

UTILIZANDO EL MODELO SATELITAL GL 1.2 EN ESCALA DIARIA COMO REFERENCIA PARA CALIBRACIÓN PROVISORIA DE LA RED EEAOC – TUCUMÁN

Juan C. Ceballos¹, Jorge D. Forciniti², María L. Molina³

¹Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos – DISSM, Coordenação Geral de Ciências da Terra – CGCT, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil

Teléfono 55 12 3208 8750 - e-mail jcc.1943@gmail.com

²Sección Agrometeorología, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.

CC Nº 9 (4101) Las Talitas –Tucumán – Argentina

³Laboratorio de Ionosfera, Atmósfera Neutra y Magnetosfera – LIANM, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán - Tucumán – Argentina

RESUMEN: En Tucumán, la Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC) dispone de una red de estaciones meteorológicas automáticas con generación continua de datos de irradiancia solar. En este trabajo se contrastan las irradiancias medias diarias de 18 estaciones (período 2017-2021) con los valores obtenidos por el modelo satelital GL1.2 desarrollado en la División de Satélites e Sensores Meteorológicos (DISSM/CGCT/INPE, Brasil). Este modelo ya mostró un buen desempeño en la comparación con datos de piranómetros Kipp & Zonen CM6B y CMP6 de la red automática del INMET (Instituto Nacional de meteorología, Brasil). Se realizó un análisis preliminar de la calidad del GL1.2, comparándolo con datos diarios (primer semestre de 2018) de la red del INMET en una región relativamente homogénea del Brasil en latitud semejante a la de Tucumán, obteniéndose un buen ajuste, por lo que se adoptó el GL1.2 como "piranómetro de referencia" para una calibración provisoria de los datos solarimétricos diarios de la red EEAOC. Los resultados de los estadísticos utilizados para juzgar el ajuste lineal EEAOC vs. GL 1.2 sugieren que el modelo satelital puede utilizarse para la calibración provisoria de la red de Tucumán, con dispersión típica (desviación estándar) de 20 W/m².

Palabras claves: calibración provisoria, modelo GL 1.2, red solarimétrica.

INTRODUCCIÓN

El Noroeste Argentino tiene un área de 560.000 km², y una fracción importante de ella es de tipo montañoso. Históricamente, las redes solarimétricas han sido poco densas para cubrir con detalles la distribución de energía solar, y las series temporales fueron complementadas con mediciones de heliofania (ver p.ej. Atlas Solarimétrico de Grossi Gallegos e Righini, 2007). Actualmente, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) opera una red que en el Centro y Noroeste del país tiene estaciones en Pilar (Córdoba), La Quiaca (Jujuy) y Tucumán, las dos primeras con irradiancias horarias y diarias recientes publicadas en el World Radiation Data Centre ([WRDC](#)). Esfuerzos recientes pueden incrementar una red nacional del INTA, instalando 4 estaciones de alto desempeño en Salta y Jujuy (ver [noticia](#)).

Dentro del Noroeste Argentino la provincia de Tucumán tiene un área de apenas 22524 km², básicamente entre las latitudes de 26° y 28° sur, y longitudes de 64° 30' y 66° 15' oeste. La Figura 1 ilustra la orografía de la provincia. Su topografía es compleja, presentando diversos microclimas asociados al relieve y circulación atmosférica regional: llanuras y montañas, climas secos y húmedos, selvas exuberantes y tierras áridas. Llanuras, valles y montañas con altas cumbres ubicadas hacia el oeste y noreste de la provincia, cubren el 45% de la superficie total. Dos altas cumbres exceden 5400 m

de altitud. Al este, el 55% es la Pampa de Tucumán y progresivamente para la región chaqueña con altitud inferior a 450 m. Dada esta variedad, la instalación y manutención de una red adecuada (con funcionamiento automático) es una tarea complicada. La Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC, con sede en San Miguel de Tucumán), cuenta con una red de más de 40 estaciones meteorológicas automáticas, que son gestionadas por la Sección Agrometeorología de la institución. La Figura 1 ilustra la localización de 18 de ellas, seleccionadas para este trabajo; la mayoría se sitúa en la llanura y piedemonte del Aconquija, y 2 en la región montañosa, en altitud superior a 1700 m.

Desde 1994, esta red genera información meteorológica de manera automática. A partir de 2006, se implementó un sistema de telesupervisión que hasta hoy en día permite obtener datos en tiempo real de diferentes variables meteorológicas, entre ellas la radiación solar global (Lamelas et al., 2006), con una frecuencia de medición cada 15 minutos. Los datos de estas estaciones están disponibles en la página web de la Sección Agrometeorología (<http://agromet.eeaoc.gob.ar>). La medición de la radiación solar global se realiza mediante solarímetros fotovoltaicos con sensores de fotodiodo de silicio (Grossi Gallegos y Righini, 2007), los cuales son sensibles en la bandapectral que va desde los 300 a 1100 nm, pero están calibrados para medir la radiación solar en el intervalo de 300 a 3000 nm. Al ser una red tan densa, es frecuente enfrentarse a la ausencia de datos de radiación debido a problemas con la fuente de alimentación, así como la presencia de información defectuosa por mal funcionamiento de los sensores. También ocurre que instrumentos se deteriorean con el tiempo y debido a la exposición a las condiciones climáticas, lo que puede contribuir a la corrupción de sus datos.

El modelo satelital GL1.2 (Ceballos et al. 2004) fue desarrollado en la DISSM/CGCT/INPE y estima radiación solar operacionalmente a partir de imágenes GOES-VIS da América del Sur y parte de Mesoamérica y Caribe (URL <https://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>). En escalas temporales de un día a un mes muestra resultados positivos para desviación media MBE y estándar S en la comparación con varias redes solarimétricas: en el Sur de Brasil, 2,5 y 21 W/m² respectivamente, para valores diarios (Porfirio et al. 2020); en la Pampa Húmeda argentina, -4 a +6, y 10 a 20 W/m², para promedios de 10 días (Ceballos et al. 2022). Si se considera promedio diario típico de 200 W/m² en 2018-2021, para Uruguay se tiene MBE=-4 a 1 y S= 12 a 26 W/m² (Sarazola et al. 2023). En Tucumán, Forciniti et al. (2022) observaron excelente linealidad de 16 estaciones de la red EEAOC, período 2017-2021, con valores relativamente elevados de MBE y S~10-30 W/m². Es relevante observar que el GL 1.2 muestra desempeño superior o por lo menos comparable al de varios modelos reconocidos internacionalmente, para Brasil (Porfirio et al. 2018) y para Uruguay (Sarazola et al. 2023).

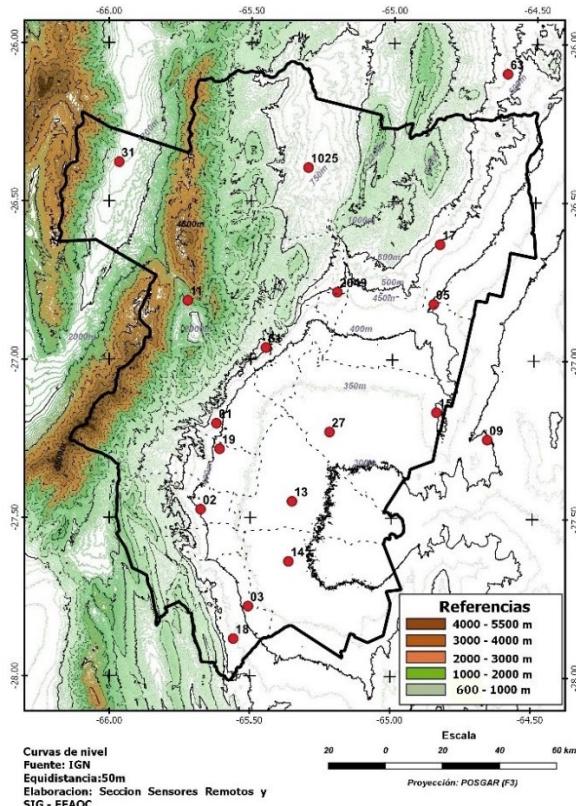
La cuestión central de este trabajo es analizar la posibilidad de utilizar el GL 1.2 como referencia para una calibración provisoria de datos solarimétricos de la red EEAOC. En una etapa posterior, uno o más piranómetros de referencia podrán ser utilizados para 1) calibración sistemática de la red; 2) corrección del propio estimador GL en la región tucumana, para ejecutar un ajuste final de la serie temporal completa de datos solarimétricos. Para eso, se realiza un análisis preliminar de la calidad del GL 1.2 como estimador de irradiancia media diaria en una región relativamente homogénea y en latitud semejante a la de Tucumán (a fin de tener básicamente la misma geometría diaria de la trayectoria del sol, y ángulos cenitales semejantes del satélite GOES). En caso de resultado satisfactorio, a seguir se realiza una “calibración provisoria” de estaciones de la EEAOC en el quinquenio, presentando los resultados.

DATOS Y MÉTODOS

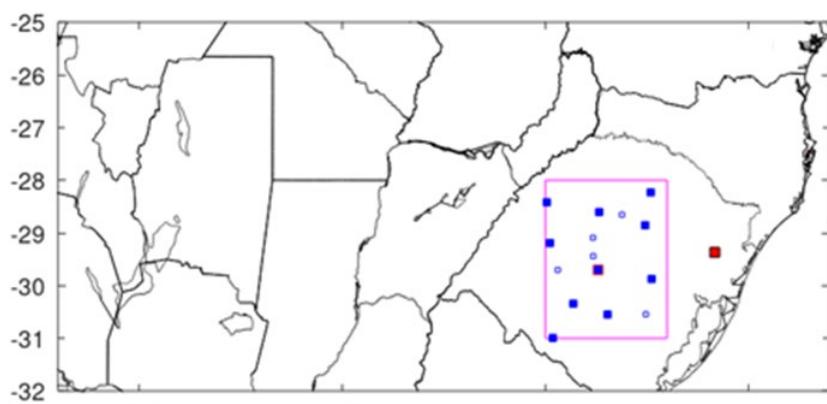
Datos de irradiancia media diaria en el quinquenio 2017-2021 fueron analizados, provenientes de tres fuentes:

1. Red automática de la EEAOC (provincia de Tucumán y algunos locales vecinos en Santiago del Estero y Salta). Se dispuso de 30 estaciones automáticas con registros de radiación solar. Estas estaciones registran datos con una periodicidad de 15 minutos. Se calculó el promedio diario de radiación tomando en cuenta los registros generados durante un período de 24 horas. Solo se conservaron los registros diarios que contenían al menos el 95% de los datos de 15 minutos. Los registros que no cumplieron con este criterio fueron descartados. Como resultado fueron seleccionadas 18 estaciones que

cumplían con estos requisitos, y son indicadas en la Figura 1a y Tabla 1. Fuente de datos puede ser consultada en EEAOC Agrometeorología, 2023 (<https://agromet.eeaoc.gob.ar>).



(a)



(b)

Figura 1. Distribución geográfica de locales. (a) Red EEAOC: círculos en rojo; líneas de nivel negras a cada 100 m en la llanura, y a cada 500 m en la región montañosa. (b) En recuadro, 15 estaciones de la red INMET; 10 escogidas para análisis están llenas en azul. Llena en rojo: estación Canela, RS.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la red EEAOC, georreferenciadas instaladas a lo largo de la provincia de Tucumán y áreas de influencia. ID: identificación en los archivos GL; Estación: ID en archivos EEAOC.

ID	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
29046	01	Pueblo Viejo	-27,1975	-65,6183	427
29048	02	Santa Ana	-27,4747	-65,6764	389
29033	03	Casas Viejas	-27,7803	-65,5064	383
29043	05	Monte Redondo	-26,8192	-64,8503	393
29056	09	El Charco	-27,2509	-64,6628	308
29045	18	Bajastiné	-27,8825	-65,5589	471
29037	11	Pinar de los Ciervos	-26,8147	-65,7239	2427
28044	13	Ingas	-27,4489	-65,3514	317
29050	14	Monte Toro	-27,6383	-65,3636	309
29040	15	Viclos	-27,1656	-64,8425	401
29031	17	La Cruz	-26,6350	-64,8350	491
29041	19	Las Faldas	-27,2833	-65,6094	388
29060	27	Los Quemados	-27,2289	-65,2203	324
29055	31	Colalao del valle	-26,3771	-65,9649	1710
29057	61	El Guayal	-26,9382	-65,4712	494
29052	63	Antilla	-26,0942	-64,6022	535
29032	1025	Benjamín Paz	-26,3939	-65,2997	780
29035	2049	El Colmenar	-26,7875	-65,1953	482

El mantenimiento está programado para periodicidad de una o dos veces por bimestre, mientras que los sensores son reemplazados cada 5 años. No se registra calibración, más que la de fábrica. Cuando se detectan datos anómalos por comparación con estaciones cercanas, se reemplaza el sensor por uno nuevo. Está planeada una secuencia sistemática de intercomparaciones con un piranómetro Kipp & Zonen CM6B calibrado recientemente en el GERSOL (Univ. Nac. de Luján). Esto implicará en duración considerable de una secuencia completa de calibración de la red.

2. Red de estaciones automáticas del INMET (Sur y Sudeste del Brasil), primer semestre de 2018. La red INMET dispone de piranómetros Kipp & Zonen CM6B y CMP6, con señal muestrado a cada minuto e información de la integral horaria (Porfirio et al. 2020; página web INMET 2023). Datos diarios son generados como promedio diario de los datos horarios. Considerando un área de $3^\circ \times 3^\circ$ (longitud -55° a -52° W, latitud -31° a -28° S) en el Estado de Rio Grande do Sul, geográficamente homogénea y en latitud semejante a la provincia de Tucumán (Figura 1b), la red INMET reporta la existencia de 15 estaciones. Para análisis final fueron utilizados datos disponibles de 10 de ellas, indicadas con cuadrado lleno.

3. Estimadores provenientes del modelo satelital GL 1.2 (generados en la DISSM/CGCT/INPE, Brasil), produciendo archivos digitales diarios en grilla regular con resolución de $0,04^\circ$. Los archivos digitales diarios de GL permiten el muestreo operacional de estimaciones para un conjunto de puntos de interés, que incluyen los locales de las redes EEAOC e INMET. Un número ID de identificación, latitud, longitud y altitud y los valores diarios son insertados en una planilla mensual (archivos de texto) TAB_GL12G_aaaamm.txt, donde *aaaamm* indica año y mes. En planillas mensuales ESTACAO_aaaamm.txt con la misma secuencia interna de ID son incorporados los datos disponibles de mediciones diarias. Las planillas están en continua actualización, sea por la adquisición de datos antiguos, sea por la inclusión de nuevos locales de interés. La base de datos disponible en 2023 fue la utilizada en este trabajo. Datos X no registrados o inválidos ($X \leq 0$ o $X > 400 \text{ W/m}^2$) son considerados nulos.

Métodos de evaluación de parámetros

Considérese una variable física (en este caso, irradiancia solar media diaria), con una serie de datos X (estimados o medidos) y con una serie correspondiente de datos Y (obtenidos con un método considerado más preciso, o “verdadero”). La serie X puede ser corregida o ajustada mediante una regresión lineal Y|X obtenida por el conocido criterio de cuadrados mínimos, resultando en estimar un valor X* “corregido” según la expresión

$$X^* = a X + b, \quad (1a)$$

$$a = [\langle X^2 \rangle \langle Y \rangle - \langle X \rangle \langle XY \rangle] / D, \quad D = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad (1b)$$

$$b = (\langle Y \rangle - a) / \langle X \rangle. \quad (1c)$$

Aquí, el corchete angular $\langle U \rangle$ simboliza el promedio aritmético de una variable U . Las medidas de calidad de datos están asociadas a las desviaciones (“errores”) $E = Y - X$, $E^* = Y - X^*$, según

$$\text{MBE}(\text{desviación media, mean bias error}) = \langle E \rangle \quad (2a)$$

$$\text{MBE}^*(\text{idem, referido al ‘‘valor corregido’’}) = \langle E^* \rangle \quad (2b)$$

$$S^2 \text{ (varianza de } E) = \text{Var}(E) = \langle (E - \text{MBE})^2 \rangle \quad (2c)$$

$$S^{*2} \text{ (varianza de } E^*) = \langle (X^* - \text{MBE}^*)^2 \rangle \quad (2d)$$

$$\text{RMSE} \text{ (error cuadrático medio)} = (\langle E^2 \rangle)^{1/2} = (\text{MBE}^2 + S^{*2})^{1/2} \quad (2e)$$

$\text{MBE}^* = 0$, por construcción. La linealidad del ajuste X^* (Ec.1a) se califica según el coeficiente de correlación (ρ) y el de determinación (ρ^2):

$$\rho = \langle (X - \langle X \rangle) \cdot (Y - \langle Y \rangle) \rangle / [\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y)]^{1/2} \quad (3)$$

En el caso de observar una convergencia coherente de los pares $(X, Y) \rightarrow (0,0)$ para $Y \rightarrow 0$, es razonable forzar una regresión lineal pasando por el origen, de modo que

$$X^* = a X \quad (4a)$$

$$a = \langle X Y \rangle / \langle X^2 \rangle \quad (4b)$$

Este criterio de calibración es eventualmente más coherente que el descripto por las (Ecs.1a -1c), siempre que no se registren valores excesivamente grandes y frecuentes de E y de S (Ecs. 2a -2e).

RESULTADOS

Comportamiento del modelo GL 1.2

Aunque no disponemos de información detallada sobre la rutina de mantenimiento y calibración de la red INMET, *a priori* los piranómetros utilizados son de buena calidad y probablemente mayor estabilidad que los de la EEAOC. Así, en una primera etapa las estimaciones del modelo satelital (GL) fueron comparadas con las medidas de piranómetros (Gp) en la red INMET, adoptadas como referencia. En el contexto de las variables descriptas en Datos y Métodos, era $GL = X$, $Gp = Y$. Desechando pares (GL, Gp) con GL o GP nulo (ausencia de dato o incompatibilidad de él), fueron considerados los datos de diez de las quince estaciones (indicados en azul lleno en la Figura 1). No fueron aplicados filtros adicionales, obteniéndose una población total de 1734 pares de datos (GL, Gp).

La Figura 2 ilustra la comparación entre las variables GL y Gp: a la izquierda, estación Canela (fuera de la región muestreada, ver Figura 1b), y a la derecha, el conjunto de informaciones de los 10 locales seleccionados. Para una región geográficamente homogénea, se esperan variaciones grandes de la

irradiancia a lo largo del año, pero dispersión pequeña de los puntos en torno de una recta de calibración (primera diagonal, *si el modelo y los piranómetros son confiables*).

En lo que respecta a Canela, los parámetros de desviación son $MBE = -1$, $S = 20$, $RMSE = 20 \text{ W/m}^2$; para la regresión usual (línea roja) es $MBE=0$, $S^* = 18 \text{ W/m}^2$, y el ajuste apenas multiplicativo (línea verde) produce $MBE^* = -4$, $S^* = 19 \text{ W/m}^2$. Por lo tanto, no hay una diferencia estadística significativa entre la regresión usual y aquella con origen forzado. Los valores de desviación estándar S o S^* del modelo GL son semejantes a los mencionados en la Introducción para otras regiones de América del Sur en latitudes semejantes.

La Figura 2 permite una visión de conjunto de los pares (GL, Gp). Se han considerado rectas de regresión con pasaje forzada por el origen de coordenadas. Los coeficientes de correlación son muy elevados para todos los locales ($\rho > 0,966$, excepto uno), indicando acentuada linealidad y pequeña dispersión de puntos en torno de la recta de regresión. Algunos valores intermedios de irradiancia (100 a 250 W/m^2) presentan desvíos mayores (probablemente debido a limitaciones del GL 1.2 en el modelaje de efectos de nubes). Por otro lado, la Figura 2 muestra puntos que obviamente denuncian datos GL o Gp inválidos pero que son minoritarios.

La coherencia de $GL \rightarrow 0$ con $Gp \rightarrow 0$, dentro de la margen de un desvío estándar S y las pendientes oscilando dentro de $\pm 0,03$ en torno de la unidad, justifican usar una regresión $Gp|GL$ simple (apenas una constante multiplicativa de ajuste), o sea, el uso de las expresiones (4) para “calibrar” el modelo GL 1.2 con piranómetros de referencia. Recíprocamente, sugieren que el propio modelo GL puede ser usado como referencia para valores diarios regionales dentro del 3% de la constante de calibración.

A pesar de ser próximos y climáticamente semejantes, se observan algunos coeficientes de ajuste a con valores discrepantes: la Figura 2 ilustra en rojo y en azul los ajustes con máxima y mínima pendiente ($a = 1,06$ y $a = 0,95$). Estas diferencias de 5% en el coeficiente de ajuste sugieren eventual defecto de calibración de algunos piranómetros (de hecho, no tenemos información sobre la calibración sistemática de los instrumentos de la red).

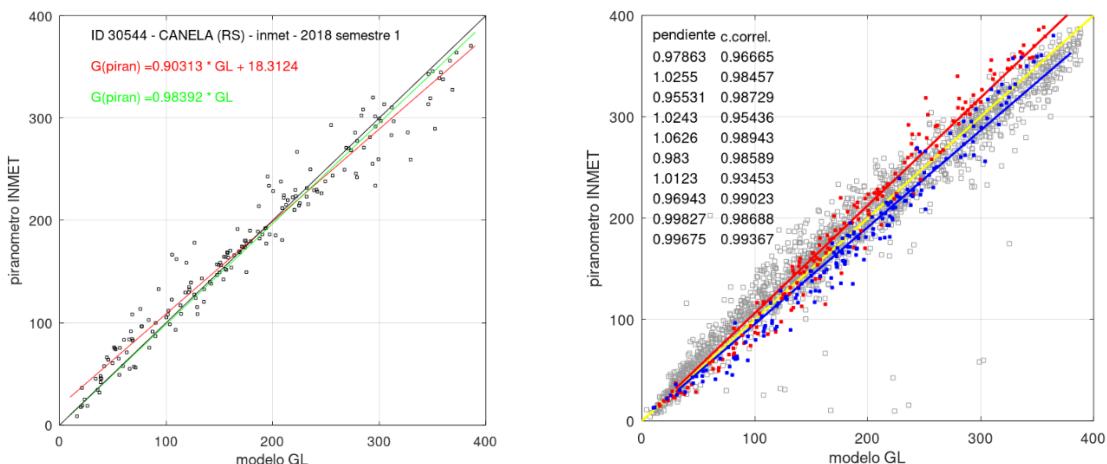


Figura 2. Modelo GL versus piranómetros de la red INMET en la región central de Rio Grande do Sul, enero-junio 2018. Izquierda: estación Canela, con rectas de regresión usual y con origen forzado. Derecha: Comparación con 10 piranómetros, indicando pendientes y coeficientes de correlación de la regresión $Gp|GL$. Líneas roja y azul: ver texto.

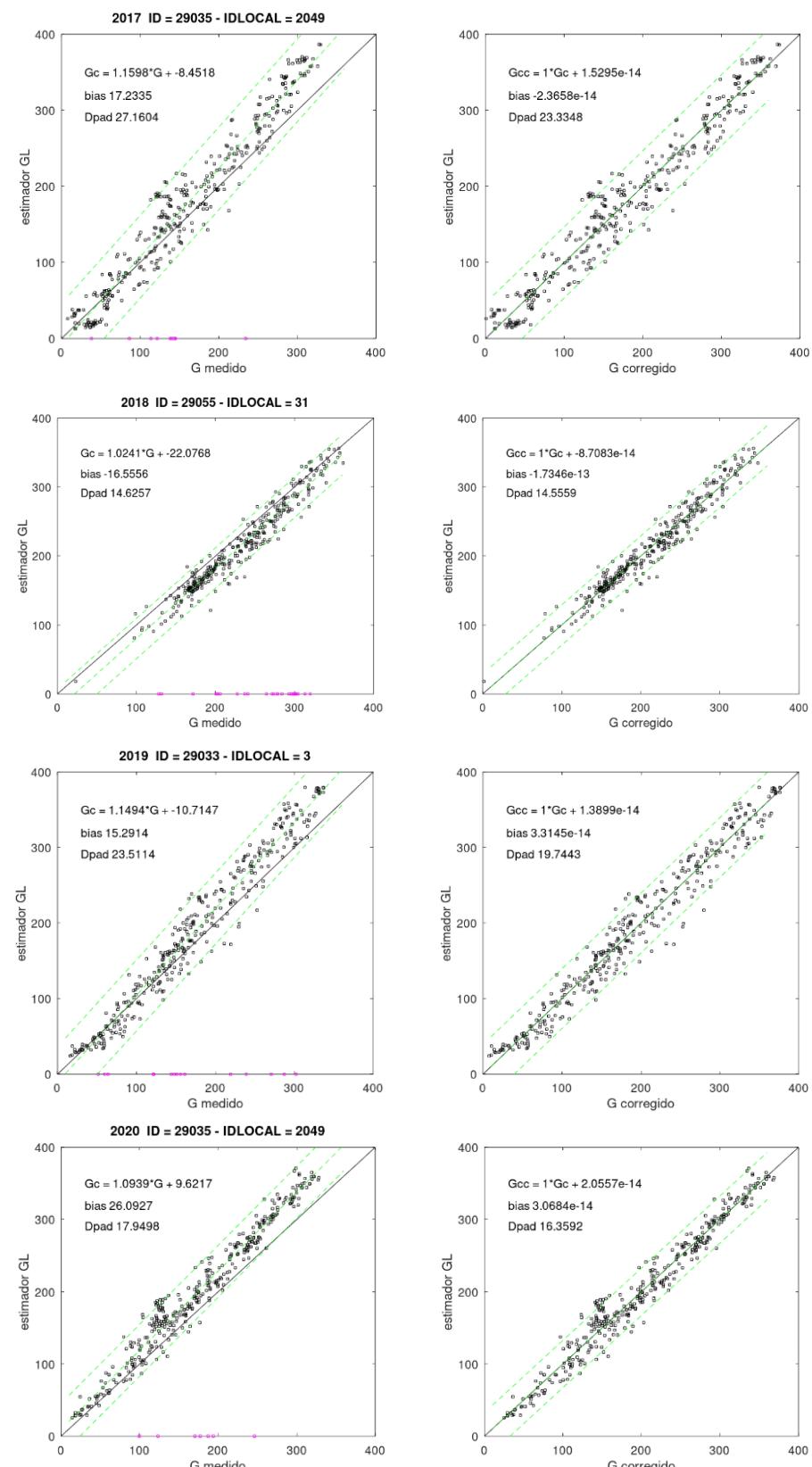


Figura 3. Ejemplos de comportamiento de estaciones en 4 años diferentes. Izquierda: diagrama de dispersión $GL|G$ (Gc se refiere a la recta de regresión lineal); puntos rosados en el eje x indican casos con ausencia de valor GL (no incorporados a la estadística). Derecha: diagrama $GL|G^*$. bias: desviación media MBE; Dpad: desviación estándar S. Gc y Gcc se refieren a las respectivas rectas de regresión lineal.

La coherencia de $GL \rightarrow 0$ con $Gp \rightarrow 0$, dentro de la margen de un desvío estándar S y las pendientes oscilando dentro de $\pm 0,03$ en torno de la unidad, justifican usar una regresión $Gp|GL$ simple (apenas una constante multiplicativa de ajuste), o sea, el uso de las expresiones (4) para “calibrar” el modelo GL 1.2 con piranómetros de referencia. Recíprocamente, sugieren que el propio modelo GL puede ser usado como referencia para valores diarios regionales dentro del 3% de la constante de calibración.

A pesar de ser próximos y climáticamente semejantes, se observan algunos coeficientes de ajuste a con valores discrepantes: la Figura 2 ilustra en rojo y en azul los ajustes con máxima y mínima pendiente ($a = 1,06$ y $a = 0,95$). Estas diferencias de 5% en el coeficiente de ajuste sugieren eventual defecto de calibración de algunos piranómetros (de hecho, no tenemos información sobre la calibración sistemática de los instrumentos de la red).

Es importante observar que el GL1.2 es un modelo físico (no estadístico) y no incluye ajuste empírico con datos solarimétricos de superficie. Localmente, depende principalmente de la información sobre reflectancia típica de escena sin nubes ($Rmin$) y sobre agua precipitable ($W2$). La primera puede influir en la estimación de nebulosidad que, conjuntamente con la segunda, permite evaluar absorción por la atmósfera (Ceballos et al., 2004). En la medida en que $Rmin$ y/o $W2$ se aparten del valor asumido en el modelo, éste producirá estimaciones con errores sistemáticos mayores (Ceballos et al., 2023).

Los elevados coeficientes de correlación (Figura 2) en su conjunto son favorables al uso del propio modelo GL como “piranómetro de referencia” en la red del INMET, para detección *a priori* de comportamientos anormales de un piranómetro. Sugiere también que el GL 1.2 puede ser usado en la región de la EEAOC, desde que $Rmin$ y $W2$ representen valores regionales. El propio GL 1.2 puede ser corregido con futuros ajustes estacionales, mediante un piranómetro de referencia *ad hoc* localizado en Tucumán y calibrado adecuadamente.

Comparación red EEAOC versus modelo GL

Considerando el estimador GL 1.2 como valor de referencia para una calibración de datos de superficie ($G = X$, $GL = Y$), la Figura 3 ilustra algunos casos entre 2017 y 2020. A la izquierda, las abscisas representan datos medidos por estación, y las ordenadas el valor estimado GL 1.2., considerado de referencia. Se incluyen la regresión lineal (Ec. 1a), la desviación media MBE (Ec. 2a) y la desviación estándar S (Ec. 2c). El coeficiente de correlación lineal fue $p > 0,95$ en todos los casos. Las rectas de trazos representan $G^* \pm 2 S$. Los gráficos de la derecha se refieren a valores de G corregidos. La regresión $GL|G^*$ describe la diagonal principal 1:1, la desviación media MBE^* es nula. Las líneas de trazo representan la regresión $G^* \pm 2 S^*$. En general, las medidas de la red EEAOC presentan una dispersión del orden de $S^* = 20 \text{ W/m}^2$.

La Tabla 2 presenta los parámetros estadísticos MBE (Ec. 2a) y S (Ec. 2c) en W/m^2 para todas las estaciones EEAOC, considerando el quinquenio 2017-2021. Las estaciones tenían por lo menos 50% de los pares (G , GL) posibles. Al aplicar una regresión lineal, $MBE^*=0$ pero la dispersión de los datos corregidos cambia poco en relación a la original: $S^* \sim S$. Estaciones como Pinar de los Ciervos (ID local 11) o El Guayal (61) presentarían elevado valor de S^* , asociado a variaciones de comportamiento o mantenimiento durante el quinquenio; al procesar datos anuales, como ilustrado por la Tabla 3, S^* decrece para $26-27 \text{ W/m}^2$. Es importante observar que, una vez retirada la tendencia $a.G+b$, S^* representa el desvío estándar de fluctuaciones $E = GL - G^*$ aleatorias compuestas como suma de los errores del propio sensor terrestre más los errores intrínsecos de GL, asociados muy especialmente a las limitaciones del modelo para discernir correctamente la nebulosidad en una célula de grilla ($0,4^\circ \times 0,4^\circ$) y sus variaciones rápidas.

En escala anual se observan valores típicos $S^* \sim 20 \text{ W/m}^2$, lo que parece representar una característica regional de la precisión del modelo GL 1.2. Asumiendo para E una distribución aproximadamente gaussiana, el intervalo $\pm 2S^* \sim 40 \text{ W/m}^2$ acumula 95% de las fluctuaciones esperadas para E . Este margen es también el esperable para substitución de G^* por el valor GL en el caso de datos faltantes.

De esta forma, los coeficientes a, b permitirían una corrección preliminar de las series temporales de irradiancia obtenidas por la red EEAOC y la compleción de series temporales. Obviamente esta corrección tiene naturaleza estadística y no substituye el análisis cuidadoso de las series de medidas para corregir errores de naturaleza técnica o de limitaciones del propio modelo satelital.

Tabla 2: Desviación media (sesgo MBE) y desviación estándar S, en W/m^2 , para estaciones instaladas a lo largo del territorio tucumano con datos del período 2017-2021.

ID	ID Local	MBE	S
29046	1	26,6	30
29048	2	31,5	36
29033	3	10,2	24
29043	5	18,7	24
29056	9	34,3	42
29045	11	-4,6	63
29037	13	22,2	31
28044	14	20,9	25
29050	15	16,4	32
29040	17	12,9	22
29031	18	13,2	23
29041	19	17,5	33
29060	27	32,4	39
29055	31	-12,1	18
29057	61	-4,8	41
29052	63	28,4	32
29032	1025	21,2	43
29035	2049	19,5	23

Tabla 3: Cálculo anual de la pendiente (a) y ordenada al origen (b) de la recta de regresión $GL|G$, sesgo (MBE) de la estimación GL 1.2, y desviación estándar S^* de la regresión $GL|G^*$. Período 2017-2021. Unidades: W/m^2 .

ID Local	2017				2018				2019				2020				2021			
	a	b	MBE	S*	A	b	MBE	S*	a	b	MBE	S*	a	b	MBE	S*	a	b	MBE	S*
1	1,118	-9,7	8	28	1,248	-15,0	23	19	1,207	-4,9	27	20	1,187	4,5	35	18	1,184	0,9	30	16
2	1,178	-6,6	19	27	1,233	-7,6	27	19	1,203	-5,2	27	21	1,181	8,2	37	19	1,157	7,7	33	20
3	1,114	-19,8	1	21	1,116	-18,0	2	21	1,149	10,7	15	20	1,064	3,7	16	24	1,055	5,3	15	19
5	1,141	-14,9	10	23	1,136	4,8	23	25	1,119	-7,4	13	18	1,069	10,5	24	20	1,068	9,2	21	20
9	1,058	6,9	17	27	1,117	0,9	21	27	1,130	-4,4	18	23	1,062	20,3	32	23	1,070	16,5	29	22
11	0,863	31,5	6	27	1,040	-12,4	-5	20	1,062	-15,5	-3	19	1,069	-3,3	11	20	1,077	2,7	16	19
13	1,156	-17,9	9	20	1,136	-7,6	15	20	1,162	-0,26	25	23	1,085	11,8	27	22	1,085	9,6	20	19
14	1,156	-12,1	14	25	1,186	-15,6	17	16	1,141	-3,8	20	18	1,119	7,8	30	20	1,124	-6,0	17	15
15	1,036	-7,3	-0,6	25	1,123	-9,5	12	19	1,113	-6,2	13	18	1,020	20,0	24	23	1,012	9,1	11	19
17	1,142	-21,0	5	20	1,121	-10,4	11	19	1,131	-11,8	12	17	1,086	5,8	23	15	1,078	-1,5	13	18
18	1,125	-20,2	24	21	1,097	-10,8	7	19	1,118	-6,6	14	19	1,121	2,0	25	18	1,080	2,9	17	19
19	1,138	-15,9	7	23	1,148	-9,1	15	20	1,148	-5,5	19	21	1,118	-0,7	20	20	1,130	-0,3	21	21
27	1,142	-6,3	17	28	1,102	5,8	22	25	1,148	2,1	26	25	1,095	24	41	21	1,094	10,4	27	24
31					1,024	-22,0	-17	15	1,039	-22,4	-13	16	1,072	-25,4	19	18	1,048	-20,7	-9	19
61	0,978	-2,0	-6	24	1,043	-1,3	6	14	1,018	-3,0	0	25								
63	1,167	-16,5	13	22	1,195	-16,1	19	20	1,158	-7,1	19	26	1,180	12,1	44	20	1,212	1,5	39	22
1025	1,181	-17,1	14	25	1,160	-11,6	16	25	1,188	-13,9	20	22	1,134	9,3	34	18	1,143	6,1	31	19
2049	1,160	-8,5	17	23	1,126	-6,7	14	17	1,154	-11,8	14	15	1,094	9,6	18	16	1,116	6,5	25	20

CONCLUSIONES

La comparación del modelo GL 1.2 con piranómetros de la red INMET en latitudes semejantes a Tucumán indica que el modelo pudo comportarse de forma semejante a un Kipp & Zonen (CM6B o CMP6) para irradiancias medias diarias, con ajustes lineales de elevado coeficiente de correlación y desviaciones no superiores a 3% de la calibración relativa (sea del modelo corregido con relación a un patrón, o de los instrumentos con relación al modelo). Inclusive, permite detectar eventuales desvíos de calibración del orden de 5% en dos instrumentos de entre 10 de la región escogida. Este resultado sugiere la competencia del GL 1.2 para analizar críticamente la calibración de instrumentos de una red regional y realizar una corrección provisoria de series temporales de medición.

La comparación con datos medidos en 18 estaciones de la red EEAOC en Tucumán (irradiancia media diaria G en el quinquenio 2017-2021), muestra una elevada correlación lineal entre el modelo GL 1.2 y las mediciones de la red ($p > 0,95$). Los valores experimentales G corregidos por regresión lineal (G*) tienen MBE* nulo y desviación estándar S* típica de 20 W/m^2 en torno de las estimaciones satelitales. Estos resultados avalan al modelo GL1.2 como una herramienta de referencia para calibraciones provisionales de datos solarimétricos de la red EEAOC, así como compleción de datos faltantes en series temporales de G*. Lógicamente, se deben aplicar análisis adicionales a las series temporales de valores experimentales, para separar desviaciones meramente estadísticas de problemas asociados a manutención o reemplazo de instrumentos.

Bien entendido, este procedimiento es provisional y puede ser reajustado por comparación posterior del GL con un piranómetro patrón en el área tucumana. La ventaja principal del método es que la calibración individual de los piranómetros de la red (30 estaciones) contra apenas uno de alta calidad, calibrado y de referencia requeriría, sin duda, un tiempo y esfuerzo mucho mayor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el aporte de la Sección Agrometeorología de la EEAOC, difundiendo datos meteorológico y solarimétricos en la URL <https://agromet.eeaoc.gob.ar/>, así como del grupo G-STAR de la DISSM/CGCT/INPE (e-mail gstar@inpe.br) contribuyendo a la difusión de datos del modelo GL 1.2. Series mensuales para América del Sur están disponibles (formato geotiff) en la URL <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/> → medias mensais, y series pentadales de 20 años en la página GSTAR http://pururuca.cptec.inpe.br/gstar/GSTAR_dados.html.

REFERENCIAS

- Ceballos, J.C., Jesus, H.J.S., Porfirio, A.C.S., Costa, S.M.S. (2023). Estimativa de radiación solar à superfície: GL Versões 1.2 e 1.4. Configuração modular – Relatório Preliminar. Relatório GSTAR RT-001-2023. http://pururuca.cptec.inpe.br/gstar/GSTAR_publicacoes.html.
- Ceballos, J. C., Bottino, M. J. y Souza, J.M. (2004). A simplified physical model for assessing solarradiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. J. Geophys. Research 109: D02211, <https://doi.org/10.1029/2003JD003531>.
- Ceballos, J.C., Lamelas, C. M., Forciniti, J. D. y Rodrigues, M.L. (2011). Radiación Solar en la Provincia de Tucumán: Una Comparación Entre Valores Estimados por Satélite y Medidos por una Red Solarimétrica. XXXIV Reunión de ASADES 2011. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15, 2011. Área: Radiación Solar y Clima- 71 – 78. ISSN 0329-5184. Acceso <https://www.researchgate.net/project/Satellite-estimation-of-surface-radiative-fluxes>; también https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/SEDICI_d60a0f4ecc5825f35b2c6e804b94ce6d.
- Ceballos, J.C., Porfirio, A.C.S, Oricchio, P.A. y Posse, G. (2022). Characterization of the annual regime of surface solar irradiance over Argentine Pampean Region using GL1.2 satellite-based data. Renewable Energy 194: 526-537. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.038>.
- EEAOC, Sector Agrometeorología. 2023. Página web URL <http://agromet.eeaoc.gob.ar>.
- Forciniti J.D., Ceballos J.C., Molina M.L., Leal A.M., Soria F.J. y Soulé Gómez M. L. (2022). Comparación de Datos de Radiación Solar Global Mensual Estimados por Satélite y Generados por la Red de Estaciones Meteorológicas de la EEAOC, Tucumán – Argentina. Actas XLIV Reunión de

- trabajo ASADES. Vol. 9: 177-185. <http://asades.org.ar/wp-content/uploads/2023/05/ACTAS-2022.pdf>.
- Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2007). Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, ISBN978-987-9285-36-7. Acceso en <http://www.gersolar.unlu.edu.ar/?q=node/8> INMET 2023. Página web: <https://portal.inmet.gov.br/>
- Lamelas, C.M., Forciniti, J.D. y Soulé Gómez, M.L. (2006). Provincia de Tucumán: Desarrollo e instalación de un sistema de telesupervisión y comando para estaciones meteorológicas automáticas. XI Reunión Argentina de Agrometeorología. Trabajos Presentados - Área Agrometeorología: 13 – 16.
- Porfirio, A.C.S., Ceballos, J.C., Britto J.M.S. y Costa S.M.S. (2020): Evaluation of Global SolarIrradiance Estimates from GL1.2 Satellite-Based Model over Brazil Using an Extended RadiometricNetwork. *Remote Sensing* 12, no. 8: 1331. <https://doi.org/10.3390/rs12081331>.
- Porfirio, A.C.S; Ceballos, J.C.; Enoré, D.; Costa, S.M.S. Validation of three satélite-based solar radiation products: Preliminary analysis over Northeast and South of Brasil. In: XX Congresso Brasileiro de Meteorologia (XX CBMET), 2018, Maceió. Acceso <https://docplayer.com.br/147737732-Xx-cbmet-anais-congresso-brasileiro-de-meteorologia-27-a-30-de-novembro-de-2018-maceio-al-desafios-do-monitoramento-meteorologico.html>
- Sarazola, I., A. Laguarda, J.C. Ceballos, R.A. Suárez 2023. Benchmarking of modeled solar irradiation data in Uruguay at a daily time scale. *Journal of IEEE Latin America Transactions*, 21:1040-1048. <https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/8026/2085>

USING THE SATELLITE-BASED MODEL GL 1.2 ON A DAILY SCALE AS A REFERENCE FOR PROVISIONAL CALIBRATION OF THE EEAOC – TUCUMÁN NETWORK

ABSTRACT

In Tucumán, the Estación Experimental Agroindustrial 'Obispo Colombres' (EEAOC) has a network of automatic weather stations with continuous generation of solar irradiance data. In this study, the daily average irradiances of 18 stations (period 2017-2021) are compared with values obtained from the GL1.2 satellite model developed by the Division of Satellites and Environmental Sensors (DISSM/CGCT/INPE, Brazil). This model has already shown good performance in comparison with data from Kipp & Zonen CM6B and CMP6 pyranometers from the automatic network of INMET (National Institute of Meteorology, Brazil). A preliminary analysis of the quality of GL1.2 was carried on, comparing it with daily data (first semester of 2018) from the INMET network in a relatively homogeneous region of Brazil with a latitude similar to that of Tucumán. A good fit was obtained, leading to the adoption of GL1.2 as the 'reference pyranometer' for a provisional calibration of the daily solarimetric data from the EEAOC network. The results of the statistical measures used to assess the EEAOC vs. GL1.2 linear fit suggest that the satellite model can be used for the provisional calibration of the Tucumán network, with a typical dispersion (standard deviation) of 20 W/m².

Keywords: provisional calibration, model GL 1.2, solarimetric network.