

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL RÉGIMEN DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN EL NOROESTE ARGENTINO, PERÍODO 2017-2021

Juan C. Ceballos¹, Jorge D. Forciniti², Maria 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 N° 9 (4101) Las Talitas – Tucumán – Argentina

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

RESUMEN: El modelo satelital GL1.2 evalúa irradiancia solar global con alta resolución espacial y error relativamente reducido al considerar promedios mensuales. En este trabajo es aplicado a la región Noroeste de Argentina en el quinquenio 2017-2021 para describir detalles del régimen regional de radiación solar difícilmente discernibles por la poco densa red de solarimetría. El análisis en componentes principales (ACP) muestra que la primera componente (CP1) describe la serie temporal normalizada de 5 años con más de 70% de contribución a la variancia local, excepto en la transición llanura-montaña (piedemonte). En esa región, las componentes CP2 a CP5 acumuladas responden por 95% de la variancia regional. En términos generales, la secuencia normalizada de irradiancia media mensual es adecuadamente descripta por las cinco primeras CPs en toda la región. Los resultados implican en que un número reducido de archivos digitales puede ser utilizado para describir la serie temporal de promedios mensuales con resolución espacial de 0,04° y errores de estimación del orden de 20% del desvío estándar de la serie, o sea, unos 12 W m⁻².

Palabras clave: radiación solar, estimación satelital, modelo GL 1.2, Noroeste Argentino, componentes principales

INTRODUCCIÓN

La distribución de irradiancia solar media en el Noroeste de Argentina al norte de 32°S y al oeste 61°W (una región con aproximadamente 550.000 km²) se conoce apenas a grandes rasgos, basada en datos de una red con 10 piranómetros regionales complementados con heliógrafos en el final del siglo 20 (Grossi Gallegos y Righini, 2007). Puede mencionarse, también, un atlas basado en imágenes satelitales de baja frecuencia y resolución espacial de 1° (Carmona et al., 2018). Aparentemente habría la doble limitación de datos satelitales de baja resolución y de escasos datos de “verdad terrestre” para validación. Sin embargo, tratándose de datos solarimétricos en la última década, cabe mencionar que la Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres” (EEAOC) con sede en Las Talitas, Tucumán dispone de una red de 30 estaciones meteorológicas automáticas que incluyen medición y transmisión de datos de radiación solar (Lamelas et al., 2006). Por otro lado, la DISSM/CGCT/INPE procesa operativamente el modelo GL versión 1.2 generando estimaciones para América del Sur, basado en imágenes de satélite geoestacionario GOES (Ceballos et al., 2004). Los datos producidos son irradiancia global a cada media hora con resolución espacial de 0,04° (aproximadamente 4 km), con integración diaria y mensual. La comparación con datos de redes solarimétricas mostró que la

serie de valores mensuales satelitales presenta sesgos y desvíos estándar típicos 3 a 14 $W m^{-2}$ y 8 a 15 $W m^{-2}$ respectivamente sobre Brasil en 2016 (Porfirio et al., 2020), y de 5 a -10 $W m^{-2}$ y 7 a 14 $W m^{-2}$ respectivamente en la Pampa Húmeda argentina en el período 2011-2017 (Ceballos et al., 2022). Para datos diarios en estaciones de la EEAOC en la provincia de Tucumán, en 2010 fue observada elevada linealidad con sesgo inferior a 10% (en valor absoluto) del promedio medido $\langle G \rangle$, y desvío estándar 20-30 $W m^{-2}$ (Ceballos et al., 2011); en 2020, el sesgo observado en 5 estaciones va de 6% a 18%; corregida la tendencia, el desvío estándar continua siendo 20-30 $W m^{-2}$ o sea alrededor de 10-15% de un valor típico $\langle G \rangle = 200 W m^{-2}$ (Forciniti, 2022, comunicación personal). Estas características sugieren la validez de uso del modelo GL 1.2 para describir la distribución regional de radiación solar en alta resolución (en torno de 4 km). Este trabajo realiza una primera exploración del comportamiento espacial y temporal de la radiación solar sobre el Noroeste Argentino (NOA), utilizando una serie temporal de irradiancia media mensual y aplicando la técnica de Análisis en Componentes Principales (ACP), la cual puede indicar: 1) cuántas subregiones características se encuentran en la región (análisis factorial); 2) el comportamiento temporal asociado a esas regiones (componentes principales CPs); 3) cómo se distribuye la asociación estadística (correlación o carga factorial f) con las CPs; 4) calidad de la reproducción de series temporales de GL a partir de un número limitado de comportamientos principales.

DATOS Y METODOLOGÍA

Fue utilizada la serie temporal de 2017-2021 (60 archivos de promedio mensual) del modelo satelital GL1.2 con resolución espacial de $0,04^\circ$, delimitando la región de estudio entre $69,6^\circ W$ y $61^\circ W$ en longitud, y $32^\circ S$ a $21^\circ S$ en latitud (276×216 pixels con 60 meses de información). La Fig. 1 ilustra la topografía de la región y la reflectancia mínima (escala: 0 a 1) observada por el sensor ABI-GOES 16 en el canal VIS (centrado en $0,64 \mu m$), para el mes de octubre de 2018 y 2019. El nivel $R=0,18$ está delineado en rojo. Tanto la imagen “true color” como la monocromática colocan en evidencia: 1) la llanura oriental con reflectancia $R \approx 0,10$; 2) región de piedemonte con vegetación densa del lado oriental de la sierra ($R < 0,06$); 3) región montañosa semiárida y árida con reflectancia mayor; 4) salinas con $R > 0,20$.

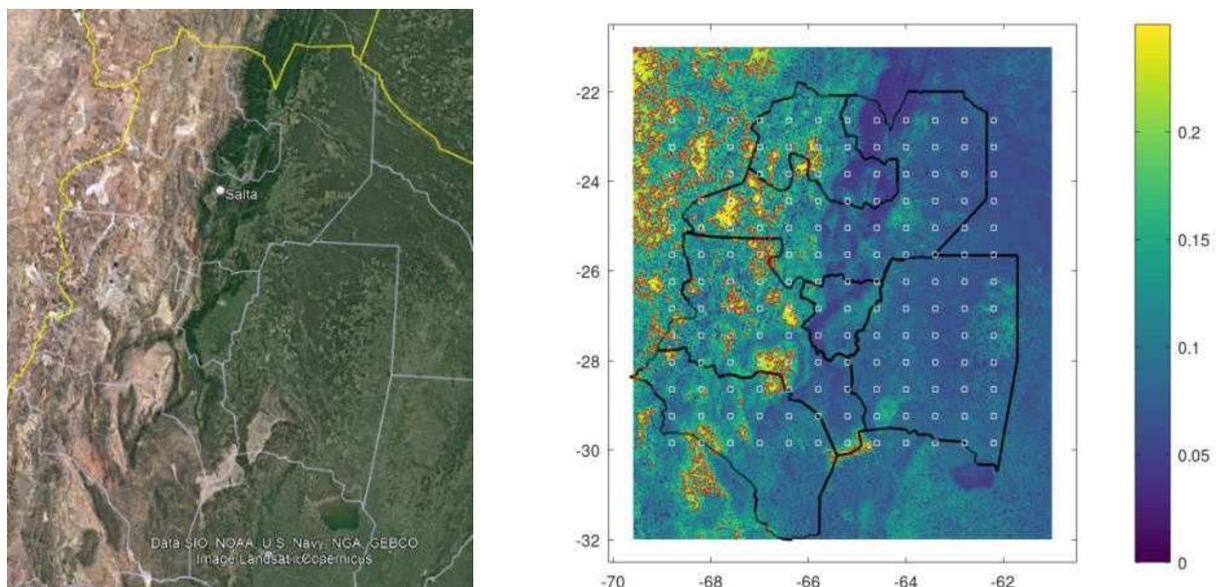


Figura 1. Topografía del Noroeste Argentino (fuente: Google Earth Pro), y reflectancia mínima (unidad: fracción 0 a 1) observada por el canal visible del sensor ABI-GOES 16, octubre 2018 y 2019. Están indicados en blanco los locales de muestreo para análisis en componentes principales.

Grossi Gallegos y Lopardo (1998) mostraron que en una región homogénea como la Pampa Húmeda una distancia de 150 km sería necesaria para afirmar a 90% de confianza que existe diferencia

significativa entre promedios mensuales de dos piranómetros usuales. Para obtener los primeros parámetros del ACP, fue realizado un muestreo más denso a cada 15 pixels (en torno de 60 km) definiendo una matriz de datos \mathbf{G} (156 puntos \times 60 meses). Los datos de la matriz \mathbf{G} son suministrados por el modelo GL. La Fig. 1 ilustra la posición geográfica de los puntos, que pueden considerarse como $N=156$ “sitios virtuales” con $T=60$ datos. Es importante notar que, además de comprometer el procesamiento numérico, un muestreo aún más denso en esa escala temporal no contribuye a sumar detalles en el resultado final.

Los datos de la matriz $\mathbf{G}(N \times T)$ son suministrados por el modelo GL. Son T vectores multidimensionales $\mathbf{X}(t)$ en un sistema de N direcciones ortogonales $\{\mathbf{e}\}$, o una “nube” de T puntos en ese hiperespacio. Por conveniencia, serán consideradas las series normalizadas $\mathbf{Y}(t)$, donde

$$\mathbf{Y}(t) = \sum_n y_n(t) \mathbf{e}_n, \quad y_n(t) = (x_n(t) - \langle x_n \rangle) / s_{x_n}. \quad (1)$$

En esta expresión, $\langle x_n \rangle$ y s_{x_n} son el valor medio y el desvío estándar de la n -ésima serie temporal, de manera que $\langle y_n \rangle = 0$, $s_{y_n} = 1$. Es relevante notar que s_{x_n} se refiere a la serie temporal de $x_n(t)$ y contiene información sobre el ciclo anual local y sobre otras fluctuaciones de carácter regional (declinación solar e interacción topografía-meteorología), así como instrumental (calibración, errores).

La propuesta de buscar una dirección preferencial \mathbf{a} en torno de la cual puedan eventualmente orientarse los T vectores, conduce a un problema de mínima distancia euclidiana (Johnson y Wichern, 2007), con solución

$$\mathbf{Q}\mathbf{a} = \lambda\mathbf{a}, \quad (2)$$

En la Ec. (2), $\mathbf{Q}(N \times N)$ es la matriz de correlación de las N series $y_n(t)$, y λ un autovalor de \mathbf{Q} . El hecho es que existen N soluciones de la Ec. (1), eventualmente definiendo N direcciones \mathbf{a}_n o *direcciones principales*. La matriz \mathbf{A} formada por los N vectores \mathbf{a}_n es ortonormal y puede ser utilizada para una rotación de ejes $\{\mathbf{e}\} \rightarrow \{\mathbf{a}\}$, de forma que la matriz $\mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{Z}$, y las variables $z_k(t)$ son *componentes principales* (CPs) de la serie temporal en el nuevo sistema de direcciones principales, con valores temporales medios $\langle z_k \rangle$ nulos y variancias $s_{z_k}^2 = \lambda_k$. Así, las CPs son descriptas por las proyecciones de los vectores $\mathbf{Y}(t)$ sobre los ejes \mathbf{a}_k ; recíprocamente, las variables y_n son construidas por las proyecciones de las CPs sobre los ejes \mathbf{e}_n :

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T, \quad z_k(t) = \sum_n a_{nk} y_n(t), \quad y_n(t) = \sum_k a_{kn} z_k(t). \quad (3)$$

Los autovalores λ_k son la contribución de las CPs $z_k(t)$ a la variancia total del sistema $y_n(t)$ (igual a N). Las CPs normalizadas $\zeta_k(t)$ y los coeficientes de correlación f_{nk} entre las series temporales de los sitios y de las CPs, son evaluados como

$$\zeta_k(t) = z_k(t) / \lambda_k^{1/2}, \quad (4.a)$$

$$f_{nk} = \sum_t y_n(t) \zeta_k(t). \quad (4.b)$$

De allí se deducen dos propiedades fundamentales:

$$y_n(t) = \sum_k f_{nk} \zeta_k(t), \quad (5.a)$$

$$\sum_k f_{nk}^2 = s_{y_n}^2 = 1. \quad (5.b)$$

En la primera, las $y_n(t)$ son descriptas *exactamente* por combinación lineal de las N CPs; en la segunda, los coeficientes f_{nk}^2 indican el peso relativo de la k -ésima CP en la composición de la variancia de la serie temporal del n -ésimo sitio. En otras palabras: dependiendo de la magnitud de los coeficientes f_{nk} , apenas algunas $K \ll N$ CPs podrían ser suficientes para describir la serie de un sitio.

Evaluada la serie temporal $\zeta_k(t)$ de la k-ésima componente principal (no dependiente de la geografía, sino apenas del tiempo), el coeficiente de correlación de ella con un local cualquiera de la región, con serie temporal $x(t)$ con media $\langle x \rangle$ y desvío estándar s_x , puede calcularse mediante las Ecs. (1) y (4.b). Este procedimiento permite crear campos regionales de cargas factoriales f_{*k} para cada CP ζ_k , con definición espacial de $0,04^\circ$. El modelo GL1.2 suministra las series $x(t)$ necesarias. Si fuesen conocidas las cargas factoriales apenas de los puntos de muestreo (valores f_{nk}), la distribución espacial f_{*k} dentro de la región de muestreo puede deducirse por interpolación. Con base en un número relativamente reducido de campos de f_{*k} , la ec. (5.a) permite construir una aproximación a la serie temporal local $y(t)$; incluyendo el valor medio $\langle x \rangle$ y el desvío estándar s_x de la serie temporal local, la serie $x(t)$ es reconstruida. Todo el procesamiento de datos en este trabajo fue realizado con programación en el aplicativo Octave.

RESULTADOS

Distribución geográfica de la irradiancia media. Las Figs. 2 ilustran la distribución geográfica de valores medios $\langle GL \rangle$ y desvíos estándar SGL de los 60 datos mensuales. El valor $\langle GL \rangle$ es representativo del valor medio anual de irradiancia diaria; SGL contiene tanto información sobre el ciclo anual como sobre eventuales fluctuaciones de carácter subregional. La Fig. 3 permite tener una idea de la amplitud del ciclo anual: hasta 200 W m^{-2} en la región occidental montañosa y 125 en la llanura, cayendo para $60\text{-}70 \text{ W m}^{-2}$ en el piedemonte.

Las áreas en blanco corresponden a reflectancia mínima $R \geq 0,18$. Estas áreas pueden no ser adecuadamente representadas por el modelo GL1.2, ya que su estimador de nubosidad (área relativa cubierta por nubes) es

$$C = (R_{vis} - R_{min}) / (R_{max} - R_{min}). \quad (6)$$

El modelo utiliza valores $R_{min} = 0,09$ y $R_{max} = 0,465$ homogéneos, este último correspondiente a la transición entre nubes cumuliformes y estratiformes (Ceballos et al., 2004; Porfirio y Ceballos, 2017). Superficies brillantes como las arenosas y/o salinas inducen una estimación de alta nubosidad y en ellas el modelo subestima la irradiancia. Está en desarrollo una versión GL 1.4 que introduce la distribución geográfica de R_{min} (Fig. 1) y contribuirá a corregir esos desvíos (Porfirio, 2017).

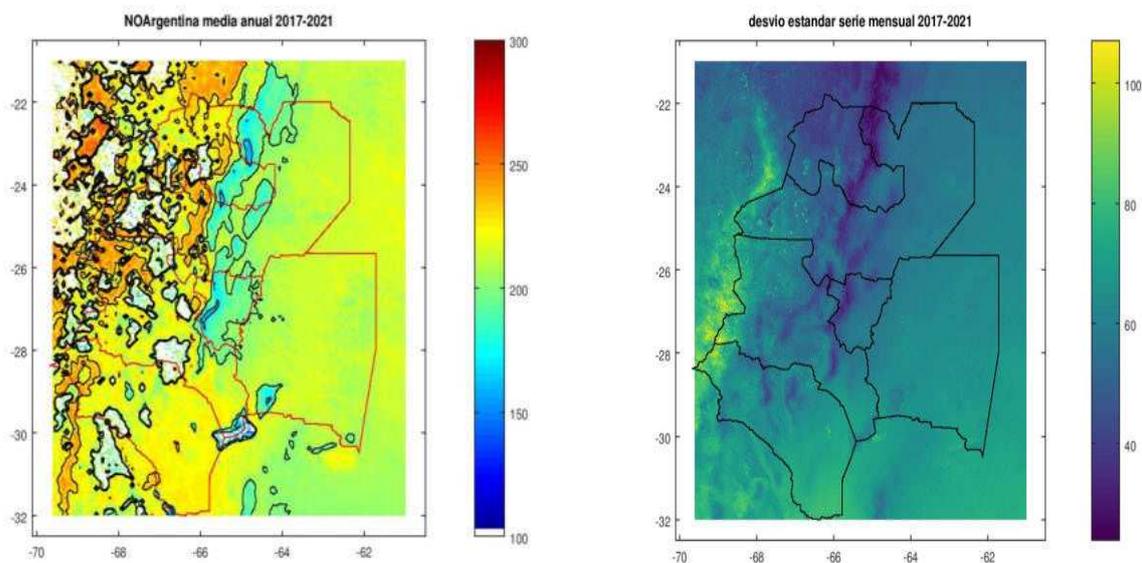


Figura 2. Irradiancia global media y desvío estándar de la serie de 5 años. Se incluyen isolíneas de $140, 170, 200$ y 230 W m^{-2}

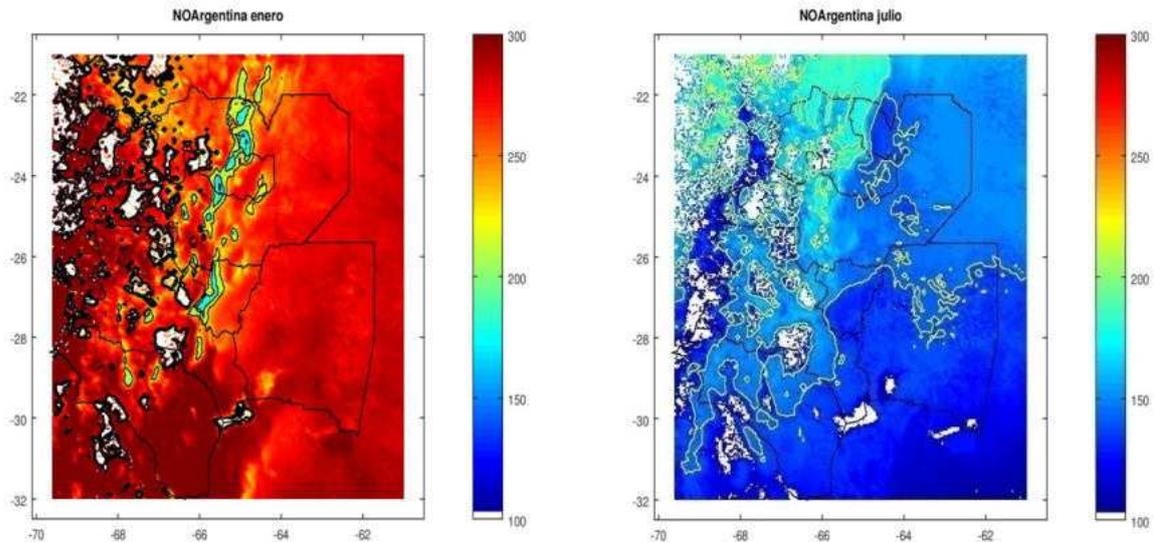


Figura 3. Valores de GL medio en meses extremos (enero: verano y julio: invierno). Se incluyen isolíneas de 140, 170, 200 y 230 $W m^{-2}$

Componentes principales regionales. Para una muestra de $N=156$ sitios, los primeros cinco autovalores de la ACP fueron 136,4; 5,87; 2,98; 2,33; 1,17, acumulando 95.4% de la variancia total (N). Autovalores menores son menos representativos que una estación aislada, de modo que CPs posteriores se consideran apenas ruido.

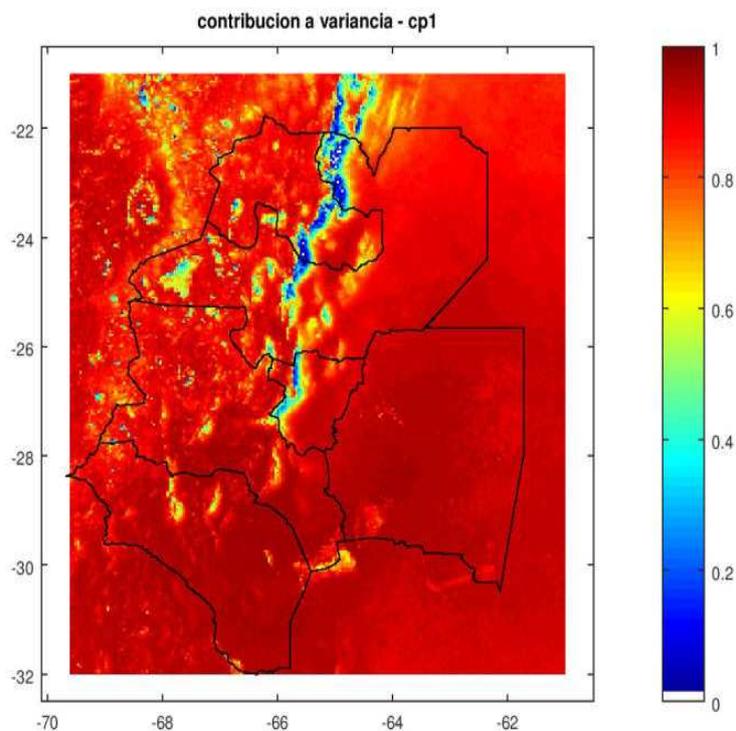


Figura 4. Contribución relativa de la CPI a la variancia local *unitaria*

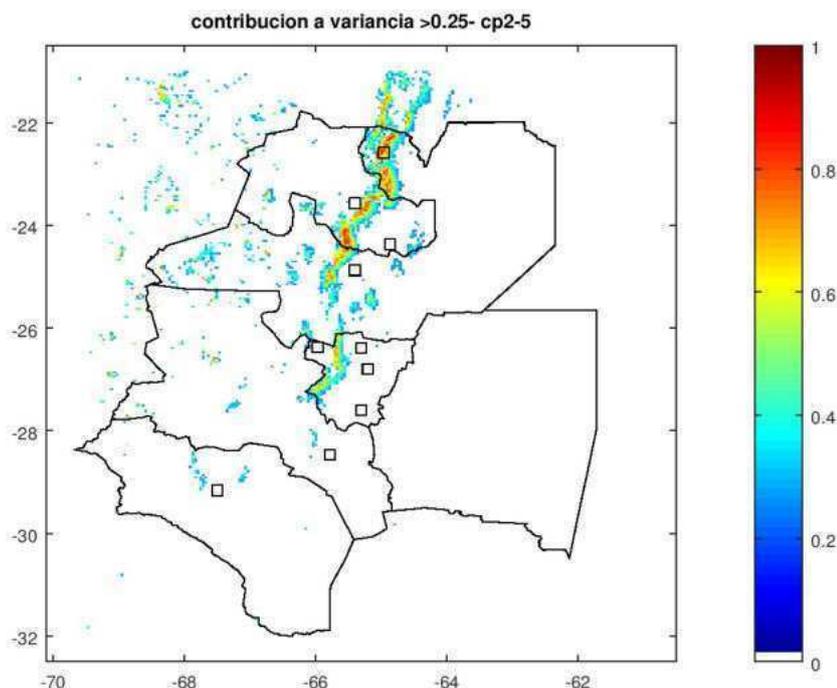


Figura 5. Contribución acumulada de las CP2 a CP5 para la variancia local *unitaria* (son representados los valores superiores a 25%)

Las Figs. 4 y 5 ilustran la contribución de las componentes principales a la variancia (ver Ecs. 5), evaluadas por f_1^2 para la primera (ζ_1 o CP1), y como $f_2^2 + f_3^2 + f_4^2 + f_5^2$ para el conjunto CP2 ... CP5 (ζ_1 a ζ_5). La componente CP1 es dominante sobre el Noroeste, tanto en las áreas orientales de llanura como en las occidentales montañosas y semiáridas, contribuyendo localmente a más de 70% de la variancia. Las componentes CP2 a CP5 acumuladas pueden alcanzar esta contribución apenas en el contrafuerte oriental de la transición llanura-región montañosa. En la Fig. 5 se indica la localización de 10 sitios, analizados en la próxima subsección.

Las Figs. 6.a y 6.b. muestran las CP1 y CP2 del NOA (normalizadas, o sea ζ_1, ζ_2) en el período 2017-2021. Como es usual, las CPs normalizadas oscilan en el intervalo (-3, +3). La CP1 tiene presencia predominante en el NOA tanto en montaña como en llanura (como indica la distribución de f_1^2 en la Fig. 4), y define un régimen de irradiación con ciclo anual notablemente regular. Se observa un máximo menor en el verano 2018-2019, lo que sugiere una estación con nubosidad (y precipitación) mayor en ese año. La CP2 con variaciones más complejas (un máximo en febrero-abril es sugerido) y combinada con las CP3-CP5 tiene mayor carga factorial concentrada en la transición llanura-montaña (como indicado en la Fig. 5, siguiendo las montañas desde el Aconquija tucumano hasta las Sierras Subandinas entre Salta y Jujuy). Un análisis más detallado será motivo de estudios posteriores.

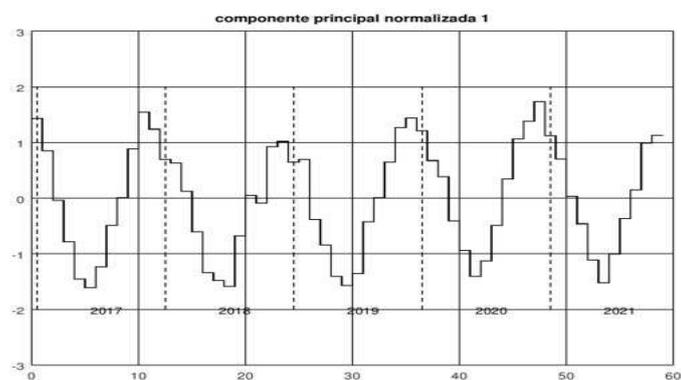


Figura 6.a. Primera componente principal (CPI, adimensional), período 2017-2021

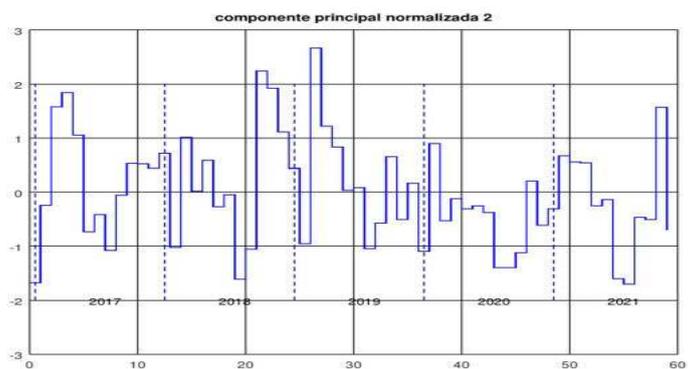


Figura 6.b. Segunda componente principal (CP2, adimensional), período 2017-2021

Tabla 1. Características de la serie temporal de 10 localidades – período 2017-2021

localidad	provincia	longit. latit.	alt. snm	<GL> W m ⁻²	SGL W m ⁻²	f ₁	f ₂	S1	S1-5
Benjamín Paz	Tucumán	-65,30 -26,39	780	206	53	0,9615	-0,1578	0,24	0,16
Colalao del Valle	Tucumán	-65,96 -26,38	1740	221	47	0,9527	0,1491	0,27	0,22
Monte Toro	Tucumán	-65,30 -27,60	312	203	60	0,9624	-0,1573	0,24	0,16
El Colmenar	Tucumán	-65,20 -26,80	481	191	55	0,9483	-0,2044	0,29	0,17
SFV Catamarca	Catamarca	-65,78 -28,47	500	221	63	0,9818	0,0019	0,14	0,12
Chilecito	La Rioja	-67,50 -29,16	1080	223	66	0,9783	0,0075	0,16	0,14
SPedro de Jujuy	Jujuy	-64,86 -24,37	578	210	55	0,9658	-0,1206	0,22	0,17
Tilcara	Jujuy	-65,40 -23,57	2480	233	48	0,9393	0,2354	0,32	0,16
Salta	Salta	-65,40 -24,87	1180	202	49	0,9424	-0,1673	0,31	0,18
transición	Salta	-64,96 -22,59	1400	177	27	0,4178	-0,5491	0,90	0,38

Construcción de series temporales. Fueron escogidas 10 localidades, indicadas en la Fig. 5 y descritas en la Tab. 1 (incluyendo longitud, latitud, altitud s.n.m.). Se indica promedio $\langle GL \rangle$ y desvío estándar SGL de la serie temporal del estimador GL. La décima localidad (denominada “transición”) se encuentra en la región de menor peso de la CP1. Se indica f_1, f_2 para las cargas factoriales de CP1 y CP2. Considerándose las aproximaciones con apenas la primera CP1 y con las primeras cinco (CP1 a CP5), existirá un “resto” para una descripción exacta de la variable $y(t)$ considerada (ver ec. 5.b); $S1$ y $S1-5$ son los valores de los desvíos estándar de esos restos. Como podía esperarse, excepto en el último local una aproximación de primer orden produciría desvíos del orden de $0,15-0,30 SGL \approx 12 W m^{-2}$. En la región de menor influencia de la CP1 (local de transición), la irradiancia regional y su desvío estándar son menores; el desvío con una aproximación de primer orden sería $\approx 0,90 SGL$ o $24 W m^{-2}$, pero se reduce a la mitad con el uso de 5 CPs. Otro hecho a ser notado, es que la calidad de las aproximaciones no parece dependiente de la altitud de la localidad.

La Fig. 7 compara las aproximaciones GL que usan CP1 y CP1-CP5, con los valores medidos en tres locales de Tucumán que incluyen estación solarimétrica de la EEAOC con altitudes entre 480 y 1740 m, al este y oeste de la región de transición. Se incluye la margen de error esperable de las mediciones: considerando un error instrumental E de ± 2 veces 5% ($E = \pm 0,10$), es simple demostrar que el intervalo de margen de error conduce de un valor “errado” x^* a su versión “errada” y^* según

$$x^* = x + E \cdot x \rightarrow y^* = (1+E) y + E \cdot \langle x \rangle / s_x, \quad (7)$$

con valores característicos $\langle x \rangle \approx \langle GL \rangle \approx 200$, $s_x \approx SGL \approx 50$. El resultado es que tanto la aproximación simple como la superior están básicamente incluidas dentro del margen de error. La concordancia entre medidas y modelo GL refuerza la idea de aplicar el método ACP para describir las series temporales en el resto del NOA. La Fig. 8 ilustra las tres series temporales de GL. Se grafican las aproximaciones

$$GL(1) = f_1 \zeta_1(t), \quad GL(2-5) = \sum_{k=2,5} f_k \zeta_k(t), \quad GL(1-5) = \sum_{k=1,5} f_k \zeta_k(t). \quad (8)$$

La CP1 (GL(1) en negro) es predominante en todas y construye una aproximación excelente de la serie temporal del modelo, casi equivalente a GL(1-5) (violeta), contribución de CP1 a CP5. Se observa también cómo el modelo se ajusta bien a la serie de mediciones. Alguna discrepancia en el máximo menor en el verano 2017-2018 merece ulteriores análisis de la calidad de datos terrestres y de satélite.

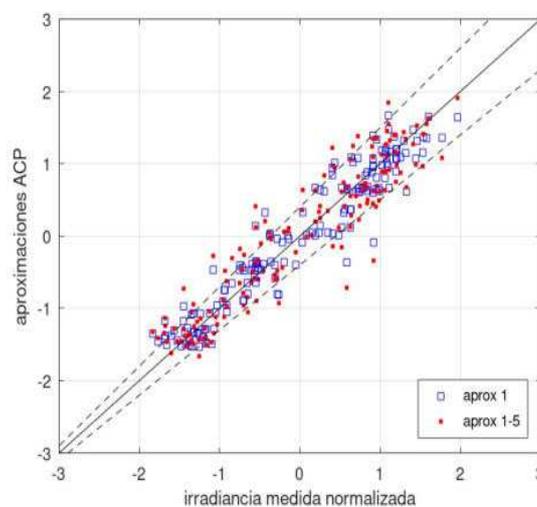


Figura 7. Series temporales normalizadas de tres localidades (Benjamín Paz, El Colmenar, Colalao del Valle), comparando valores medidos con las aproximaciones de orden 1 y acumulada 1-5. Líneas de trazos: márgenes de error 10%.

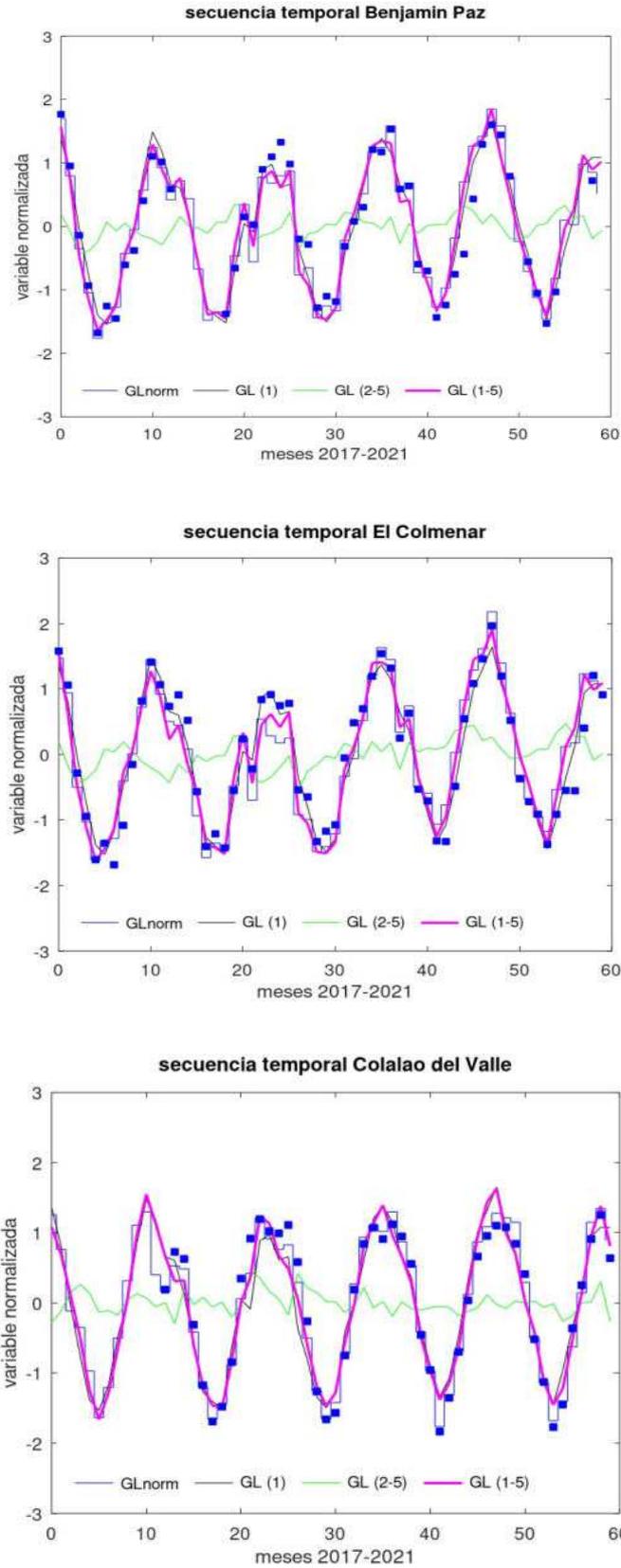


Figura 8. Tres series temporales normalizadas en Tucumán. Secuencia escalonada: modelo GL normalizado. $GL(1)$, $GL(2-5)$, $GL(1-5)$: contribuciones de la CP1, CP2 a CP5, y CP1 a CP5. Los cuadrados son mediciones de la red EEAOC.

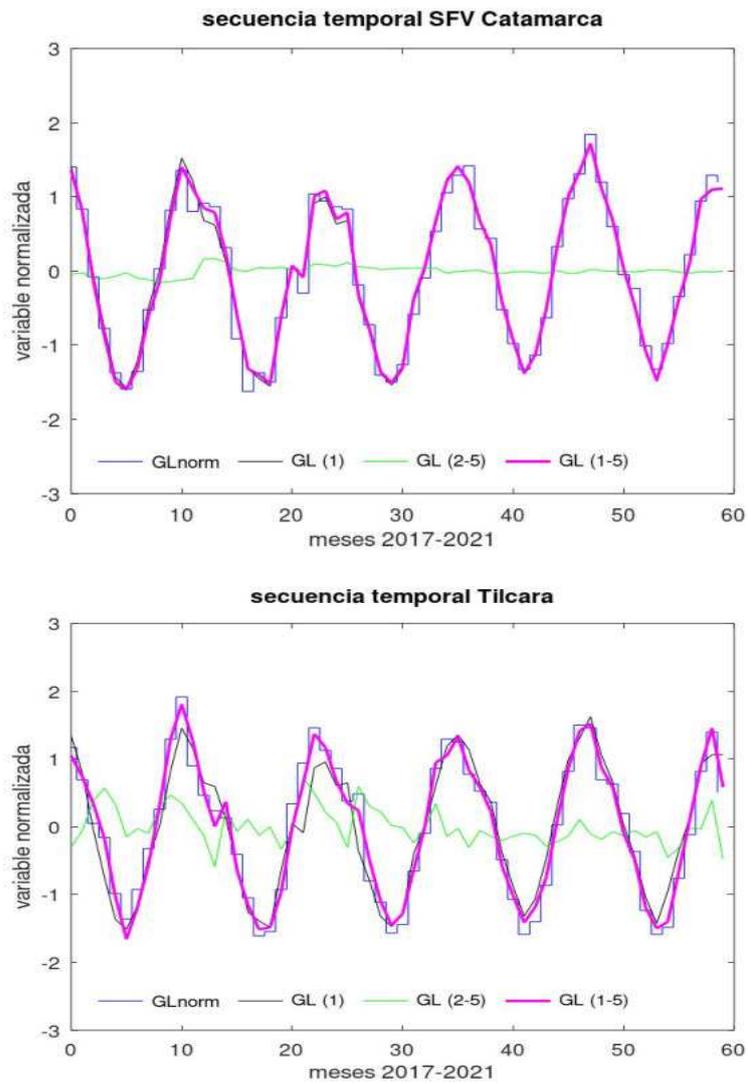


Figura 9. Dos series temporales normalizadas en el Noroeste (Catamarca y Tilcara), con predominancia de la CPI. Colores de GL(1), GL(2-5) y GL(1-5) idénticos a los de la Figura 8.

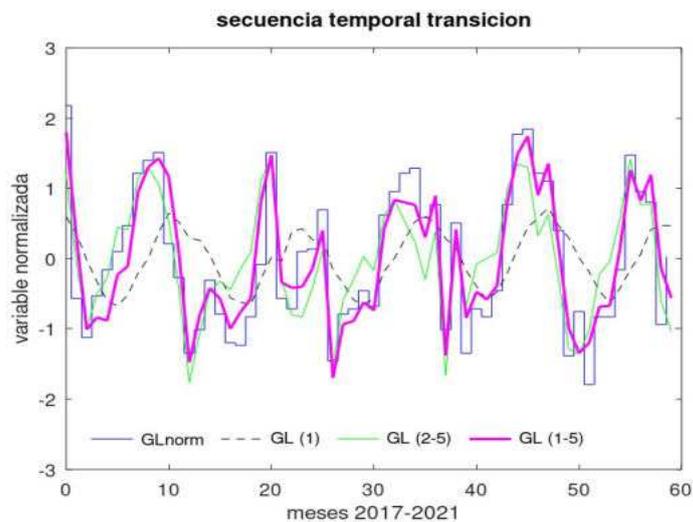


Figura 10. Serie temporal normalizada de la localidad de transición, con menos peso de la CPI (línea de trazos). Colores de GL(2-5) y GL(1-5) idénticos a los de la Figura 8.

La Fig. 9 confirma el ajuste de la CP1 con las evaluaciones del modelo GL en dos regiones montañosas (Catamarca y Tilcara); en la primera, las CP2-CP5 tienen contribución virtualmente despreciable mientras que en la segunda (vecina a la zona de transición) la CP1 es predominante pero la contribución de las otras CPs (en verde) puede ser apreciable, probablemente en años con mayor penetración de sistemas meteorológicos.

El comportamiento de la décima localidad está descripto en la Fig. 10, colocando en evidencia cómo en la zona de transición existe la señal regular de la CP1, pero son las CP2-CP5 acumuladas que controlan el ajuste a la secuencia temporal del modelo satelital. Más datos solarimétricos en la zona de transición y próxima a ella en las Sierras Subandinas serían de gran importancia para confirmar y complementar las evaluaciones del GL 1.2, y mejor entender el clima de la radiación solar en esa zona.

CONCLUSIÓN

La comparación satisfactoria de valores mensuales del modelo satelital GL 1.2 de radiación solar (irradiancia global media diaria, escala mensual) con datos de superficie de la EEAOC para Tucumán, sugiere que el modelo puede utilizarse para describir la variación espacial y temporal en la región Noroeste. El ACP del GL1.2 mostró que en el quinquenio 2017-2021 existieron dos regiones bien definidas de comportamiento espacio-temporal. En una de ellas (cubriendo la mayor parte del NOA) el comportamiento temporal predominante es descripto por la primera componente principal, con un ciclo anual bastante estable. Por lo tanto, una primera aproximación de la serie temporal de un local podría ser descripta por la relación

$$y(t) = [GL(t) - \langle GL \rangle] / SGL = f_1 \zeta_1(t), \quad (9)$$

La distribución geográfica de $\langle GL \rangle$ y SGL – valor medio de la radiación y desvío estándar en el quinquenio – puede ser suministrada por un par de archivos binarios (visualizados en la Fig. 2), obtenidos a partir del modelo GL 1.2. El coeficiente f_1 (carga factorial de la CP1) describe la variación espacial de la correlación con la CP1 $\zeta_1(t)$, y puede extraerse de un tercer archivo digital (visualización cualitativa en la Fig. 4). Los valores de la CP1 normalizada valen para toda la región y consisten en una lista simple de 60 valores numéricos (Fig. 6.a). El error asociado a la aproximación de primer orden es de $17\text{-}20 \text{ W m}^{-2}$. La segunda región se extiende a lo largo de la transición llanura-montaña entre el Aconquija tucumano y las Sierras Subandinas en Salta-Jujuy. En esta región es necesario utilizar combinación lineal de las 5 primeras CPs (cinco archivos digitales para los coeficientes f_1 a f_5 , y cinco conjuntos de 60 valores ζ_1 - ζ_5) y se obtiene un error típico del orden de 12 W m^{-2} . La resolución espacial de los resultados es $0,04^\circ$. Así, la información que describe el clima de radiación global y su evolución en el NOA en 2017-2021 (originalmente 60 archivos binarios) puede comprimirse en apenas 7 archivos binarios de 276×216 pixels y una matriz (archivo de texto) con dimensión 60 (meses) \times 5 (CPs). Estudio semejante extendido a 15 años (180 archivos) implica en el mismo número de 7 archivos binarios, y una matriz (texto) con dimensión 180 (meses) \times 5 (CPs).

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

Carmona, F., Orte, P.F., Rivas, R., Wolfram, E., Kruse, E. (2018). Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground based measurements and CERES_SYN 1 deg data. Egypt J. Remote Sens. Space Sci. 21:211-217. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.03>.

- Ceballos, J. C., Bottino, M. J. y Souza, J.M. (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation 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 Accesible en <https://www.researchgate.net/project/Satellite-estimation-of-surface-radiative-fluxes> ;también https://repositoriosdigitales.mincyt.gov.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>.
- Grossi Gallegos, H. y R. Lopardo (1988). Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the Argentine Pampa Humeda. *Solar Energy* 40, n° 5: 397-404. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90094-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90094-1).
- 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. Accesible en https://www.researchgate.net/publication/317478062_Atlas_de_Energia_Solar_de_la_Republica_Argentina.
- Johnson, R.A. y Wichern, D.W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall, 6th. Ed.
- 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. (2017). Uma contribuição à modelagem de aerossol e componentes da radiação solar no modelo GL. Tese de doutoramento. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos – SP, Brasil.
- Porfirio, A.C.S., Ceballos, J.C., Britto J.M.S. y Costa S.M.S. (2020): Evaluation of Global Solar Irradiance Estimates from GL1.2 Satellite-Based Model over Brazil Using an Extended Radiometric Network. *Remote Sensing* 12, no. 8: 1331. <https://doi.org/10.3390/rs12081331>.

SOME FEATURES OF SOLAR RADIATION REGIME IN ARGENTINE NORTHWEST REGION, PERIOD 2017-2021

ABSTRACT: Satellite-based model GL1.2 estimates solar irradiance with high spatial resolution and somewhat low error when considering monthly means. It was applied to Northwestern Argentine region for period 2017-2021 in order to describe details hardly detected by the coarse solarimetric network. Principal Components Analysis (PCA) showed that the first one (CP1) closely describes a normalized 5-year time series contributing to more than 70% of local variance, except in transition from plane to mountainous region. Here, components CP2 to CP5 allow for 95% of regional variance. In general, normalized monthly time series are closely described by the first five CPs. These results mean that a reduced number of binary files can be used to describe monthly time series with space resolution 0.04° and errors of about 20% of standard deviation of time series, say about 12 W m⁻².

Keywords: solar radiation, satellite estimation, model GL 1.2, Argentine Northwest, principal components