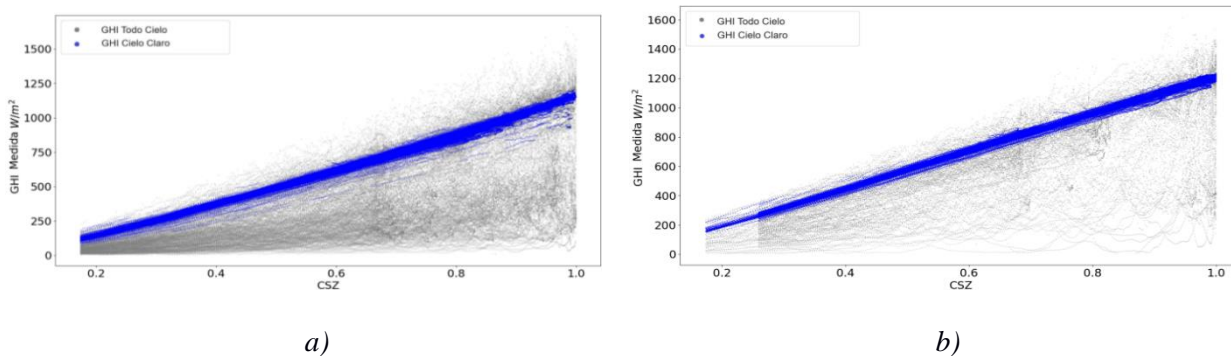


Figura 4: CSZ vs GHI para todo tipo de cielo y GHI aplicado algoritmo RENO-2016, a) Salta Capital., b) El Rosal.

Se destaca que, para El Rosal, a pesar de tener un periodo de medición más corto, la cantidad de muestras totales correspondientes a CC es comparable a las que se tiene en Salta Capital. Esto se demuestra gráficamente en la Figura 5, donde se representa la cantidad de datos de CC para ambos sitios durante el mismo periodo de tiempo, destacándose que El Rosal siempre tiene la mayor cantidad de muestras CC lo cual es congruente a su clasificación climática de Köppen-Geiger.

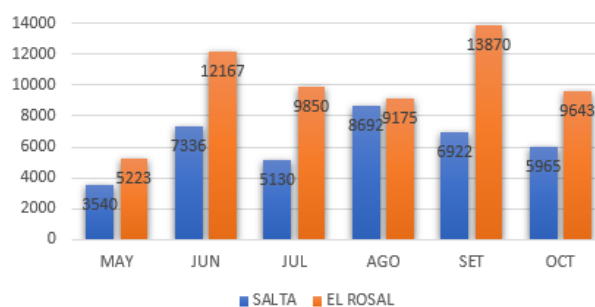


Figura 5: N° de datos correspondientes a CC para Salta y El Rosal en el periodo de 17 mayo al 31 de octubre 2023.

Evaluación de los modelos de cielo claro

Al evaluar los datos de GHI correspondientes a cielos claros con los modelos de CC, las métricas de desempeño presentadas en la Tabla 5 para Salta Capital y El Rosal indican que el error cuadrático medio porcentual (rRMSE) de todos los modelos están entre el 3% y 5,5%, mientras que existen sesgos

negativos y positivos dependiendo del modelo. Para este análisis, se utilizaron un total de 94648 y 79175 medidas correspondientes a días de cielo claro, con una media de 657 W/m² para Salta Capital y 749 W/m² para El Rosal.

Tabla 5: Métricas de rendimiento para los distintos modelos de CC

Sitio	Modelo	rMBD(%)	rRMSE(%)	R ²	KSI
Ciudad de Salta	ARG-P	-3,6	5,5	0,995	23,7
	ARG-P2	-1,6	4,3	0,995	11,0
	McClear	2,8	4,1	0,997	19,5
	ESRA	0,1	3,9	0,995	6,5
El Rosal	ARG-P	-3,4	5,1	0,994	27,8
	ARG-P2	0,1	4,0	0,994	12,7
	McClear	1,3	2,9	0,997	10,0
	ESRA	-0,3	3,2	0,996	12,0

Las siguientes gráficas de dispersión, representadas respectivamente por la Figura 6 para la ciudad de Salta y la Figura 7 para El Rosal, ilustran como ajustan los modelos a cada sitio detallados en la Tabla 5, siendo el modelo Figura 6d el que mejor lo hace para ciudad y Figura 7c para el paraje.

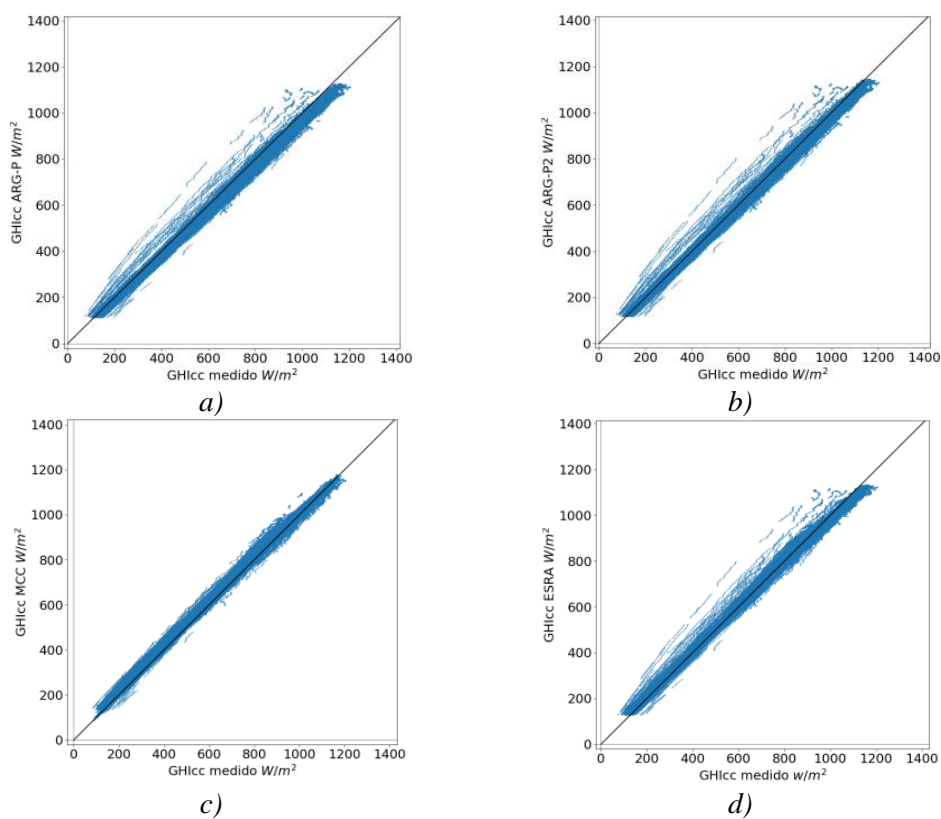


Figura 6: Modelos de cielo claro ciudad de Salta, a) ARG-P., b) ARG-P2., c) McClear., d) ESRA.

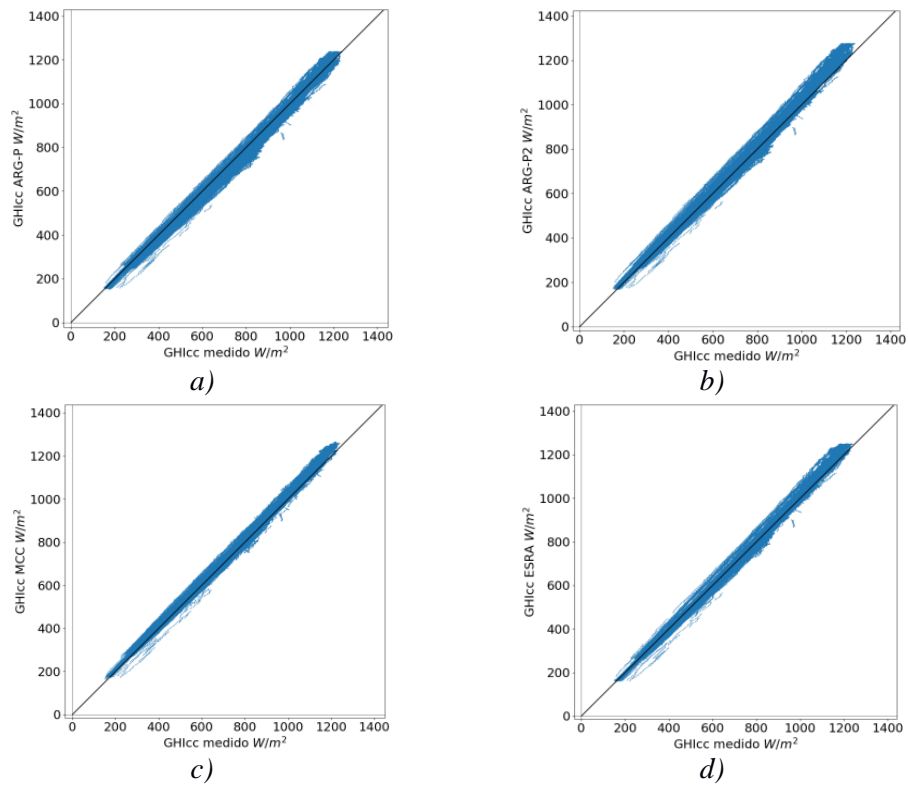


Figura 7: Modelos de cielo claro El Rosal, a) ARG-P., b) ARG-P2., c) McClear., d) ESRA.

Se realizó un análisis del rRMSE en función del CSZ para Salta y para El Rosal a partir de la Figura 8a y 8b, respectivamente. El coseno del ángulo cenital, que varía entre 0 y 1, se dividió en 10 subintervalos y se representaron los promedios que toman las métricas para cada uno de ellos. La cantidad de datos y el porcentaje correspondiente distribuidos según los intervalos del coseno del ángulo cenital (CSZ) se encuentran en la Tabla 6.

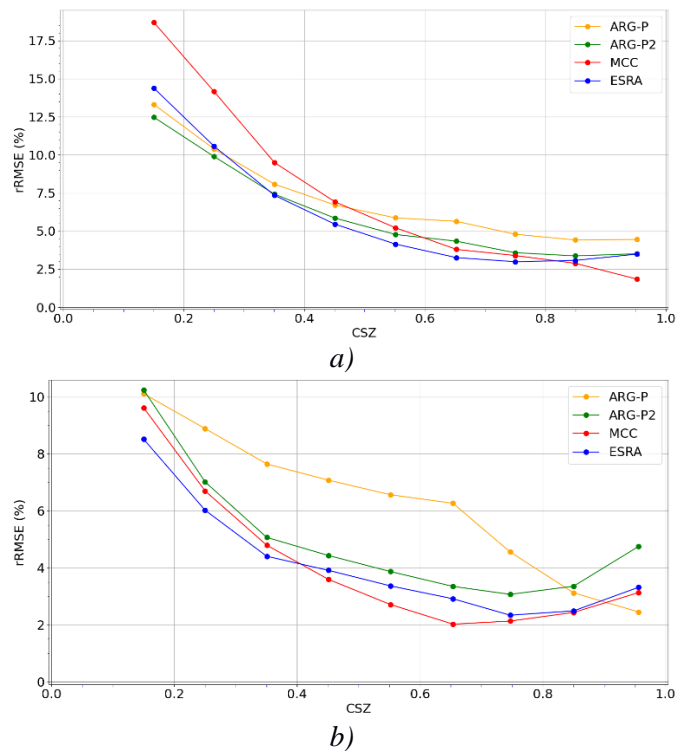


Figura 8: rRMSE(%) en función del CSZ, a) Salta Capital., b) El Rosal.

Tabla 6: Distribución de los datos de CC según CSZ

Intervalo CSZ	Salta Capital		El Rosal	
	N° de Datos	Porcentaje (%)	N° de Datos	Porcentaje (%)
[0 , 0,1]	0	0	0	0
(0,1 , 0,2]	1396	1,47	370	0,47
(0,2 , 0,3]	6646	7,02	9890	4,91
(0,3 , 0,4]	8415	8,89	7836	9,9
(0,4 , 0,5]	9874	10,43	8928	11,28
(0,5 , 0,6]	11937	12,61	11334	14,32
(0,6 , 0,7]	17522	18,51	17615	22,25
(0,7 , 0,8]	16768	17,72	10885	13,75
(0,8 , 0,9]	12938	13,67	9088	11,48
(0,9 , 1]	9152	9,67	9229	11,66

Se observa en las Figuras 8a y 8b que, para valores bajos de CSZ, se presenta el mayor error rRMSE. Sin embargo, esto no es significativo para los resultados obtenidos en la Tabla 6 debido a la cantidad de datos en esos rangos de CSZ. Para valores de CSZ comprendidos entre (0,6 , 0,85) en ambos sitios, el rRMSE tiende a estacionarse, con la excepción del modelo ARG-P que, a pesar de estar en diferentes escalas en las gráficas, en ambas posee un máximo sobre este rango, lo cual puede deberse a su naturaleza (sin consideraciones atmosféricas). En la mayoría de los modelos, el rRMSE alcanza su valor mínimo dentro de este rango, lo cual coincide en este rango con la mayor cantidad de datos de CC proporcionada en la Tabla 6.

CONCLUSIONES

Se midió la irradiancia solar en el plano horizontal durante un período de más de 14 meses (de agosto 2022 a octubre 2023) en Salta Capital, con una interrupción en diciembre cuando no se disponía de datos de calidad, y un período ininterrumpido de 7 meses (de mayo a diciembre 2023) en El Rosal.

Se llevó a cabo un control de calidad en los datos de GHI medidos, con el objetivo de mejorar la representatividad en la evaluación de los modelos de cielo claro y su posterior aplicación en evaluaciones con modelos de irradiancia en condiciones de todo tipo de cielo, sin embargo, no se realizó una comparación contra datos sin filtrar. Tras este proceso, el 71,5% de los datos iniciales para Salta Capital y el 81,4% para El Rosal lograron pasar todos los criterios de calidad considerados.

Para estos periodos, se realizaron validaciones de modelos de cielo claro, incluyendo ARG-P, ARG-P2, ESRA, McClear. El modelo McClear fue obtenido del portal CAMS, mientras que los otros tres fueron implementados en este trabajo. Por su precisión se destaca el modelo McClear, por ser fácilmente accesible y al modelo ESRA utilizando turbidez atmosférica localmente obtenida, por su simplicidad y precisión. Con respecto a las dos versiones de ARG-P, se encontró que el modelo ARG-P2 tiene un mejor ajuste que su versión anterior en ambos sitios, dado que su versión anterior es un modelo empírico sin tener consideraciones atmosféricas mientras que ARG-P2 fue ajustado con datos del modelo McClear. Los resultados de esta validación revelaron que el modelo ESRA es el que mejor se ajusta para la ciudad de Salta en condiciones de cielo claro, mientras que el modelo McClear mostró ser el más adecuado para El Rosal.

Los resultados obtenidos muestran que la desviación rRMSE de los modelos varía entre un 3,2% y un 5,5% para ambos sitios a escala minutal. Al comparar con estudios regionales, como el de Laguarda y Abal (2017), que reportaron desviaciones entre el 4,3% y el 7% a escala horaria en cinco sitios de Uruguay; el trabajo de Laguarda et al. (2020) se tiene para el McClear las desviaciones se encuentran entre 2,7 y 4,1% ESRA 3,2 y 3,8 a nivel horario para diez sitios de la Pampa Húmeda y el trabajo de Russo et al. (2022), que encontró un 3,7% a escala minutal para un sitio representativo de la Pampa Húmeda, se observa que las desviaciones en este estudio son comparables a las evaluaciones regionales

utilizadas como referencia.

Desde un punto de vista práctico, la ciudad de Salta Capital y El Rosal se pueden considerar en ubicaciones equivalentes, ya que presentan condiciones similares desde una perspectiva de geometría solar. Sin embargo, al observar la Tabla 5, se nota que, a pesar de contar con una línea temporal de datos más corta para El Rosal, se dispone de una cantidad comparable de datos de cielo claro en relación con Salta. Además, los datos que pasan el filtro de detección de cielo claro representan casi un 60% en El Rosal, mientras que en Salta alcanzan alrededor del 40 %. Esto indica que la diferencia de altitud es un factor significativo en los procesos de atenuación y dispersión, siendo mucho más pronunciados en la capital de Salta, indicando que las características de nubosidad son distintas en ambas localidades.

REFERENCIAS

- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñan-Lamigueiro, O. y R, E. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 374-387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.032>
- Engener, N. y Mills, F. (2015). Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, 120, 9-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.044>
- Gueymard, C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*, 86(8), 2145-2169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011>
- Kasten, F. y Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28(22), 4735-4738.
- Laguarda, A. y Abal, G. (2017). Clear-sky broadband irradiance: first model assessment in Uruguay. *Proceedings of Solar World Congress*, 29, 10-2.
- 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.
- Ledesma, R. D., Salazar, G. A. y Castro Vilela, O. d. (2022). ARGP-v2 un modelo práctico para la estimación de irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro para sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26.
- 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.
- Linke, F. (1992). Transmission-koeffizient und trubungsfaktor. *Beitr. Phys. Atmos.*, 10, 91-103.
- Long, C. y Dutton, E. (2002). BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. BSRN Technical Report.
- Louche, A., Peri, G. y Iqbal, M. (1986). An analysis of Linke turbidity factor. *Solar energy*, 37. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90028-9)
- Nollas, F. M., Salazar, G., y Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 202, 40-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.056>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11, 1633-1644.
- Reno, M. J., y Hansen, C. W. (2016). Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. *Renewable Energy*, 90, 520-531. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.031>
- 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, 33-48. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9)
- Russo, P., Laguarda, A., Abal, G. y Piccioli, I. (2022). PERFORMANCE OF THE REST2 MODEL FOR 1-MINUTE CLEAR-SKY SOLAR IRRADIANCE WITH MERRA-2 ATMOSPHERIC INPUTS. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 1-9. doi:10.59627/cbens.2022.1100
- Salazar, G. A., Hernández, A. L. y Saravia, L. R. (2010). Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results. *Renewable Energy*, 35(11), 2452-2460.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.033>

Salazar, G. y Raichijk, C. (2014). Evaluation of clear-sky conditions in high altitude sites. *Renewable energy*, 64, 197-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.003>

ANALYSIS OF THE QUALITY OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE (GHI) MEASUREMENTS AND PERFORMANCE EVALUATION OF GHI MODELS UNDER CLEAR SKY CONDITIONS FOR TWO SITES IN THE PROVINCE OF SALTA

ABSTRACT: In this study, an analysis was carried out on the quality of solar irradiance data measured in Salta Capital and El Rosal. The measurements were taken at minute intervals during the periods from 08/10/2022 to 10/31/2023 and from 05/16/2023 to 12/31/2023, respectively. Based on these data, global horizontal irradiance (GHI) models under clear-sky (CC) conditions, namely ESRA, ARG-P, ARG-P2, and McClear, were evaluated. The evaluation was performed using statistical analyses to determine the degree of correlation between the measured values and those obtained by the different models. Performance metrics such as the relative mean bias (rMBD), relative root mean square error (rRMSE), Kolmogorov-Smirnov Index (KSI), and linear regression coefficient (R^2) were used to assess the accuracy of the models in relation to the radiation actually received at the Earth's surface at both locations under clear-sky conditions. The results indicate that the ESRA model best fits the ground values for the Capital, while the McClear model performs best for the El Rosal site, with an rRMSE of 3,9% and 2,9%, respectively. Additionally, the ARG-P2 model shows better performance at both sites than its predecessor, ARG-P.

Keywords: solar irradiance on a horizontal plane, quality control, clear-sky models.