

ALGUNAS CARACTERISTICAS DEL RÉGIMEN DE RADIACION SOLAR EN ARGENTINA, PERÍODO 1996-2006

Juan Carlos Ceballos

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/INPE

Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil

e-mail: juan.ceballos@cptec.inpe.br

Resumen. El modelo GL de estimación de radiación solar por satélite procesa datos del satélite GOES en el CPTEC/INPE. Una base de datos de 11 años (1996-2006) fue utilizada para análisis más detallados del comportamiento temporal y espacial de la radiación solar en el continente y océano en el área del Cono Sur. El ciclo anual de irradiancia media varia espacialmente en la región, pero presenta poca variabilidad año-a-año. Varias regiones características son indicadas, del punto de vista de la radiación media, de la varianza de la serie y de la contribución de los armónicos anual y semestral.

Palabras clave: Radiación solar, satélites, GOES, modelo GL

Abstract. The model GL estimates operationally solar irradiation at CPTEC/INPE, based on GOES satellite imagery. A time series 1996-2006 was used for performing regional analysis in more detail than solarimetric networks could do over continental and oceanic area associated to the so-called Cono Sur region. It is found that annual cycle of mean irradiance varies spatially but exhibits low interannual variability. Several characteristic regions are outlined through geographic distribution of mean irradiance, time series variance and contribution of anual and semi-annual harmonics.

Keywords: Solar radiation, GOES, GL model

INTRODUCCIÓN

El modelo GL de estimación de irradiación solar, desarrollado en el CPTEC/INPE, corre en régimen operacional procesando imágenes VIS-Imager del satélite GOES para América del Sur. El modelo es físico: depende básicamente de parámetros atmosféricos y de superficie como agua precipitable, ozonio y reflectancia del suelo, y se basa en la reflectancia en el canal visible y estimación de nebulosidad a partir de ella (Ceballos et al. 2004; ver descripción simplificada en la ULR <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>).

Siendo así, no es dependiente del ajuste estadístico con medidas de radiación en redes de superficie, a diferencia de algoritmos como los de Tarpley (1979) propuesto nos Estados Unidos o HELIOSAT (Cano et al. 1986) utilizado en Europa. Por otro lado, tiene una estructura conceptual simple que conduce a un algoritmo más simple que otros basados también en el canal VIS, como los desarrollados en la Universidad de Maryland (Pinker y Laszlo 1992) o el IGMK de Colonia (Stuhlmann et al. 1990), presentando resultados dentro de padrones propuestos internacionalmente. Los

resultados de una serie de 11 años de imágenes GOES presentan distribuciones de valores promedio coherentes con los de atlas del Brasil generados a partir del modelo Brasil SR, adaptado del IGMK (INMET/LABSOLAR 1998) y de una colecta de numerosas mediciones solarimétricas (Tiba 2001). Los detalles geográficos y la regularidad temporal de los modelos por satélite permiten análisis adicionales del régimen de radiación. Este trabajo presenta algunos resultados preliminares para el área del Cono Sur.

MATERIAL Y MÉTODOS

La resolución espacial original del modelo GL es de $0,04^\circ$, promediados en 3×3 pixels (la resolución final es de $0,04^\circ$, representativa de $0,12^\circ$). Para fines de análisis climatológico, reduciendo el volumen de datos pero conservando una calidad temporal y espacial respetable, fue generada una serie temporal que cubre América del Sur con "pixels" que son promediados en $0,4^\circ \times 0,4^\circ$ y en períodos de 5 días (péntadas). El archivo final contiene 803 péntadas de 180×180 pixels. Esta matriz con dimensión $180 \times 180 \times 803$ puede ser bajada en la ULR <http://satelite.cptec.inpe.br/> → *radiação solar e terrestre* → *solar global* → *series históricas*, junto con instrucciones para lectura y programación del archivo. Fue usado el utilitario MatLab para lectura, procesamiento y generación de figuras.

La región considerada fue la del Cono Sur y océanos adyacentes entre 15°S y 45°S , 75°W y 50°W . El modelo GL presenta valores menos precisos y los defectos de imagen fueron más frecuentes en latitudes al sur de 45°S . Debe observarse que los parámetros agua precipitable y albedo de superficie tienen un valor geográfico genérico en el modelo y pueden conducir

La serie incluye resultados de GOES 8 en 1996-2002 (1996-97 con imágenes de menor resolución) y de GOES 12 en 2003-2006 (abril 2003 a agosto 2005 basadas en la calibración inicial del detector VIS; posteriormente, corregidas por degradación

del sensor). Siendo el más regular con relación a comportamiento de calibración y colecta de imágenes, el período 1998-2002 es asumido como de referencia, para juzgar comportamientos de otras épocas da serie.

Las péntadas son consideradas a partir de la secuencia de días julianos, sin ajuste obligatorio con los días de cada mes. Años bisiestos tienen su última péntada con 6 días. Para análisis armónico, las dos últimas de cada año son agrupadas en un único valor promedio; así, el año es considerado con 72 péntadas (en vez de 73) y presenta armónicos bien definidos 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, ... con número entero de péntadas.

RESULTADOS

La figura 1 presenta la comparación del modelo GL con datos de tres estaciones: Itajubá ($22,406\text{S}$ $45,443\text{W}$) en Brasil; Córdoba ($31,43\text{S}$ $64,18\text{W}$) y Paraná ($31,83\text{S}$ $60,52\text{W}$) en Argentina. En términos generales es evidente la buena calidad de ajuste entre modelo y observaciones, especialmente para péntadas con días nublados. Los valores superiores de radiación (para cielo descubierto) presentan desvíos que no son analizados aquí, pero escapan a la naturaleza del modelo.

La figura 2 presenta el ciclo anual medio calculado por el modelo para un local situado en la Pampa Húmeda. El ciclo obtenido con el período de referencia y con el conjunto de 11 años están dentro de la margen estadística de fluctuación esperable para el valor medio de 5 años (él mismo bastante reducido).

La Figura 3 ilustra la serie de 11 años para un conjunto de locales de la región, representando la serie local (en azul) y una repetición del ciclo anual medio (en rojo). Las propias mediciones en varios locales proveen la evidencia de una estimación confiable por parte del modelo GL. La regularidad observada en todos los casos sugiere que la serie completa de cada local está dominada por un ciclo anual característico y fluctuaciones relativamente pequeñas en torno de él.

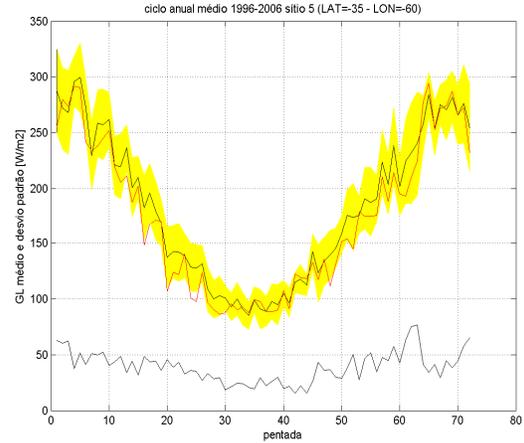
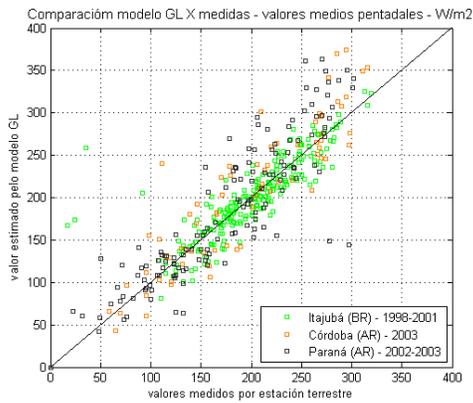


Figura 1 (izquierda) Diagrama de dispersión de valores pentadales del modelo GL, comparados con mediciones en Itajubá (Brasil), y Córdoba y Paraná (Argentina).

Figura 2 (derecha). Ciclo anual medio en un pixel de $0,4^{\circ} \times 0,4^{\circ}$ en la Pampa Húmeda, 1996-2006. Unidades de tiempo: pentadas. Línea roja: promedio del período de referencia 1998-2002. El área en amarillo encierra las variaciones dentro de un desvío estándar esperable del promedio; la línea negra incluida describe el promedio de 11 años. Línea inferior: ciclo anual del desvío estándar en 11 años de datos.

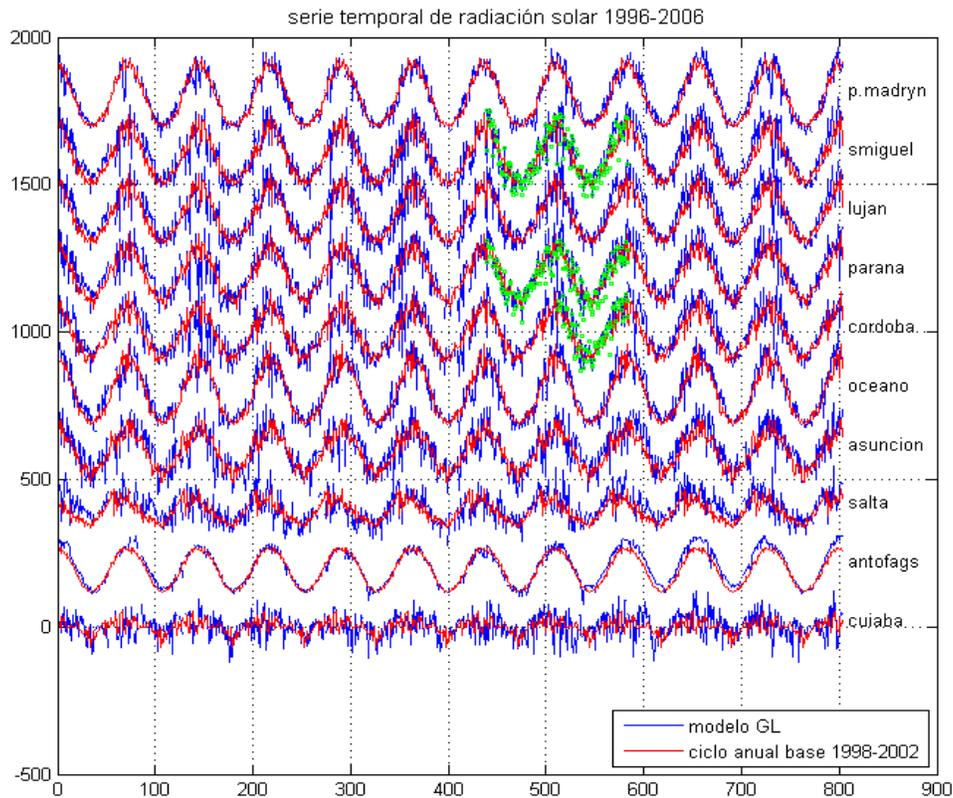
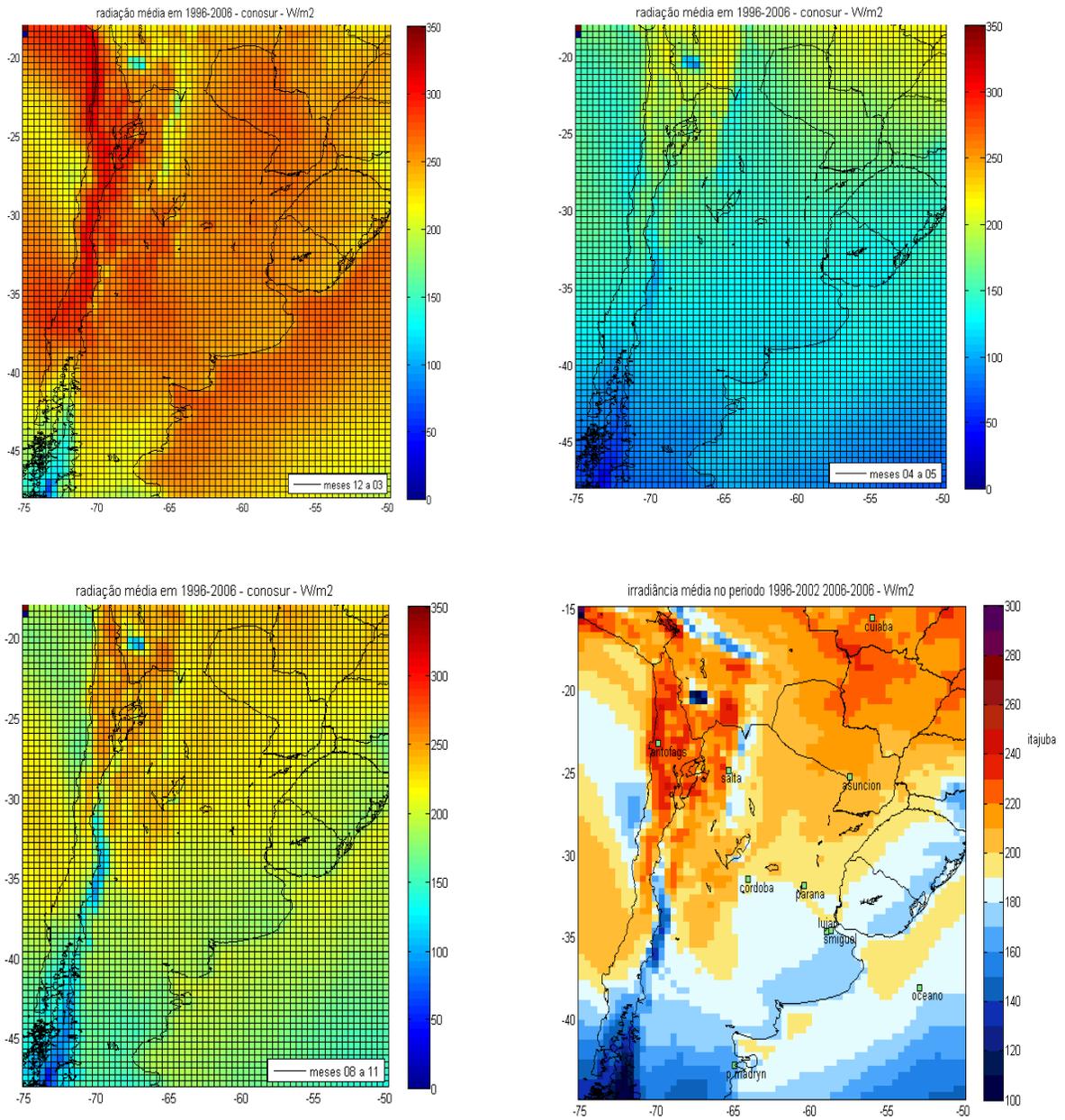


Figura 3. Series temporales 1996-2006 para 9 locales del Cono Sur y uno tropical (Cuiabá). Azul: series del modelo GL; rojo: ciclo anual medio; verde: datos solarimétricos de superficie.



Figuras 4. Valor medio de la radiación solar (em $W.m^{-2}$) para el Cono Sur, período 1996-2006 (mapa: proyección regular LAT/LON). Intervalos: cuatrimestres diciembre-marzo, abril-julio, agosto-noviembre; el cuarto gráfico representa el valor medio anual. Está indicada la situación de los locales con serie temporal descrita en la figura 3. El área oscura en el sudeste de Bolivia corresponde al Salar de Uyuni.

Los resultados para el ciclo anual sugieren que 11 años de modelo permiten construir una climatología de la distribución media de radiación solar. Las figuras 4 ilustran una aproximación a ella. Fueron considerados tres cuatrimestres (asociados a características genéricas estacionales) y el promedio anual. En términos generales, el primer cuatrimestre (verano) muestra radiación prácticamente homogénea sobre Argentina, Paraguay, Uruguay, sur del Brasil, y Argentina hasta los 42°S. El Atlántico participa de esta homogeneidad. Valores menores (del orden de 220 W.m⁻²) se observan en una faja longitudinal del Noroeste Argentino, Sur de Bolivia y parte del Pacífico frente a Chile. El segundo cuatrimestre muestra comportamiento opuesto: mientras la gran área homogénea de las llanuras tiene radiación mínima, el Noroeste y Bolivia presentan los mismos valores que en el cuatrimestre anterior (siendo ahora máximos regionales). Las distribuciones tienen una estrecha semejanza a las del atlas reciente, publicado por Grossi Gallegos y Righini (2007) y basado esencialmente en extensas series de heliofanía.

El régimen de variación temporal de la energía solar puede ser descrito mediante análisis armónico de la serie temporal. La figura 3 sugiere que deberá encontrarse una fuerte contribución de la componente anual. La matriz GL de datos es especialmente útil en este campo. La figura 5 ilustra la distribución de la varianza de la serie GL de 11 años, obtenida para cada pixel por la expresión

$$S^2 = \text{Var}\{GL\} = (1/T) \sum_t [GL(t) - \langle GL \rangle]^2,$$

$T = 11 \cdot 72$. El valor medio $\langle GL \rangle$ es el ilustrado por la figura 3 (valor anual). Se observa que la mayor parte del Cono Sur (excepto Bolivia y el Noroeste argentino), incluyendo el océano, en unidades de 1E4, tiene varianza del orden de 1-1,3. La Puna boliviana tiene los menores valores (<0,6). La faja del Noroeste en el contrafuerte montañoso tiene valor intermedio, semejante

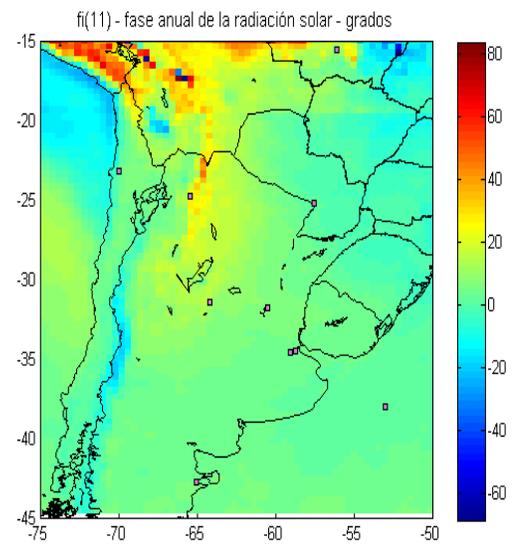
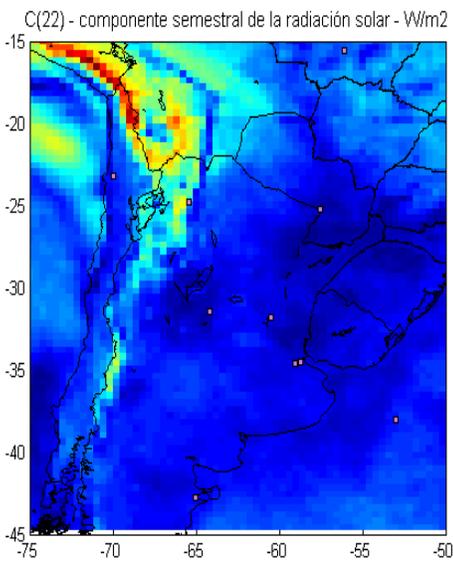
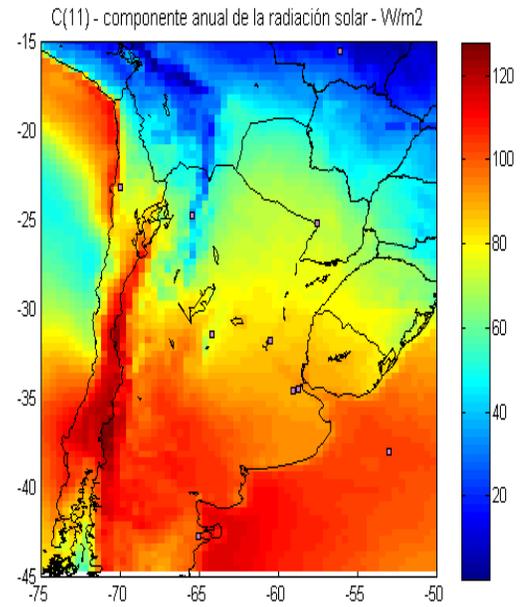
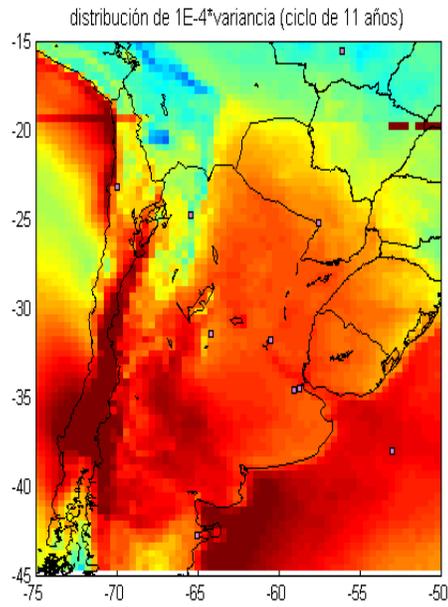
a la de Bolivia oriental y regiones conexas del Brasil. Esta amplitud menor puede estar asociada a nebulosidad más frecuente en la región.

La serie temporal es descrita exactamente por la suma

$$GL(t) = \langle GL \rangle + \sum_{h=1, H} C_h \cos(h\omega_0 t + \phi_h),$$

$H = T/2$, $\omega_0 = 2\pi/T$, y la contribución de cada armónico para la varianza es $C_h^2/2$. Observando la parte derecha de las figuras 5, parece evidente que el ciclo anual contribuye con hasta 50% de la varianza en toda la región al sur de 30°S y 25% en el Nordeste argentino y Paraguay. La región Nordeste parece tener mayor complejidad. Otro aspecto bastante claro es que la fase del ciclo anual es virtualmente constante en el Cono Sur, $\phi \sim 0$, o que significa la predominancia de un ciclo anual semejante a una función coseno (como el de la figura 2). Nuevamente, el contrafuerte de las montañas en el Noroeste parece un caso más complejo y en fase con el ciclo anual de Bolivia y Perú montañosos. Excepto en la región occidental (montañosa), la componente semestral tiene una contribución inferior al 10%.

Un “ruido blanco” (componente aleatoria de la varianza) tendría una varianza $C_b^2/2 = S^2/H$. De esa forma, para $S^2 \sim 1E4$, ruido blanco tendría una amplitud del orden de 7 W.m⁻². La figura 6 presenta un caso particular de espectro (local en la Pampa Húmeda). Ejecutando un “filtro de ruido blanco” ($C_h > 21$), las principales contribuciones son de las señales anual y semestral. Otras cuatro componentes (débiles) tienen período menor que un año (del orden de 50 y 22 días). Probablemente, este es el caso generalizado. Dos otras componentes (intensas) tienen períodos de varios años; su significación real (incluyendo la influencia de los períodos con varios satélites y calibraciones) es motivo de un análisis regional que está en etapa de procesamiento de datos.



Figuras 5. Distribuição geográfica de componentes del análisis armónico de radiación solar. (arriba, izquierda) varianza de la serie de 11 años. (derecha) amplitud del armónico 11 (ciclo anual). (abajo, izquierda). Amplitud del armónico 22 (componente semestral); (derecha) fase en grados de la componente anual.

Mapa: proyección regular LAT/LON

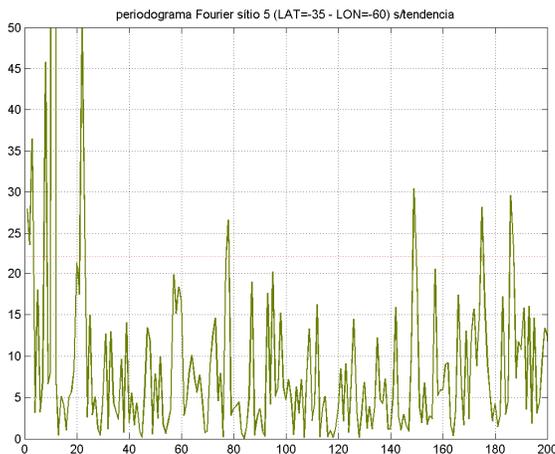


Figura 6. Local de la Pampa Húmeda (figura 2): periodograma de la serie temporal del local de Figura 2. Considerando 3 veces la intensidad del ruido blanco básico, el nivel de corte para señal significativo es del orden de 21 W.m^2 . Apenas ocho componentes permanecen: a) $h= 11, 22, 78, 150, 175, 187$, con período menor que un año, de los cuales 11 e 22 tienen amplitud considerable; b) dos armónicos con $h < 11$. El origen de estos últimos está en análisis.

CONCLUSIONES

La base de datos creada a partir del modelo GL permite delimitar en el Cono Sur (al norte de 45°S) regiones características y estimar valores típicos de variables importantes como ciclo anual de la irradiación solar. Apenas 11 años ya parecen suficientes para estimar un valor estadísticamente confiable del ciclo anual en la región. Distribuciones regionales de valores medios aparecen semejantes a las presentadas en atlas de radiación recientes, pero también exhiben mayores detalles de variaciones espaciales, además de incluir áreas oceánicas. La serie permite realizar análisis armónica de los 11 años del modelo; la señal predominante es un ciclo anual con fase prácticamente constante en la región. La señal de 22 años es la segunda en importancia. Pocos armónicos con períodos menores pasan un test simple para filtrar ruido blanco, y tienen peso pequeño en la varianza de la serie. Esta información básica ya es interesante para el uso de ciclos anuales de radiación característicos para uso en modelos climáticos.

Estudios adicionales deberán analizar la información asociada a armónicos con períodos superiores a un año.

La región cubriendo el Noroeste de Argentina y occidente de Bolivia presenta complejidad

adicional que requiere análisis específico. Probablemente el área de análisis debería extenderse a la Amazonia, debido a sus conexiones con la circulación regional. El análisis factorial en componentes principales es una herramienta adicional que deberá ser empleada. Un estudio anterior de Ceballos et al. (2005) ya sugería que esa región tiene características individuales dentro del continente.

REFERENCIAS

- Cano, D., J. M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, and L. Wald (1986), A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31– 39.
- CEBALLOS, J. C. ; BOTTINO, M. J. . 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. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.
- Ceballos, J.C.; Bottino, M.J. y Righini, R., 2005. Radiación solar en Argentina estimada por satélite: Algunas características espaciales y temporales.. In: IX Congresso

Argentino de Meteorología, Buenos Aires. Anales.

Ceballos, J.C.; Bottino, M.J. y Souza, J.M., 2004. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES-E imagery. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, n. D2, p. 1-14, 2004.

Grossi Gallegos, H. y Righini, R., 2007. Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Lujan y SECYT, Argentina, 74 pp.

INMET (Instituto Nacional de Meteorología) e LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal de Santa Catarina) 1998. **Irradiação solar do Brasil**. Brasília. 57 pp.

Pinker, R. T., and I. Laszlo (1992), Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale, *J. Appl. Meteorol.*, 31, 194– 211.

Tarpley, J. D. (1979), Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, 18, 1172– 1181.

Stuhlmann, R., M. Rieland, and E. Raschke (1990), An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, 29, 586– 603.

Tiba, Ch. (Coordenador) 2001. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres**. Editora Universitária da UFPE, Recife, PE. 111 pp.