

RADIACIÓN SOLAR EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN: UNA COMPARACIÓN ENTRE VALORES ESTIMADOS POR SATÉLITE Y MEDIDOS POR UNA RED SOLARIMÉTRICA

Juan C. Ceballos*, **César M. Lamelas****, **Jorge D. Forciniti****, **Marcos L. Rodrigues***⁽¹⁾**

Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE), 12630-000 Cachoeira Paulista, Brasil. E-mail: juan.ceballos@cptec.inpe.br, marcos.rodrigues@cptec.inpe.br

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina. Sección Agrometeorología - Avda. William Cross 3150 – CP 4107 – Las Talitas – Tucumán – Argentina. E-mail: agrometeorologia@eeaoc.org.ar

RESUMEN: El modelo GL/CPTEC de estimación de radiación solar utiliza imágenes del satélite GOES (canal VIS) para América del Sur, procesándolas en régimen operacional. Los valores estimados para el área del Noroeste Argentino fueron comparados con medidas realizadas en 17 estaciones de la red de estaciones automáticas de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Los valores diarios de GL en el trimestre octubre-diciembre de 2010 presentan elevada linealidad ($R^2 > 0,93$) al comparar con mediciones de la red. En general, promedios trimestrales difieren en menos de 4% en la llanura tucumana y en la región montañosa, y en 4-7% en la región del pedemonte, cercana a la cadena del Aconquija. La desviación estándar de valores diarios en torno del desvío sistemático es de 20-35 W.m⁻². Los campos de radiación mensual permiten discernir variaciones espaciales significativas en escala de algunas decenas de kilómetros. Son analizadas algunas fuentes de error y métodos de perfeccionamiento.

Palabras clave: radiación solar, Tucumán, satélite GOES, modelo GL, red solarimétrica.

INTRODUCCIÓN

La distribución espacial y el régimen de la radiación solar son importantes en aspectos socioeconómicos diversos, que van desde la estimación de la evapotranspiración en cultivos y de la evaporación en espejos de agua (dependientes del balance de energía superficial), pasando por el diseño apropiado de edificios (en lo concerniente a confort ambiental e iluminación), hasta el aprovechamiento de energía usando colectores solares y dispositivos fotovoltaicos. Clásicamente, la lectura y manutención de una red solarimétrica extensa y densa constituyó una fuerte limitación para la construcción de cartas climáticas de radiación solar. El esfuerzo de combinación de mediciones piranométricas y heliográficas permitió publicar en los últimos años varios atlas y estudios regionales en América del Sur; sin agotar la lista, pueden citarse los de Tiba (2001) para Brasil; Roriz y dos Santos (2005) para Sudamérica; Grossi Gallegos y Righini (2007) para Argentina; Abal et al. (2010) para Uruguay.

Los modelos de estimación de radiación solar por satélite permiten (potencialmente) el monitoreo de esa variable sobre grandes extensiones, en localidades inaccesibles o de difícil manutención de estaciones, y con una resolución espacial mayor que la de una red solarimétrica. Al mismo tiempo, precisan de ésta para evaluar el error de estimación por comparación con mediciones en diversos puntos de una región. Recíprocamente, esta comparación puede ser útil para detectar comportamientos anómalos de estaciones y monitorear la manutención y calidad de sus mediciones. La recopilación de series extensas de imágenes es la base para generar atlas de radiación solar basados en información satelital del GOES Imager, canal visible (ejemplo: Pereira et al., 2006, utilizando el modelo Brasil-SR). El modelo GL/CPTEC de estimativa satelital utiliza el mismo tipo de imagen, es ejecutado operacionalmente en el CPTEC/INPE y genera archivos binarios en proyección geográfica regular para América del Sur y áreas oceánicas vecinas, hasta la latitud de 50°S, con resolución espacial constante de 0,04° en latitud y longitud. Mapas diarios y mensuales de irradiación pueden encontrarse en la dirección internet <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>, incluyendo la opción para bajar un archivo con 11 años de radiación solar estimada por el modelo para América del Sur. La descripción completa del modelo se encuentra en Ceballos et al. (2004). Ceballos y Bottino (2006) describen algunos aspectos de la coherencia entre los campos de radiación solar obtenidos por el modelo GL, el modelo Brasil-SR y la compilación realizada por Tiba.

En la última década, las posibilidades de comparación entre modelos satelitales y mediciones de superficie han aumentado considerablemente. Refiriéndonos apenas a la posibilidad de acceso internet a la información, dos grandes redes de estaciones fueron instaladas en el Brasil: para acceso a datos, ver por ejemplo INMET - Instituto Nacional de Meteorología (<http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>) y SINDA – Sistema Nacional de Dados Ambientais (<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>). También en Brasil, un valioso conjunto de datos de radiación solar y terrestre es generado por las redes SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (<http://sonda.ccst.inpe.br/>). Adicionalmente, estaciones en Brasil y Argentina producen datos en las redes asociadas AERONET (Aerosol Robot Network para detección

¹ (*) Investigador CPTEC/INPE. (**) Sección Agrometeorología, EEAOC. (***) Becario Desarrollo Técnico Institucional, CNPq Brasil.

de aerosol, acceso en <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) y Solrad-Net – Solar Radiation Network (http://solrad-net.gsfc.nasa.gov/data_menu.html). Además de la estación AERONET de Buenos Aires (CEILAP), la Universidad Nacional de Luján publica un monitoreo de la radiación solar ejecutado por GERSolar – Grupo de Estudios de Radiación Solar (<http://www.gersol.unlu.edu.ar/>) así como la distribución mensual de radiación solar en la región pampeana, deducida a partir de esa estación y de una red del INTA y de otras instituciones⁽²⁾. Datos de estas redes son de gran utilidad para evaluar la calidad de estimaciones del modelo GL. Ceballos et al. (2011) elaboraron un primer documento detallado con análisis comparativo entre esas redes y el modelo GL para el trimestre octubre-diciembre 2010. Otros análisis de validación se encuentran en <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/> → Documentação.

Dentro de la región Noroeste de Argentina, específicamente en la provincia de Tucumán, una red de 20 estaciones de la EEAOC - Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres” ofrece un importante conjunto de mediciones. La EEAOC (página internet www.eeaoc.org.ar) es una de las instituciones más antiguas del país dedicada a la investigación aplicada y al desarrollo y transferencia de tecnología, con 102 años de vida, y sede central vecina a la ciudad de San Miguel de Tucumán. En ella se han realizado observaciones meteorológicas desde prácticamente sus inicios; sin embargo, es a partir de 1970 que posee una Sección Agrometeorología, cuyo propósito es generar información meteorológica y realizar investigaciones en lo referente a la relación entre la producción agropecuaria y el clima. La automatización de los registros meteorológicos comenzó en 1994 y luego de diversas etapas evolutivas se llegó a instalar y operar una red de 20 estaciones meteorológicas automáticas telesupervisadas, que permite obtener información en tiempo real (Pascale y Lamelas, 2009). A fines del año 2005 comenzó la instalación de estaciones que permitan medir más variables meteorológicas, entre ellas la radiación solar global. En este caso, se trata de solarímetros fotovoltaicos con sensores de fotodiodo de silicio (Grossi Gallegos y Righini, 2007) que miden en la banda espectral de 300 a 1100 nm, incorporados en las estaciones Vantage Pro de Davis. La precisión declarada de los instrumentos es de 5%. El acceso a datos meteorológicos puede realizarse en la dirección de internet <http://www.meteaoc.org/>.

El presente trabajo analiza el ajuste del modelo GL con mediciones de la red EEAOC durante el último trimestre de 2010. Los resultados son preliminares, y constituyen un primer paso para la evaluación de la serie temporal de las dos variables en la región Noroeste.

DATOS UTILIZADOS

El trimestre octubre-diciembre de 2010 fue adoptado para una comparación preliminar entre la radiación solar medida y las estimaciones del modelo satelital GL. Diecisiete estaciones de la red EEAOC disponían de datos de radiación solar global (irradiancia media diaria, en $W.m^{-2}$); su distribución geográfica es ilustrada por la Figura 1. La mayoría de ellas se encuentra en el pedemonte (Tabla 1, estaciones 1, 5, 8, 10, 14 y 16) y la llanura tucumana (estaciones 2, 3, 4, 6, 9, 12 y 13) en altitudes entre 300 y 490 metros (al este de la línea negra, indicadora de altitud de 1000 m). Dos estaciones (7 y 15) están en Santiago del Estero, vecinas a Tucumán. Otras dos (11 y 17) se sitúan en la región montañosa en 1900 y casi 2300 m de altitud, respectivamente. La estación Javicho (7) presentó numerosos valores anormalmente altos (fueron rechazados los superiores a $400 W.m^{-2}$). Monte Toro (13) no tenía datos para los primeros 39 días del trimestre.

El modelo GL está definido para un área de 1800×1800 píxeles (elementos de imagen) con resolución de $0,04^\circ$, aunque cada píxel representa el promedio de 3×3 elementos de cuadrícula. Fueron extraídos los valores diarios de GL para los píxeles correspondientes a las 17 estaciones. El procesamiento general de datos se realizó con ayuda de programas MatLab y planillas Excel.

El valor de irradiancia media utilizado en este trabajo se calcula como irradiación diaria (en $J.m^{-2}$) dividida en 86400 segundos (duración del día, no del período diurno). Esta magnitud es especialmente útil para estudios climatológicos y evaluación de balance diario de energía (donde la cantidad en estudio es la evaporación o evapotranspiración diaria). Para uso en ingeniería, una irradiancia de $100 W.m^{-2}$ (promedio diario) corresponde a una irradiación diaria de $2,4 kWh.m^{-2}$.

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta las coordenadas geográficas y altitud en la red, y los primeros resultados de una comparación: promedios $\langle G \rangle$ de las mediciones y $\langle GL \rangle$ del modelo, y la diferencia porcentual entre este y aquel, o sea $Dif\% = 100 * (\langle GL \rangle - \langle G \rangle) / \langle G \rangle$. Valores típicos del promedio son $\langle G \rangle \sim 250-260 W.m^{-2}$ o sea $6-6,25 kWh.m^{-2}$. Un desvío de 2% representa alrededor de $5 W.m^{-2}$ o $0,12 kWh.m^{-2}$. Se observa que en las estaciones más occidentales de la llanura tucumana, desde Bajastiné hasta La Cruz, las diferencias son pequeñas y negativas, con valor absoluto inferior a 2% (excepto Javicho, con -5,3%).

Las estaciones ubicadas en el pedemonte, más cercanas a la línea de 1000 m de altitud, son habitualmente más influenciadas por circulación regional, con convección generadora de nubosidad y precipitación en la falda de las montañas. Ellas presentan error positivo desde Santa Ana hasta El Colmenar, entre +4% y valores tan elevados como +10% en Santa Ana y Fronterita. Las dos estaciones de montaña tienen comportamientos dispares (-8,5% para Las Nubes y +1,7% para Santa

² Todas las páginas internet mencionadas fueron consultadas en julio de 2011.

Cruz). Es importante observar que promedios en períodos mayores pueden sugerir la apariencia de estimación “exacta” (error medio pequeño) y de hecho presentar dispersión elevada en escalas de tiempo menores.

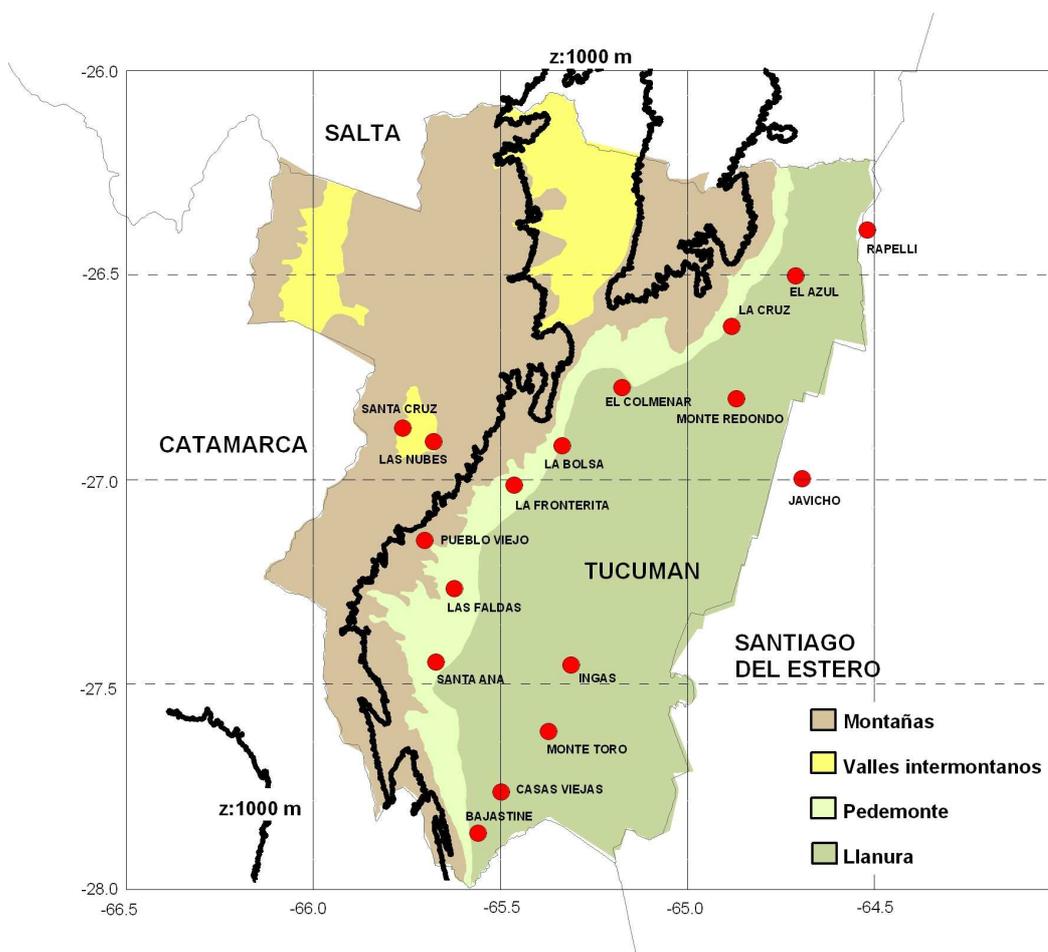


Figura 1: Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas que opera la EEAOC y que cuentan con solarímetros fotovoltaicos. La línea negra delimita la altitud de 1000 metros. (Fuente: SrySIG-EEAOC).

Estación	latitud	longitud	altitud (m)	<G>(medido)	<GL>(satelite)	Dif(%)
1 El Colmenar	-26,7875	-65,1953	482	247	257	3,9
2 Bajastine	-27,8825	-65,5589	471	256	252	-1,4
3 Casas Viejas	-27,7803	-65,5064	383	256	252	-1,7
4 El Azul	-26,4789	-64,6461	446	244	256	4,9
5 Fronterita	-27,0300	-65,4606	399	237	261	10,0
6 Ingas	-27,4489	-65,3514	317	246	269	9,3
7 Javicho	-27,0028	-64,6850	325	270	256	-5,3
8 La Bolsa	-26,9306	-65,3017	394	245	260	6,2
9 La Cruz	-26,6350	-64,8350	491	256	251	-2,0
10 Las Faldas	-27,2833	-65,6094	388	243	255	4,9
11 Las Nubes	-26,9153	-65,6817	1908	254	232	-8,5
12 Monte Redondo	-26,8192	-64,8503	393	257	253	-1,4
13 Monte Toro (*)	-27,6383	-65,3636	309	276	275	-0,5
14 Pueblo Viejo	-27,1975	-65,6183	427	240	256	6,5
15 Rapelli	-26,3956	-64,5042	399	255	259	2,9
16 Santa Ana	-27,4747	-65,6764	389	234	257	9,8
17 Santa Cruz	-26,9078	-65,7658	2279	220	222	1,7

Tabla 1: Red de la EEAOC: promedio trimestral octubre-diciembre 2010 de irradiancia medida (G) y estimada (GL), y desvío porcentual presentado por la estimación. Unidades de irradiancia en $W.m^{-2}$. Para el cálculo de promedios, fueron considerados solamente los días en que existían pares de datos (estación vs. modelo). Monte Toro (indicado con asterisco) carecía de 39 datos de superficie. La altitud es respecto al nivel medio del mar.

La Figura 2 ilustra la relación entre valores medidos y estimados en escala diaria para 6 estaciones. Es evidente una buena linealidad, inclusive para Santa Cruz, pero no para Las Nubes. La Tabla 2 cuantifica la calidad de las estimaciones: el coeficiente de determinación es superior a $R^2=0,935$ excepto para Javicho ($R^2= 0,780$) y Las Nubes ($R^2=0,887$). En el primer caso, ya fue observado que la serie de datos contiene valores con errores evidentes. Las Nubes presenta valores claramente superiores a las estimaciones para valores $150 < GL < 300 \text{ W.m}^{-2}$, típicos de nubosidad parcial. La serie de datos medidos deberá ser analizada críticamente, ya que la estación Santa Cruz (situada en la misma región montañosa) exhibe un ajuste de buena calidad ($R^2= 0,9371$).

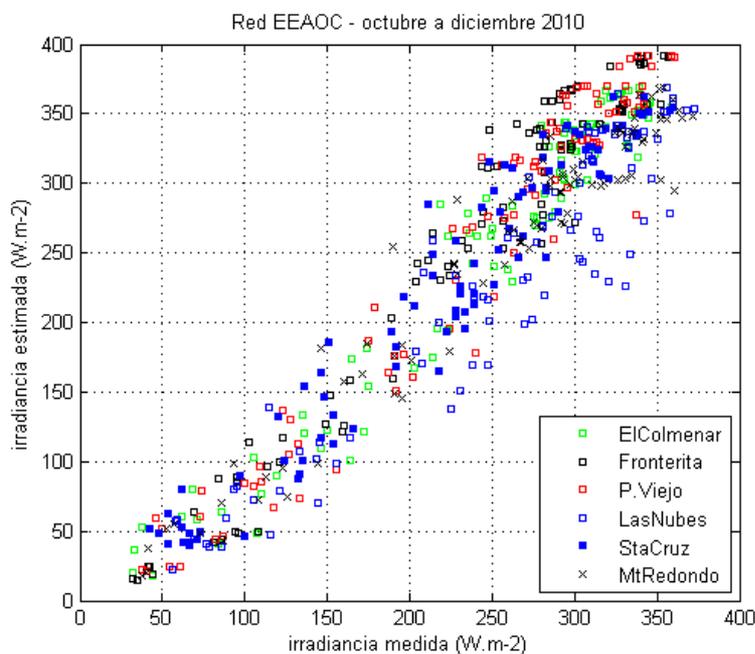


Figura 2: Valores diarios GL vs. G para el trimestre octubre-diciembre 2010. Son consideradas 6 estaciones.

Estación	altitud (m)	a	b	R^2	desvío estándar	desvío DQM
1 El Colmenar	482	1,16	-31	0,9487	28	29
2 Bajastiné	471	1,08	-25	0,9580	21	21
3 Casas Viejas	383	1,11	-33	0,9703	20	21
4 El Azul	446	1,15	-24	0,9504	24	27
5 Fronterita	399	1,26	-38	0,9535	35	42
6 Ingas	317	1,21	-30	0,9509	28	36
7 Javicho *	325	0,90	+3	0,7805	=	=
8 La Bolsa	394	1,24	-43	0,9405	34	37
9 La Cruz	491	1,12	-35	0,9583	23	24
10 Las Faldas	388	1,26	-51	0,9649	31	34
11 Las Nubes **	1908	1,05	-36	0,8866	34	41
12 Monte Redondo	393	1,04	-15	0,9446	23	24
13 Monte Toro	309	1,13	-38	0,9522	26	26
14 Pueblo Viejo	427	1,23	-40	0,9428	35	38
15 Rapelli	399	1,10	-22	0,9414	23	23
16 Santa Ana	389	1,27	-40	0,9403	34	41
17 Santa Cruz	2279	1,11	-22	0,9371	28	28

Tabla 2: Regresión lineal de los valores diarios GL con relación a G ($GL = a G + b$). DQM es el desvío cuadrático medio, definido en la ecuación (1). Las unidades de DQM y del desvío estándar son W.m^{-2} .

La Tabla 2 indica el desvío estándar S observado para el trimestre. Los valores oscilan entre 20 y 35 W.m^{-2} . Esto permite describir los errores de estimación como la composición de un error sistemático E (Tabla 1) y de una dispersión del orden de S en torno de él. Estos parámetros parecen más ilustrativos que el desvío cuadrático medio (DQM), estimado como

$$DQM^2 = \langle (GL - G)^2 \rangle = E^2 + S^2. \quad (1)$$

Se percibe que en general $S \sim \text{DQM}$, indicativo de que la dispersión estadística de las estimaciones es mayor que los errores sistemáticos. Si se considera que el error medio E es apenas un estimador estadístico y que S/\sqrt{N} (N = número de datos) es un estimador de su desvío estándar, entonces puede decirse que, en general, el error sistemático del modelo en el trimestre estudiado viene dado por la Tabla 1 y que este error tiene una dispersión esperada en torno de $2-4 \text{ W.m}^{-2}$.

La Tabla 2 también presenta los coeficientes de la interpolación lineal $GL = a G + b$ para cada estación. Excluyendo Las Nubes y Javicho, el valor medio de los coeficientes a y b indica una aproximación lineal genérica $GL = 1,16 G - 32$, con desviaciones estándar de a y b iguales a $Sa = 0,07$ y $Sb = 9,6$ respectivamente. Dada esta medida relativamente baja de dispersión, es evidente que el estimador GL tiende a anularse antes que la propia radiación solar G (en condiciones de nubosidad espesa), y que para una irradiancia elevada $G = 350 \text{ W.m}^{-2}$ (típica de días sin nubes) produce valores sobrestimados $GL = 374 \text{ W.m}^{-2}$.

Para analizar brevemente algunas fuentes de error del estimador GL , es importante observar que el modelo describe la radiación solar en dos intervalos espectrales, y que el algoritmo simplificado puede reducirse a las expresiones siguientes (Ceballos et al., 2004):

$$\text{Intervalo UV-VIS (0,3-0,7 }\mu\text{m):} \quad \mu_0 \text{ Svis. } T3(\mu_0) = (1 - R_{\text{svis}}) GL_{\text{vis}} + \text{Abs} + R_p / T3(\mu_{\text{sat}}) \quad (2)$$

$$\text{Intervalo infrarrojo solar (0,7-4 }\mu\text{m):} \quad \mu_0 (\text{Sir} - \Delta\text{Sir}) \cdot (1 - C) = GL_{\text{ir}} \quad (3)$$

$$\text{Radiación solar en la superficie:} \quad GL = GL_{\text{vis}} + GL_{\text{ir}}. \quad (4)$$

En estas expresiones, S_{vis} y S_{ir} se refieren a las componentes de la constante solar S (irradiancia a incidencia normal en el tope de la atmósfera); $\mu = \cos Z$, siendo Z ángulo cenital (Z_0 para incidencia de rayos solares, Z_s para salida en la dirección del satélite); $T3$ = transmitancia por ozono en la estratosfera; R_{svis} = reflectancia de la superficie; Abs = absorción en la troposfera; R_p = reflectancia planetaria observada en el canal VIS del satélite geoestacionario; ΔSir = absorción de la radiación directa por vapor de agua y dióxido de carbono; C = nubosidad (área relativa cubierta por nubes en el *pixel* observado). La ecuación (2) simplemente expresa un balance de radiación en la troposfera: a pesar de la complejidad de los procesos de dispersión de radiación solar en la atmósfera, la irradiancia que llega a la tropósfera simplemente es absorbida en el suelo o en la atmósfera, o retorna al espacio como radiación reflejada. Considerase $\text{Abs} = 0$, ya que las nubes absorben en el infrarrojo solar y el aerosol normalmente presente en la atmósfera es de baja absorción. La ecuación (3) supone que una nube tiene baja transmitancia en el infrarrojo, debido a su alta reflectancia y a la fuerte extinción por bandas de absorción de vapor de agua y dióxido de carbono. Así, la radiación directa en este intervalo espectral llegando a la superficie sólo consiguió pasar a través de un área fraccional $1-C$ libre de nube, y no fue dispersada sino parcialmente absorbida. La ecuación (4) simplemente suma las contribuciones de la irradiancia modelada GL .

En las ecuaciones (2) a (4), algunas fuentes de error pueden ser previstas. Por ejemplo,

1) El agua precipitable o columna vertical de vapor prevista por el modelo es constante, $w_2 = 2 \text{ g.cm}^{-2}$ (cuando puede tener variaciones regionales). Entre octubre y diciembre, w_2 podría tener valores superiores y la radiación solar medida en días de cielo claro sería menor que la estimada por el modelo. Este es un fenómeno observado en la Figura 2.

2) La versión 1.2 del modelo considera una reflectancia constante conservada en el visible para cielo claro, $R_p(\text{mínima}) = 0,09$. Este valor es utilizado como referencia para evaluar el área C cubierta por nubes, y es típico de superficies vegetales. Una reflectancia elevada del suelo puede inducir una sobrestimación de la nubosidad, y por lo tanto una disminución de la irradiancia estimada en la ecuación (3). Las Figuras 3 a 6 sirven para ilustrar este efecto. En la Figura 3, los valores inferiores de $\langle GL \rangle$ en la región montañosa tucumana son plausibles; en la transición llanura-montaña se registra formación frecuente de nubes convectivas y mayor pluviosidad. En cambio, del otro lado del cordón montañoso el clima es de tipo semiárido o de alta montaña (con escasez de nubes) y con alta reflectancia de superficie (como es evidente en la imagen satelital compuesta de la Figura 4). El resultado inducido en el estimador GL es de nubosidad con reducción (aparente) de la radiación $\langle G \rangle$. En la Figura 5 pueden observarse diversos ejemplos de este efecto. En la región árida de montaña, en Chile y en Santiago del Estero existen salinas o "salares" con alta reflectancia, que inducen una subestimación de $\langle G \rangle$ cuando el resto de la región tiene valores elevados de irradiancia. Al mismo tiempo, la nubosidad real en el contrafuerte de los Andes extendiéndose desde Tucumán a Jujuy (inducida por circulación en escala continental, proveniente de Amazonia) es correctamente detectada por el modelo.

3) Para conjuntos de nubes convectivas con gran desarrollo vertical (tormentas de verano, por ejemplo), la reflectancia no es isotrópica y la visión desde un satélite puede no evaluar correctamente la irradiancia reflejada localmente. También puede sobrestimar la nubosidad por efecto de ocultación/sobreposición entre las nubes, si el ángulo cenital Z_s de visión es relativamente elevado (desde el área tucumana, $Z_s \sim 32^\circ$). Por otro lado, el valor estimado de la reflectancia depende también de la correcta calibración del canal VIS (no monitoreada internamente en los satélites GOES). Observando los valores mínimos de G , el efecto global de estas limitaciones parece inducir un error sistemático del orden 0 a -25 W.m^{-2} en el conjunto de estaciones estudiadas.

4) La quema de cañaverales y de otros tipos de vegetación puede producir humareda con profundidad óptica considerable. Dado que el modelo no considera efectos de aerosol, puede sobrestimar parcialmente la irradiancia. En principio, este efecto sería más notable en las faldas de la región montañosa. De hecho, las estaciones con mayor desvío positivo de encuentran en esa región.

5) Sin agotar la lista de posibilidades, la propia calibración de las estaciones debe ser observada. En este trabajo no hubo un análisis específico de este punto. De cualquier forma, dos estaciones evidenciaron comportamiento irregular (Javicho y Las Nubes).

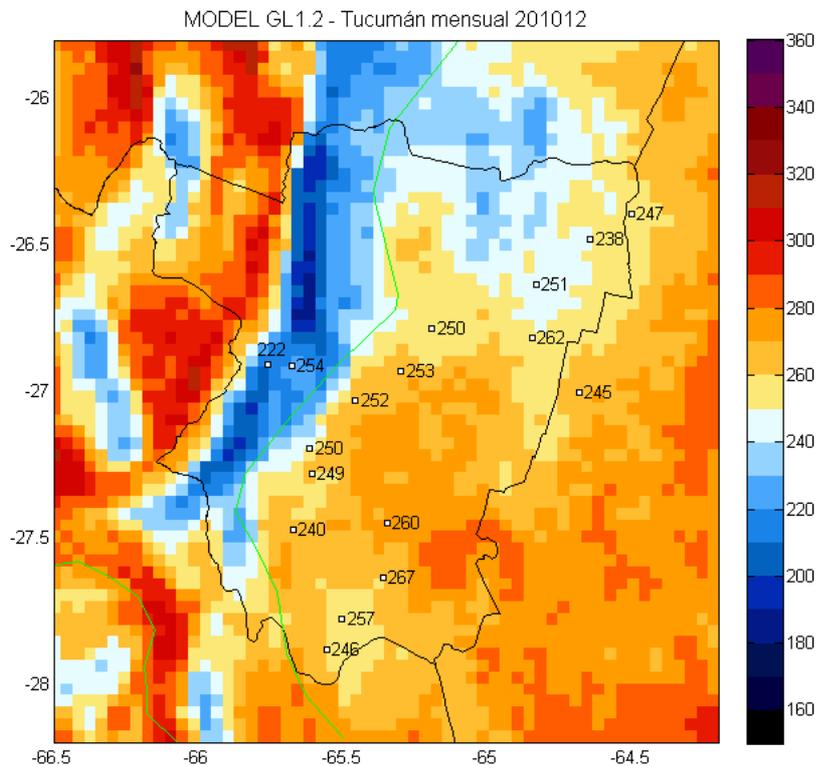


Figura 3: Distribución de radiación solar diaria (promedio en el mes de diciembre de 2010). Área: provincia de Tucumán. Resolución 0,04° × 0,04°. La línea verde delimita la altitud de 1000 m. Los números informan el promedio mensual medido en la red de la EEAO. Unidades: W.m⁻².

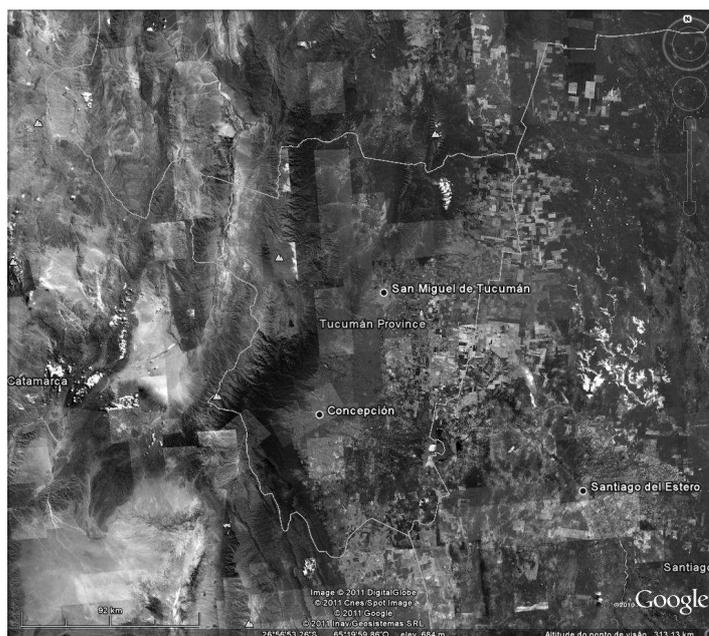


Figura 4: Composición de imágenes satelitales para el área de la provincia de Tucumán (fuente: Google Earth). La región catamarqueña de alto brillo del suelo puede inducir estimaciones con error en el modelo GL (induce efecto de nubosidad aparente). Esta situación no se registra en la región montañosa tucumana.

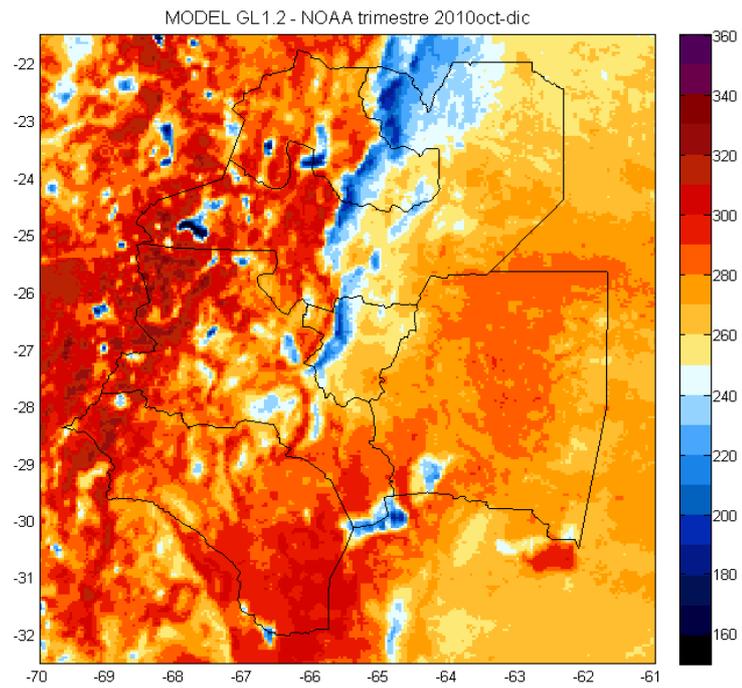


Figura 5: Distribución de radiación solar diaria (promedio en el trimestre octubre-diciembre 2010). Area: Noroeste argentino. La resolución espacial del archivo original es de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ (aproximadamente 4×4 km).

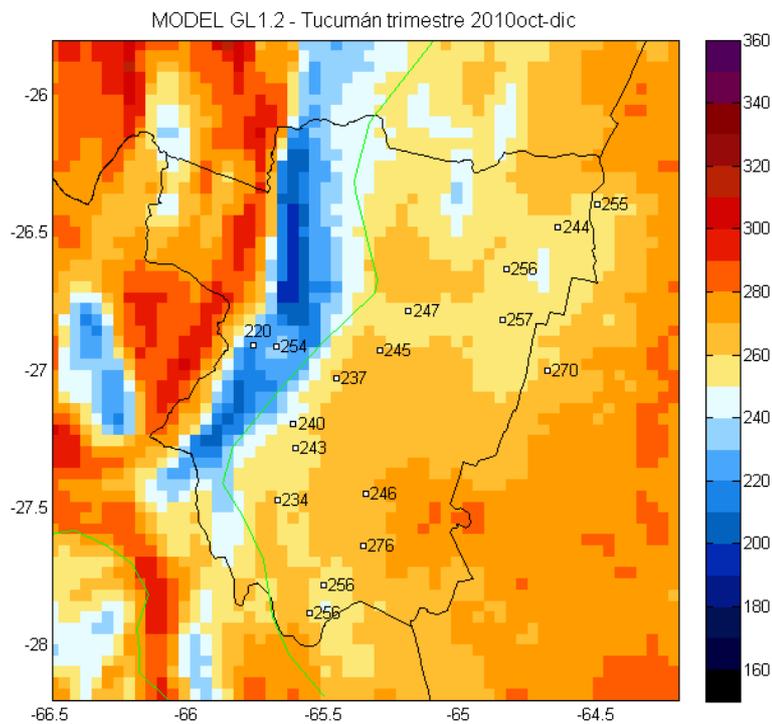


Figura 6: Distribución de radiación solar diaria (promedio en el trimestre octubre-diciembre de 2010). Area: provincia de Tucumán. Resolución $0,04^\circ \times 0,04^\circ$. La línea verde delimita la altitud de 1000 m. Los números informan el promedio trimestral medido en la red de la EEAOC.

Un elemento adicional de análisis comparativo es ofrecido por los campos mensual y trimestral de radiación estimada, que permiten juzgar la coherencia entre la distribución regional de <GL> y los valores <G> registrados por las estaciones. Con las limitaciones apuntadas previamente, las Figuras 3 y 6 colocan en evidencia que las mediciones de la red EEAOC y el modelo GL versión 1.2 siguen la misma lógica de distribución regional. En la llanura, los valores de <GL> son del orden de 240-260 W.m⁻²; los desvíos medios entre estimación y medida se sitúan en general dentro de 10 W.m⁻² (menos de 4%) para las estaciones del este tucumano, y entre 10 y 20 W.m⁻² (4-8%) en la falda del Aconquija. En la montaña, Santa Cruz presenta excelente concordancia, sugiriendo que el solarímetro en Las Nubes debe ser observado.

CONCLUSIÓN

Aunque limitada a un trimestre, la comparación entre el modelo GL versión 1.2 y las mediciones de la EEAOC comprende un conjunto de 1500 pares de datos en el rango 30-350 W.m⁻² (0,7 a 8,5 kWh.m⁻²), en 17 localidades distribuidas en tres entornos geográficos. El desvío medio del modelo es inferior a 4% en la llanura tucumana y entre 4 y 8% en la región más húmeda del pedemonte, próxima a la cadena montañosa y sujeta a lluvias originadas en sistemas convectivos. El modelo rescata variaciones de irradiancia media en la escala de algunas decenas de kilómetros (como la consecuente de nubosidad en la región montañosa). La dispersión de diferencias entre modelo y medida tiene desviación estándar del orden de 20-35 W.m⁻² (0,5 a 0,84 kWh.m⁻²), lo que delimita la esperanza matemática del desvío a una fluctuación dentro de 2-4 W.m⁻² durante el trimestre considerado.

El modelo puede ser perfeccionado fácilmente considerándose el agua precipitable real (extraída de modelos de circulación atmosférica como el del CPTEC/INPE) e introduciendo cartas de reflectancia mínima (ya construidas y accesibles en internet, o especialmente elaboradas a partir de las imágenes GOES). Los dos procesos inducirían mejor estimación de radiación en condiciones próximas a la de cielo claro, para todo tipo de superficie (líquida, suelo vegetado o semiárido, salar). La línea de estaciones cercanas a la falda montañosa merece especial atención, en lo concerniente a discernir si la diferencia entre modelo y medida se origina en la descripción física de sistemas convectivos, en condiciones de turbidez atmosférica o en características de los instrumentos de medición. Por un lado, las medidas de la red EEAOC constituyen una valiosa fuente de información para ajustar las parametrizaciones físicas del modelo GL. Este tipo de estudio deberá extenderse para series temporales más largas. Recíprocamente, el modelo permite describir la variación espacial de la irradiación diaria con pormenores que una red solarimétrica no puede asumir. Los resultados del presente trabajo sugieren que el modelo puede alcanzar precisión semejante al orden de incerteza de los instrumentos (5%) para valores medios mensuales, si algunos parámetros físicos básicos son ajustados. Se espera que la dispersión de desvíos diarios (desviación estándar de la diferencia entre valores estimados y medidos) pueda reducirse a niveles inferiores a 20 W.m⁻² (0,5 kWh.m⁻²).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abal G., D'Angelo M., Cataldo J. y Gutiérrez A. (2010). Mapa Solar del Uruguay. Versión 1.0. Memoria Técnica. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. 61 pp. Accesible en <http://www.fing.edu.uy/if/solar/>
- Ceballos, J.C., Bottino M.J. y Souza J.M. de (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES-E imagery. *J. Geophys. Res.*, v. 109, D02211, doi: 10.1029/2003JD003531.
- Ceballos, J. C. y Bottino, M. J. (2006). Solar radiation in South America, period 1998-2004: Some aspects of a satellite-based data base. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis, SC, Brasil. Anais. (CD-ROM). Disponible em dirección internet <http://www.cbmet.com/>.
- Ceballos, J.C., Rodrigues M.L. y Oliveira L.M. de (2011). Desempenho do modelo GL versão 1.2. Época: outubro 2010-dezembro 2010. Relatório Técnico 01/11-RST-DSA, 18 pp.+anexo. Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, DSA/CPTEC/INPE, Cachoeira Paulista, SP, Brasil. Acceso internet <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/> → Documentação.
- Grossi Gallegos, H., R. Righini (2007). Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y Secretaría de Ciencia y tecnología, Buenos Aires, Argentina. 74 pp + 1 CD-ROM. ISBN 978-987-9285-36-7.
- Pascale A.J. y Lamelas C.M. (2009). 25 años de labor agrometeorológica en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres – Tucumán – Argentina. *Rev. Facultad de Agronomía UBA*, 29(2):81-136.
- Pereira E.B., Ramos Martins F., Luna de Abreu S. y Rütther R. (2006). Atlas brasileiro de energía solar. INPE, São José dos Campos, Brasil. 60 pp.
- Roriz, M. y dos Santos, J.C.P. (2005). Solar irradiance mapping for South America (en portugués). In: IV Congreso Latinoamericano sobre Confort y Comportamiento Térmico de las Edificaciones - Ciudad de México, mayo del 2005. Accesible en http://www.ppgciv.ufscar.br/arquivos/File/roriz_artigos/Roriz03.pdf.
- Tiba, Ch., Coordinador (2001). Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. Editora Universitária da UFPE, Universidad Federal da Pernambuco, Recife, PE, Brasil. 111 pp.

ABSTRACT: Model GL/CPTEC assesses solar irradiance using GOES-VIS imagery for South America, being run in a operational scheme. Resultant GL values for Argentine Northwest region were compared with measurements at 17 automatic stations operated by Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Daily GL values during three-month period October-December 2010 exhibit high linearity ($R^2 > 0.93$) when compared with EEAOC network. Three-month mean values differ from EEAOC means by less than 4% over eastern Tucumán and by 4-7% nearby mountainous Aconquija slope. Standard deviation of daily values around mean deviation is about 20-35 W.m⁻². Monthly mean fields allow discern for space variability meaningful in a several ten-kilometers scale. Some error sources and quality improvements are analyzed.

Keywords: solar radiation, Tucumán, GOES satellite, GL model, solarimetric network.