

EVALUACIÓN DEL MODELO REST2 DE CIELO CLARO PARA LA IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL EN LA RED SAVER-NET DE ARGENTINA

Anabela Lusi^{1,2}, Facundo Orte^{1,2}, Agustín Laguarda³, Rodrigo Alonso-Suárez⁴, Juan Pallota¹, Raúl D’Elia², Elian Wolfram⁵

¹Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), IRL-IFAECI-CNRS-3351, Villa Martelli (B1603), Buenos Aires, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB) CABA, Argentina

³Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Udelar, Montevideo, Uruguay

⁴Laboratorio de Energía Solar, CENUR Litoral Norte, Udelar, Salto, Uruguay

⁵Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Av. Dorrego 4019 (C1425GBE), CABA, Argentina
e-mail: anabelalusi@gmail.com

RESUMEN: Dada la utilidad de los modelos de cielo claro para estimar la Irradiancia Global Horizontal (GHI), resulta pertinente evaluar su desempeño frente a mediciones de superficie de calidad controlada. En este trabajo se presenta la evaluación del modelo REST2 (“Reference Evaluation of Solar Transmittance”, dos bandas), un modelo de alto rendimiento basado en un esquema de dos bandas que utiliza diversos parámetros atmosféricos para la caracterización de la atmósfera. El resultado del modelo se evaluó utilizando datos minutales de GHI de los sitios de Pilar, Villa Martelli, Comodoro Rivadavia y Río Gallegos de la red argentina de radiación solar Saver-Net, durante los años 2019 y 2020. Los resultados de la comparación indican una muy buena correlación de los datos, con coeficientes de Pearson entre 0,995 y 0,998 para todas las estaciones. Sin embargo, se observa que, con las variables de entrada consideradas, el modelo REST2 presenta una tendencia a subestimar las mediciones de GHI, revelando sesgos relativos (rMBD) negativos en todos los sitios. El valor más extremo de rMBD se encontró en la estación de Pilar con -6,2%. Los errores cuadráticos medios porcentuales (rRMSD) fueron de 7,9% en Pilar, 6,3% en Villa Martelli, 4,7% en Comodoro Rivadavia y 5,3% en Río Gallegos. Además, se observó que las estaciones más australes mostraron un mejor rendimiento del modelo.

Palabras clave: GHI, REST2, modelado y cielo claro.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de cielo claro estiman la irradiancia solar (en W/m²) que llega a la superficie terrestre en ausencia de nubosidad. Estas estimaciones son necesarias en muchas aplicaciones. En el ámbito de la energía solar, resultan esencialmente útiles en el diseño y la simulación de sistemas, en el control de calidad de las series de medidas y en la evaluación de la precisión de los instrumentos de medición. Además, estos modelos son fundamentales para la estimación basada en satélites de la irradiancia solar de todo cielo, ya que constituyen la base de muchos modelos físicos e híbridos.

Las estimaciones pueden ser de la Irradiancia Normal Directa (DNI o G_{bc}), de la Irradiancia Horizontal Difusa (DHI o G_{dhc}) o de la Irradiancia Global Horizontal (GHI o G_{hc}). El subíndice “c” denota que estas estimaciones corresponden a condiciones de cielo claro. Otra forma de generar la GHI_c es mediante la agregación de las estimaciones G_{bc} y G_{dhc} en la ecuación de clausura (Ec. 1):

$$G_{hc} = G_{bhc} + G_{dhc} = G_{bc} \cos(\theta_z) + G_{dhc} \quad (1)$$

donde:

θ_z es el ángulo solar cenital,

$G_{bhc} = G_{bc} \cos(\theta_z)$: es la proyección de la irradiancia directa en incidencia normal sobre el plano horizontal.

Los enfoques que utilizan los diferentes modelos varían ampliamente, desde considerar únicamente una variable de entrada para caracterizar el estado de la atmósfera sin nubes, hasta requerir varias. Muchos de estos modelos se ajustan localmente, otros se basan en coeficientes arbitrarios, y por lo tanto pueden tener variaciones significativas en su rendimiento para diferentes ubicaciones geográficas. Aunque estos modelos suelen producir resultados de banda ancha, deben ser capaces de tener en cuenta la dispersión, la reflexión y la absorción que se producen dentro de determinadas bandas espectrales, debido a componentes atmosféricos como el vapor de agua, el ozono y aerosoles (Engerer y Mills, 2015).

Los modelos más simples son los que se basan únicamente en cálculos geométricos. La atenuación de la irradiancia normal extraterrestre que incide en la atmósfera es una función del ángulo cenital; a medida que este ángulo aumenta, también lo hace la masa de aire que atraviesa, resultando en una mayor interacción entre la radiación solar y la atmósfera. Estos modelos, que son esencialmente correlaciones empíricas basadas en mediciones de la ubicación de un sitio y parámetros astronómicos (Stein et al., 2012) comprenden el de Dneshyar, Paltridge y Proctor (Daneshyar, 1978), Kasten y Czeplak (Kasten y Czeplak, 1980), Haurwitz (Haurwitz, 1945), Berger y Duffie (Berger, 1979), y Robledo y Soler (Robledo y Soler, 2000), entre otros.

Otros modelos incluyen, además del ángulo cenital, algunos parámetros básicos del estado de la atmósfera como la presión, la temperatura, la humedad relativa, el contenido de aerosoles y la dispersión de Rayleigh. Por ejemplo, el modelo de Ineichen y Pérez (Ineichen y Perez, 2002) utiliza la masa de aire, la turbidez de Linke (TL) y la elevación solar. La TL es un parámetro adimensionado que incluye los efectos de dispersión y absorción por aerosoles, absorción de gases residuales y absorción por vapor de agua. Típicamente oscila entre 2 (para atmósferas muy limpias) y 5. El modelo de Ineichen y Perez es una mejora del modelo de Kasten (Kasten, 1980). Otros modelos que se destacan en precisión son el de Rigollier, Bauer y Wald (Rigollier et al., 2000), y el de Kasten (Kasten, 1984), ambos basados en TL.

Los modelos más sofisticados utilizan una mayor cantidad de parámetros atmosféricos, como contenido de aerosoles y columna total de agua precipitable, con el objetivo de modelar con mayor precisión la atmósfera y su efecto sobre la irradiancia que llega a la superficie. Cuando se calibran adecuadamente, estos modelos suelen ofrecer los mejores rendimientos. No obstante, la necesidad de múltiples variables de entrada puede ser una desventaja, ya que estos datos no siempre están disponibles para todas las ubicaciones. Aunque es posible estimar algunas de estas variables utilizando valores constantes adaptados, esto puede resultar en una disminución del rendimiento del modelo. En este sentido, los datos de satélite pueden ser útiles para estimar varios de estos parámetros. Existen muchos modelos, entre ellos podemos mencionar el de Bird y Hulstrom (Bird y Hulstrom, 1981), Ineichen (Ineichen, 2008), Iqbal (Iqbal, 1983), Atwater y Ball (Atwater y Ball, 1978, 1981) y Gueymard (C. A. Gueymard, 2008).

REST2 (“Reference Evaluation of Solar Transmittance”, dos bandas) es considerado un modelo de alto rendimiento para predecir la irradiancia, iluminancia y radiación fotosintéticamente activa (PAR) de banda ancha en cielos despejados a partir de datos atmosféricos (C. A. Gueymard, 2008). Utiliza un esquema de dos bandas al igual que el modelo CPCR2 (C. Gueymard, 1989) que fue desarrollado y publicado con anterioridad. La estructura general de REST2 es prácticamente idéntica a la de CPCR2, con una separación de bandas de 700 nm. La banda 1 corresponde a la región del ultravioleta (UV) y visible, de 290 a 700 nm. Se caracteriza por una fuerte absorción por parte del ozono en el UV y una fuerte dispersión por moléculas y aerosoles en toda la banda. La banda 2 considera la región del infrarrojo cercano, de 700 a 4000 nm, y se caracteriza por una fuerte absorción del vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases, junto con una dispersión limitada.

La irradiancia directa se estima como un producto de las transmitancias en ambas bandas mientras que la radiación difusa en cada banda es una suma entre la difusa ideal y el efecto del backscattering entre la radiación reflejada en el suelo y en el cielo. Por último, la radiación global se calcula a partir de la ecuación de clausura (Ec. 1).

Este modelo utiliza diversos datos de entrada, entre los que se incluyen la ubicación del sitio (coordenadas geográficas, elevación y zona horaria), la presión (p , hPa), el agua precipitable (w , cm), la columna total de ozono (u_o , cm), el contenido de dióxido de nitrógeno (u_n , cm), el albedo de dispersión terrestre para las bandas 1 y 2 (ρ_1, ρ_2), los parámetros de turbidez y exponente de Ångström ($\beta, \alpha_1, \alpha_2$), y el ángulo cenital solar (θ_z). Uno de los parámetros más importantes es el coeficiente β , una medida del espesor óptico de los aerosoles para una longitud de onda de 1 μm .

La irradiancia incidente (particularmente las componentes directas y difusas) son funciones importantes de las propiedades ópticas del aerosol, sobre todo de la profundidad óptica (AOD, por sus siglas en inglés “Aerosol Optical Depth”). AOD_λ , también denominada $\tau_{a,\lambda}$, es una cantidad espectral que normalmente disminuye cuando aumenta la longitud de onda. Según Ångström (Ångström, 1929), la dependencia espectral de la extinción por aerosoles se puede aproximar como una relación de ley de potencia (Ec. 2):

$$AOD_\lambda = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

donde:

- β es la AOD a 1 μm , o parámetro de turbidez (Ångström, 1964),
- λ es la longitud de onda en μm ,
- α es el exponente de Ångström.

Este último valor es un indicador cualitativo del tamaño de las partículas del aerosol (Ångström, 1929). Los valores de $\alpha \leq 1$ indican distribuciones de tamaño dominadas por aerosoles de modo grueso (con radios $\geq \sim 0,5 \mu\text{m}$), que suelen estar asociados con polvo y sal marina. Los valores de $\alpha \geq 2$ indican distribuciones de tamaño dominadas por aerosoles de modo fino (con radios $\leq \sim 0,5 \mu\text{m}$), que suelen estar asociados con la contaminación urbana y la quema de biomasa (Eck et al., 1999; Schuster et al., 2006; Westphal y Toon, 1991).

En estudios previos, se han realizado diferentes evaluaciones de los componentes GHI, DNI y DHI del modelo REST2 en distintas partes del mundo. Estos sitios se encuentran principalmente en Europa, América del Norte, norte de África, Medio Oriente y, con menor frecuencia, en Sudamérica. Todos los trabajos coinciden en que el modelo REST2 presenta un muy buen desempeño.

Entre estas validaciones, se encuentra la realizada por Gueymard (C. A. Gueymard, 2012), donde se utilizó información atmosférica de AERONET, obteniendo un rRMSD de 1,5% para la componente GHI en escalas de 1 a 3 minutos. Engerer y Mills (Engerer y Mills, 2015) utilizaron información atmosférica media interpolada extraída del conjunto de datos SoDa, y encontraron un rRMSD de 5,1% para la evaluación de GHI a escala de 1 minuto. Finalmente, en Antonanzas-Torres et al. (Antonanzas-Torres et al., 2019) se utilizó información de AERONET, encontrando valores de rRMSD de 3,1% para GHI de 1 minuto. A nivel regional se destaca el trabajo de Russo et al. (Russo et al., 2022), donde se evaluó el desempeño de REST2 con información de reanálisis de MERRA2, encontrando un rRMSD de 3,7% para la componente GHI a escala de 1 minuto.

El objetivo de este trabajo es evaluar el modelo REST2 a una escala de tiempo de 1 minuto con datos terrestres de GHI durante los años 2019 y 2020, utilizando información atmosférica de AERONET. El estudio se llevó a cabo en los sitios de Pilar (Córdoba), Villa Martelli (Buenos Aires), Comodoro Rivadavia (Chubut) y Río Gallegos (Santa Cruz) de Argentina. Estos sitios pertenecen a la red de monitoreo de la radiación solar Saver-Net (Orte et al., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para validar el modelo, la salida de GHI se comparó con mediciones terrestres, que se describen a continuación. Las variables de entrada del modelo REST2 se obtuvieron de la medición terrestre de los fotómetros solares de la red AERONET (β , α_1, α_2 , w) (*Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage*, s. f.; Holben et al., 1998; Shaw, 1983), de la base de datos de OMI/Aura (u_o) (Levelt et al., 2006), de la base de datos de la National Solar Radiation Data Base (NSRDB) (ρ_1, ρ_2) (Sengupta et al., 2018), de mediciones de parámetros meteorológicos en el sitio (p) y, además, otros parámetros se estimaron o se utilizaron valores por defecto (θ_z, u_n, p) (ver Tabla 2).

Mediciones terrestres de GHI

La información de GHI utilizada para validar el modelo se obtuvo con una frecuencia minutal durante los años 2019 y 2020 en las diferentes estaciones de la red Saver-Net: Pilar (PIL) (31,68°S, 63,87°O, 330 m s.n.m.), Villa Martelli (VMA) (34,58°S, 58,48°O, 25 m s.n.m.), Comodoro Rivadavia (CRD) (45,78°S, 67,50°O, 43 m s.n.m.) y Río Gallegos (RGL) (51,60°S, 69,32°O, 15 m s.n.m.) (Figura 1). Los datos se registraron con piranómetros Kipp&Zonen CMP-21 en el rango de onda corta en un plano horizontal con un tiempo de adquisición de un minuto. La incertidumbre típica reportada para estos instrumentos es menor a $\pm 2\%$ para los totales diarios (OTT HydroMet, s. f.). El conjunto de datos fue sometido a un control de calidad siguiendo diversos pasos. En principio, las medidas de altura solar menor a 7° fueron descartadas, ya que representan una porción del día donde los valores de GHI son bajos, y la incertidumbre relativa de la medida es más alta, por lo que se suelen descartar para fines de evaluación de modelos. Además, se realizó una exhaustiva inspección visual en las series temporales con el fin de detectar periodos defectuosos. Por último, se examinaron los valores de GHI y del índice de claridad (kt) con el ángulo cenital, y se realizaron diagramas solares con el objetivo de determinar muestras alteradas por la presencia de sombra.

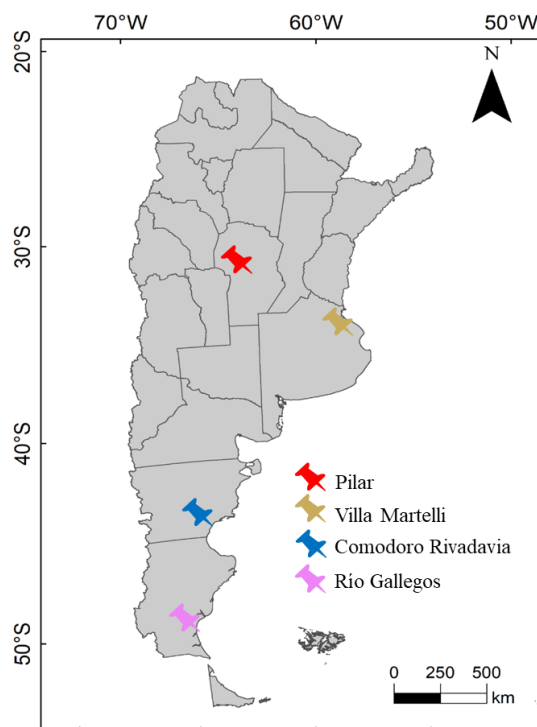


Figura 1: Distribución geográfica de los sitios de la Red argentina de irradiancia solar UV-Total "Saver-Net" utilizados en este estudio.

La detección de los minutos claros se realizó siguiendo la metodología propuesta en Lusi et al. (Lusi et al., 2023), donde se filtraron valores altos del índice de claridad modificado (k_t^*) y bajos de variabilidad entre las muestras ($\sigma = std(\Delta k_t^*)$), para un entorno de ± 2 muestras de la muestra objetivo.

En este trabajo, los límites se adecuaron para realizar una correcta selección dependiendo del sitio. Los límites establecidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Límites establecidos para la detección de minutos claros en cada estación.

Estación	Límite del k_t^*	Límite de σ
PIL	$0,75 < k_t^* \leq 0,85$	$\sigma \leq 0.003$
VMA	$0,75 < k_t^* \leq 0,85$	$\sigma \leq 0.005$
CRD	$0,77 < k_t^* \leq 0,88$	$\sigma \leq 0.005$
RGL	$0,76 < k_t^* \leq 0,90$	$\sigma \leq 0.003$

Mediciones de AERONET

La red de fotómetros solares terrestres, conocida como AERONET (AErosol RObotic NETwork), fue establecida por la NASA en colaboración con PHOTONS (PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normlization Satellitaire; Universidad de Lille, CNES y CNRS-INSU). AERONET utiliza fotómetros del modelo CIMEL Electronique 318, que son radiómetros de campo de visión angosto diseñados para medir la irradiancia solar. Estos fotómetros solares poseen bandas espectrales bien definidas en longitudes de onda clave, tales como 1020, 940, 870, 670, 500, 440, 380 y 340 nm, con un ancho de banda de aproximadamente 10 nm FWHM (Full Width Half Maximum) (Shaw, 1983). El parámetro de turbidez (β), los exponentes de Angstrom (α_1, α_2) y el vapor de agua precipitable (w) fueron obtenidos o estimados a través de información de AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). En la descarga, las estaciones se corresponden con los nombres de “Pilar_Cordoba”, “CEILAP-BA”, “CEILAP-Comodoro” y “CEILAP-RG”, para los sitios de PIL, VMA, CRD y RGL, respectivamente. Los productos seleccionados fueron AOD, agua precipitable y parámetros de Angstrom en el nivel 2.0.

Mediciones de ozono (OMI/Aura)

La columna total de ozono se descargó del sitio web de la NASA (<http://avdc.gsfc.nasa.gov>), que contiene la base de datos del instrumento OMI, siendo la información de libre acceso. El producto de datos utilizado fue el OMDOAO3 L2, el cual utiliza un algoritmo que aprovecha las capacidades hiperespectrales del instrumento OMI basándose en la Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial (DOAS). El algoritmo consta de tres pasos. En primer lugar, se utiliza el método DOAS para ajustar la sección transversal de absorción diferencial de ozono al espectro de radiancia de la Tierra normalizado por el Sol, para obtener la densidad de columna inclinada. En el segundo paso, la densidad de la columna inclinada se traduce en la densidad de la columna vertical utilizando un factor de masa de aire. El tercer paso consiste en una corrección de los efectos de las nubes, para tener en cuenta el ozono que está oscurecido por las mismas (Veefkind et al., 2006).

Modelo REST-2

Las variables obtenidas para el modelo presentan diferentes frecuencias temporales. Con el objetivo de homogeneizar todos los datos a la frecuencia minatural, se implementaron diversas estrategias.

En el caso de la columna total de ozono de la base de datos del OMI, cuando se dispuso de más de un registro diario, se optó por calcular el promedio de esos valores y utilizar dicho resultado para representar la totalidad del día. En las situaciones en las que no se contaba con datos disponibles, se realizó una interpolación lineal entre el día anterior y el siguiente, dado que el comportamiento del ozono tiende a mostrar una transición suave entre días consecutivos. Esta metodología aseguró una continuidad en los datos.

Para el agua precipitable, que presentaba una frecuencia temporal variable, se utilizó el valor observado por el fotómetro solar sin ningún procesamiento.

En relación con los datos de presión medidos en la estación de VMA, los cuales tenían una frecuencia de 5 segundos, se promediaron los valores para representar un valor por minuto. En las demás estaciones, la presión se estimó en función de la altitud del sitio.

Para variables de bajo impacto como la concentración de NO₂ se utilizaron los valores predeterminados propuestos en Gueymard (C. A. Gueymard, 2008).

Los datos del albedo de superficie fueron obtenidos del sitio web de la NSRDB (<https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>) con una cadencia de 10 minutos. Para completar la serie de datos, se realizó una interpolación lineal en los valores faltantes. Además, se asumió que el albedo terrestre es igual en las dos bandas ($\rho_1 = \rho_2$).

Se consideró el AOD₅₀₀ para la banda UV-VIS, y el AOD₈₇₀ para la banda NIR. Los exponentes de Angstrom α_1 y α_2 , se obtuvieron para longitudes de onda entre 440 y 675 nm, y 500 y 870 nm respectivamente. β se obtuvo invirtiendo la Ec. 2 de la aproximación de Angstrom, con información de la banda 2 (AOD₈₇₀ y α_2):

$$\beta = AOD_{870} * 0.87^{\alpha_2} \quad (3)$$

La Tabla 2 resume las variables atmosféricas de entrada del modelo REST2 y la fuente que dio lugar a dicha información.

Tabla 2: Variables de entrada y fuente de información del modelo REST2.

Variable de entrada	Fuente de información
Ángulo solar cenital (θ_z)	Calculado a partir de la ubicación geográfica
Presión atmosférica (p)	Medida en la estación (VMA), calculado a partir de la altitud (PIL, CRD, RGL)
Columna total de ozono (u_o)	Instrumento OMI del satélite Aura
Columna total de NO ₂ (u_n)	Valor por defecto (0,00002)
Parámetro de turbidez de Angstrom (β)	Fotómetro solar terrestre (AERONET)
Exponentes de Angstrom (α_1, α_2)	Fotómetro solar terrestre (AERONET)
Vapor de agua precipitable (w)	Fotómetro solar terrestre (AERONET)
Albedo terrestre (ρ_1, ρ_2)	Base de datos NSRDB

Métricas de rendimiento

Se emplearon tres métricas principales de rendimiento: el desvío promedio o sesgo (MBD) (Ec. 4), el desvío cuadrático medio (RMSD) (Ec. 5) y el desvío medio absoluto (MAD) (Ec. 6). La métrica MBD permite cuantificar cualquier sesgo sistemático presente en las estimaciones del modelo REST2 en comparación con las mediciones de referencia de la estación. Por otro lado, tanto RMSD como MAD se utilizan para medir la dispersión de las desviaciones. Además, se analizó el coeficiente de correlación de Pearson (R).

$$\mathbf{MBD} = \frac{1}{N} \sum_i^N e_i \quad (4)$$

$$\mathbf{RMSD} = \left[\frac{1}{N} \sum_i^N e_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\mathbf{MAD} = \frac{\sum_i^N |e_i|}{N} \quad (6)$$

donde:

N es el número de pares de medidas (y_i) y estimativos de un modelo ($\hat{y}_i$),
 e_i son los residuos $\hat{y}_i - y_i$.

Estos indicadores pueden expresarse en términos relativos (rMBD, rRMSD y rMAD) como porcentaje de la media de las medidas $\langle y_i \rangle$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta la dispersión entre el modelo REST2 y las mediciones terrestres que se identificaron previamente como despejadas en cada uno de los sitios. Se puede observar una correlación fuerte para los dos conjuntos de datos, con coeficientes de correlación de Pearson entre 0,9946 y 0,9982 en todas las estaciones, lo que indica un buen ajuste. No obstante, es notable una cierta subestimación por parte del modelo REST2, reflejado por los valores de rMBD que se muestran en la Tabla 3 junto con el resto de los indicadores de desempeño. Los valores de rRMSD resultaron en 7,9%, 6,3%, 4,7% y 5,3% para PIL, VMA, CRD y RGL, respectivamente. Estos valores evidencian la tendencia del modelo REST2 a subestimar los valores medidos, alimentado con los parámetros utilizados para el cálculo.

En un trabajo previo, los sitios de VMA y PIL fueron evaluados en la misma escala temporal utilizando el modelo McClear (Lusi et al., 2023). Al comparar estos resultados con el desempeño del modelo REST2 se observan diferencias notables. En VMA, el modelo McClear presenta un rMBD de -0,7%, mientras que REST2 muestra un valor de -4,9%. En PIL, el modelo McClear tiene un rMBD de 1,2%, comparado con -6,2% del modelo REST2. Estos resultados indican que McClear tiene una tendencia menor a subestimar las mediciones en comparación con REST2, especialmente en PIL. En términos de rRMSD, McClear también muestra un mejor desempeño, con valores de 2,3% en VMA y 2,2% en PIL, mientras que REST2 tiene 6,3% y 7,9% respectivamente. Además, los valores de rMAD refuerzan esta tendencia. Estos resultados sugieren que, aunque ambos modelos tienen un alto desempeño, el modelo McClear ofrece una mayor precisión y menor sesgo en las estimaciones de GHI que las obtenidas con REST2 utilizando la información de entrada que se detalla en este trabajo.

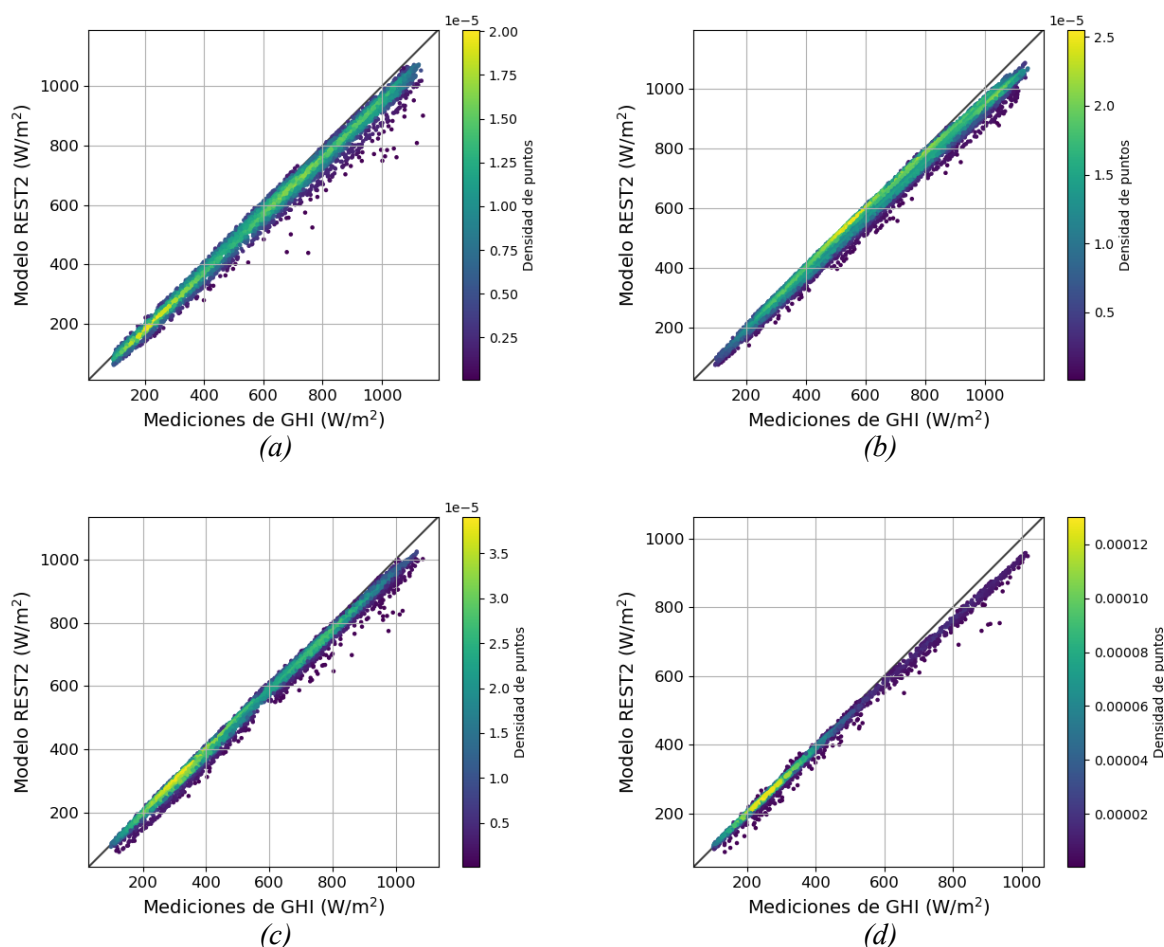


Figura 2: Desempeño del modelo REST2 (a) PIL, (b) VMA, (c) CRD, (d) RGL.

Tabla 3: Indicadores de desempeño del modelo REST2 para los años 2019 y 2020.

Sitio	rMBD (%)	rRMSD (%)	rMAD (%)	R	# Observaciones	Media de las medidas (W/m ²)
PIL	-6,2	7,9	6,3	0,995	4382	610,0
VMA	-4,9	6,3	5,0	0,996	7624	689,8
CRD	-3,2	4,7	3,5	0,997	6396	542,8
RGL	-3,2	5,3	3,5	0,998	2506	391,8

Estudios previos, aunque han utilizado variables atmosféricas provenientes de distintas fuentes de información, han reportado métricas de desempeño más precisas en comparación con los resultados obtenidos para el modelo REST2 en este estudio, principalmente para las estaciones de PIL y VMA donde el rRMSD es más alto (Engerer y Mills, 2015; Laguarda, 2021; Russo et al., 2022). Las discrepancias observadas podrían atribuirse a posibles ajustes subóptimos en algunas variables, o a las diferentes fuentes de información de entrada utilizadas entre los modelos. Sin embargo, una tendencia que se observa en nuestro estudio es que, en las estaciones más australes el rendimiento del REST2 es superior, reflejando menores valores de rRMSD.

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona una evaluación del rendimiento del modelo REST2 en la estimación de GHI bajo condiciones de cielo claro. Los datos utilizados para validar el modelo corresponden a registros minutales de las estaciones de PIL, VMA, CRD y RGL de la red Saver-Net, durante los años 2019 y 2020. La recopilación de diversas fuentes de información permitió obtener las variables atmosféricas necesarias para estimar GHI_c mediante el modelo REST2.

Los resultados del análisis indican una muy buena correlación de los datos, con valores de R entre 0,995 y 0,998 para todas las estaciones. Sin embargo, se observa que el modelo REST2 tiende a subestimar las mediciones de GHI_c, revelando sesgos relativos negativos en todos los casos.

En comparación, el modelo McClear, evaluado previamente en las mismas estaciones, muestra un mejor desempeño. Estos resultados indican que McClear tiene una menor tendencia a subestimar las mediciones y proporciona una mayor precisión en las estimaciones de GHI_c. Sin embargo, es importante destacar que la información de entrada para la caracterización de la atmósfera empleada por el modelo McClear es diferente a la empleada por el modelo REST2 presentado en este trabajo.

En futuras investigaciones, se propone expandir el alcance de este estudio incluyendo más estaciones de la red Saver-Net y abarcando períodos de tiempo más extensos. Además, se sugiere alimentar el modelo REST2 con otras fuentes de información, como por ejemplo datos de reanálisis, lo que permitiría una comparación con los resultados encontrados en este trabajo.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo cuenta con el apoyo de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en el marco del proyecto PICT-2020-SERIEA-02601.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) por el financiamiento del proyecto Saver-Net y a las instituciones SMN y CITEDEF por el mantenimiento y operación en los nodos de monitoreo de la red. Anabela Lusi es estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNICEN, Argentina). R. Alonso-Suárez y A. Laguarda agradecen el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), Udelar, a través del programa CSIC Grupos.

REFERENCIAS

- Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage*. (s. f.). Recuperado 3 de enero de 2024, de <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11(2), 156-166. <https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>
- Ångström, A. (1964). The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16(1), 64-75. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00144.x>
- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñán-Lamigueiro, O., y Escobar, R. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 374-387. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.032>
- Atwater, M. A., y Ball, J. T. (1978). A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy*, 21(3), 163-170. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90018-X)
- Atwater, M. A., y Ball, J. T. (1981). A Surface Solar Radiation Model for Cloudy Atmospheres. *Monthly Weather Review*, 109(4), 878-888. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0878:ASSRMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0878:ASSRMF>2.0.CO;2)
- Berger, X. (1979). Etude du Climat en Region Nicoise en vue d'Applications a l'Habitat Solaire. *CNRS, Paris*.
- Bird, R. E., y Hulstrom, R. L. (1981). *Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces* (SERI/TR-642-761). Solar Energy Research Inst. (SERI), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/6510849>
- Daneshyar, M. (1978). Solar radiation statistics for Iran. *Solar Energy*, 21(4), 345-349. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90013-0)
- Eck, Thomas., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., Slutsker, I., y Kinne, S. (1999). Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24), 31333-31349. <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
- Engerer, N., y Mills, F. (2015). Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.044>
- Gueymard, C. (1989). A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, 43(5), 253-265. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(89\)90113-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(89)90113-8)
- Gueymard, C. A. (2008). REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, 82(3), 272-285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011>
- Haurwitz, B. (1945). Insolation in relation to cloudiness and cloud density. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2(3), 154-166. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1945\)002<0154:IIRTCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1945)002<0154:IIRTCA>2.0.CO;2)
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., y Smirnov, A. (1998). AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- Ineichen, P. (2008). A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy*, 82(8), 758-762. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.009>
- Ineichen, P., y Perez, R. (2002). A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, 73(3), 151-157. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00045-2)
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction To Solar Radiation*. Elsevier Science.
- Kasten. (1984). Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungsfaktor. *Annalen der Meteorologie Neue*, 20, 49-50.
- Kasten, F. (1980). A simple parameterization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. *Meteorol. Rdsch.*, 33, 124-127.
- Kasten, F., y Czeplak, G. (1980). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 24(2), 177-189. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(80\)90391-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(80)90391-6)

- Laguarda, A. (2021). *Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre: Modelos físicos e híbridos utilizando información satelital sobre la Pampa Húmeda*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/28319>
- Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Visser, H., Vries, J. de, Stammes, P., Lundell, J. O. V., y Saari, H. (2006). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093-1101. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Lusi, A., Orte, F., Alonso-Suárez, R., D'Elia, R., y Wolfram, E. (2023). Evaluación de los Modelos de Radiación Solar Global Heliosat-4 y McClear en dos Sitios de Argentina. *ANALES AFA*, 34(3), Article 3. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.3.76>
- Orte, F., Wolfram, E., Luccini, E., D'Elia, R., Lusi, A., Pallotta, J., Nollas, F., Carmona, F., Papandrea, S., Cabezas, M. D., Benítez, G. C., y Mizuno, A. (2022). Red de Monitoreo de la Irradiancia Solar UV-Total en Argentina «Saver-Net». *Meteorológica*, 47(2). <https://doi.org/10.24215/1850468Xe016>
- OTT HydroMet. (s. f.). *CMP Series Pyranometers, Operational Manual*. https://s.campbellsci.com/documents/ca/product-brochures/cmp6-cmp11-cmp21_br.pdf
- 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)
- Robledo, L., y Soler, A. (2000). Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies. *Energy Conversion and Management*, 41(16), 1769-1779. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00019-4)
- 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*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/37953>
- Schuster, G. L., Dubovik, O., y Holben, B. N. (2006). Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D7). <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>
- Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G., y Shelby, J. (2018). The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>
- Shaw, G. E. (1983). Sun Photometry. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64(1), 4-10. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1983\)064<0004:SP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1983)064<0004:SP>2.0.CO;2)
- Stein, J., Hansen, C., y Reno, M. (2012). *Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis*. (SAND2012-2389, 1039404; pp. SAND2012-2389, 1039404). <https://doi.org/10.2172/1039404>
- Veefkind, J., Dehaan, J., Brinksma, E., Kroon, M., y Levelt, P. (2006). Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44, 1239-1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204>
- Westphal, D. L., y Toon, O. B. (1991). Simulations of microphysical, radiative, and dynamical processes in a continental-scale forest fire smoke plume. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96(D12), 22379-22400. <https://doi.org/10.1029/91JD01956>

ACCURACY OF THE REST2 CLEAR-SKY MODEL FOR GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE IN THE SAVER-NET NETWORK OF ARGENTINA

ABSTRACT Given the utility of clear-sky models for estimating the Global Horizontal Irradiance (GHI), it is pertinent to evaluate their performance against high-quality surface measurements. This work presents an evaluation of the REST2 model (“Reference Evaluation of Solar Transmittance,” two bands), a high-performance model based on a two-band scheme that uses various atmospheric parameters to characterize the atmosphere. The model's results were assessed using minute GHI data from the Pilar, Villa Martelli, Comodoro Rivadavia, and Río Gallegos sites in the Argentine solar radiation network Saver-Net during 2019 and 2020. The results indicate a very good correlation of the data, with Pearson coefficients between 0.995 and 0.998 for all stations. However, it was observed that, with the considered input variables, the REST2 model tends to underestimate GHI measurements, revealing negative relative biases (rMBD) in all cases. The most extreme rMBD value was found at the

Pilar station at -6.2%. The relative mean square errors (rRMSD) were 7.9% at Pilar, 6.3% at Villa Martelli, 4.7% at Comodoro Rivadavia, and 5.3% at Río Gallegos. Additionally, it was observed that more southern stations with lower average GHI values showed better model performance.

Keywords: GHI, REST2, modeling and clear sky