

OSCILACIONES FUNDAMENTALES Y SUBARMÓNICOS EN LA ACTIVIDAD SOLAR Y EN EL RADIO MEDIO DEL SOL

A.M Silva *

Universidad de Buenos Aires, Cátedra de Física, Ciclo Básico Común (1428)
Ciudad Universitaria, Pab III, Depto V
Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE)
(1428) Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina

e-mail: adriansilva@fibertel.com.ar

This work shows the results of the multiresolved wavelet analysis of fundamental oscillations with periods between 100 and 1000 days in the sunspot areas since the 17 cycle up to 23 cycle, and changes in the solar radius in the last cycle from a 17 GHz database.

Has been identified the excitation of submodes of the 160 days wave. This was associated with increase of the solar cycle intensity. The relative intensity of harmonics could be an important tool to understand the evolution of this plasma wave, and its role in the new magnetic flux emergence phenomenon.

From a chaotic increase in the solar activity level occurred during 1920 – 1930, is excited the 160 days wave, and it begins the process that drives to cascades of energy flares, as those appeared starting from the cycle 19, and a growing probability of mass coronal ejections (CME's) that affect the terrestrial space climate drastically.

This study is guided to the development of forecast tools of the future activity of the sun. The studied waves are originated in the convective region and they affect to the global behavior of the sun, as it evidences in the analysis of the periodic changes in their medium radius, and their synchronism with the sunspot areas spectrum in the cycle 23.

The wave – wave interaction formalism is an adequate frame for the start the theoretical study, and in this work is shown that the energy of the waves doesn't disappear and it flows among modes that get excited in the solar dynamo in a non-linear way. The conditions for such an energy exchange are satisfied by the discovered waves through the spectral analysis.

En este trabajo se presentan los resultados de un análisis multiresuelto wavelet de oscilaciones fundamentales con periodos entre 100 y 1000 días en el área de manchas solares desde el ciclo 17 hasta el ciclo 23, y en este último se analizan cambios en el radio del sol, sobre una base de datos en 17 GHz.

Se ha identificado la excitación de submodos de la onda de 160 días, asociada a la aparición de aumentos en la intensidad del ciclo solar. La intensidad relativa de los armónicos puede ser un dato valioso para comprender la evolución de esta onda en el plasma, y su rol en el fenómeno de emergencia de nuevo flujo magnético.

A partir de un salto caótico ocurrido en el nivel de actividad del sol durante 1920-1930, la onda citada se excita y comienza un proceso que conduce a cascadas de flares energéticos, como las aparecidas a partir del ciclo 19, y una probabilidad creciente de eyecciones coronales de masa (CME's), que afectan drásticamente el clima espacial terrestre.

Este estudio se orienta al desarrollo de herramientas de pronóstico de la futura actividad del sol. Las ondas estudiadas se originan en la zona convectiva y afectan al comportamiento global del sol, como lo evidencia el análisis de los cambios periódicos en su radio medio, y su sincronismo con el espectro de áreas en el ciclo 23.

Se inicia el estudio teórico con el formalismo de interacción onda-onda, mostrando que la energía de las ondas no desaparece y fluye entre modos que se excitan en el dinamo solar de forma no lineal. Las condiciones para tal intercambio de energía son satisfechas por las ondas descubiertas a través del análisis espectral.

I. INTRODUCCIÓN

La actividad solar de manchas, explosiones y expulsión de masa, está controlada por el campo magnético del sol. El sol, genera este campo vía el efecto dinamo, que a partir de cierto campo semilla extrae energía del movimiento del plasma en la zona de transición del interior solar, y realimenta al campo. Para que esto funcione es necesario un campo interno toroidal que crea un campo poloidal, que es el que llega hasta la Tierra. Estos campos se realimentan mutuamente, y es en las eyecciones de campo de magnético donde ocurren las transiciones más drásticas. El dinamo solar requiere de una rotación diferencial del fluido, que se logra por movimientos

meridionales desde el ecuador solar a los polos. De esta manera a partir de un campo semilla de tipo polar se puede generar un campo (interno) de geometría toroidal. Este es el llamado "Omega-Effect". Es necesario también que las líneas de campo puedan agruparse y tener un movimiento inducido por la convección de calor y la rotación general del sol, que introducen fuerzas de Coriolis, y permiten regenerar el campo poloidal, condición conocida como "Alfa-Effect". El ciclo solar de 11 años, la inversión de polaridad, la reversión del campo secular, y otros efectos se deben explicar en este marco. Uno de los objetivos de este trabajo es probar si la onda de 160 días, simultánea con la emergencia de flujo, es un

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

efecto global en el sol. Para ello, construimos espectros del radio del sol, y se analizaron los 7 ciclos solares posteriores a la transición de 1923.

En 1984 Rieger et al¹ empleando datos del espectrómetro GRS a bordo del Solar Maximum Mission SMM detectó una periodicidad de 154 días en la ocurrencia de fulguraciones en rayos X duros. La misma también es observada en datos del satélite GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellites) para el ciclo 21, así como en las áreas de manchas solares (Lean²), durante el ciclo solar 19–21. La periodicidad cercana a 160 días en las fulguraciones solares en un amplio rango de energías desde los rayos X a las ondas de radio, en las áreas de manchas y en el número de Wolf, es objeto de intensos estudios. En 1998 Oliver et al³ realizan el primer análisis empleando wavelets, de la tasa de ocurrencia de fulguraciones y de áreas de manchas solares durante los ciclos 16 a 21 y encuentran que la periodicidad aparece en el ciclo 16, es máxima en el ciclo 19 y desaparece completamente después del ciclo 21. El sincronismo de esta aparición esporádica de la periodicidad con un evento de ascenso caótico en la actividad solar y magnética hallado por Duhau⁴ y Duhau y Chen⁵, indica que, como fue sugerido por Oliver et al la periodicidad de 158 días está relacionada con la desestabilización del dinamo **debida a la emergencia de nuevo flujo magnético durante los ciclos 16 a 21.**

En un análisis posterior, Ballester⁶ et al. estudian exhaustivamente esta periodicidad en el número de manchas solares y en las áreas durante los ciclos 16 a 22, encontrando que en este último la periodicidad desaparece. El rango de periodos considerados en este trabajo se limita al intervalo 140–180 días.

Hemos manejado la hipótesis de la excitación de periodos resonantes con cierto ancho de banda, esperable en el acople de ondas en el plasma subfotosférico, por lo que extendimos en este trabajo el análisis multiresuelto a la búsqueda de periodos relevantes para escalas entre 100 y 1000 días. La validez ya ha sido puesta a prueba para datos de flares del CGRO, y datos del campo magnético por Silva Duhau⁷

Se explora aquí, la evolución de armónicos desde 1936 hasta el 2003, y se analiza la globalidad de la onda en el radio del sol.

II. ANÁLISIS DE LOS DATOS

La base de datos de áreas de manchas solares se puede obtener del National Geophysical Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>.

Los radios solares han sido medidos en 17 GHz que corresponde al continuo en microondas, y calculados a partir de mapas del Radioheliógrafo de Nobeyama (Selhorst et al.⁸). Se han analizado datos calculados también en la línea Lyman α del He II en 30.4 nm,

observada con el EIT a bordo del satélite SOHO. Los datos fueron provistos por el INPE/CRAAM de Brasil. Hemos realizado un análisis wavelet multiresuelto empleando la función generadora compleja de Morlet:

$$\Psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

Donde t es el tiempo y ω_0 es el parámetro de frecuencia adimensional, tomado = 6.

Es conveniente generar las escalas de acuerdo con las potencias crecientes de dos, tal como se especifica en Torrence y Compo⁹

$$S_j = S_0 2^{j\delta_j} \quad j = 0, 1, \dots, J \quad (2)$$

Donde S_0 es la menor escala resoluble, que se ha tomado en este trabajo igual a 2 días. El número de subescalas determina el valor de δ_j y fue elegido como se dijo de manera de incluir los periodos relevantes. Sobre las dos bases de datos se calculó el espectro wavelet global de acuerdo con:

$$\bar{W}^2(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (3)$$

La función $W(s)$ está dada por la convolución de la compleja conjugada de Ψ con la serie de datos X_k .

Los espectros obtenidos han sido normalizados con las constantes adecuadas para radio y áreas, y tomando en cuenta el número de días considerados en cada ciclo, de modo de poder comparar los espectros respectivos. El análisis se ha hecho en el entorno del máximo de cada ciclo, tomando tres años.

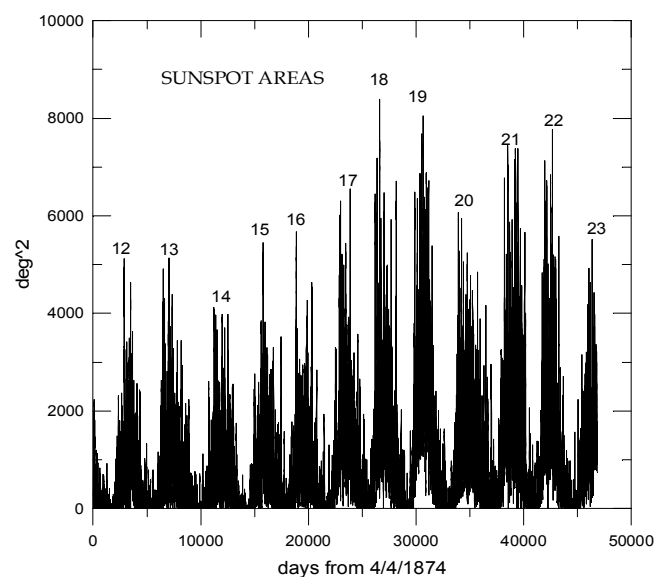


Figura 1: Serie temporal de áreas de manchas solares.

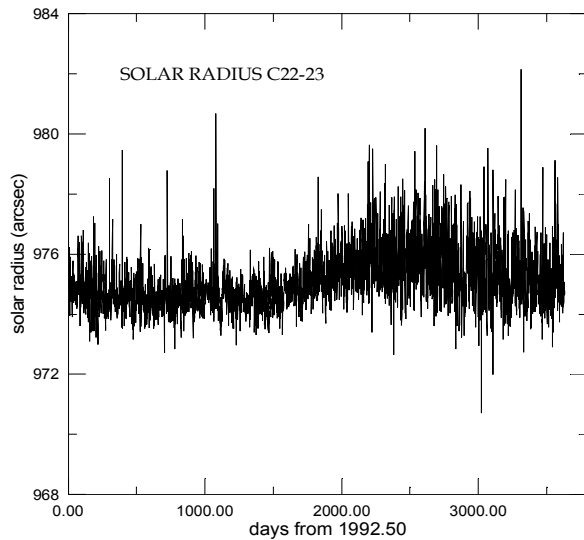


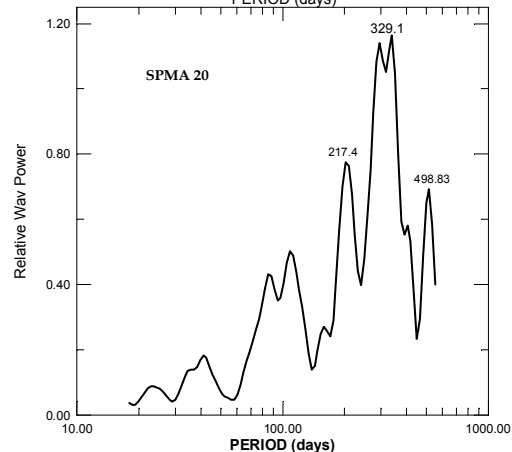
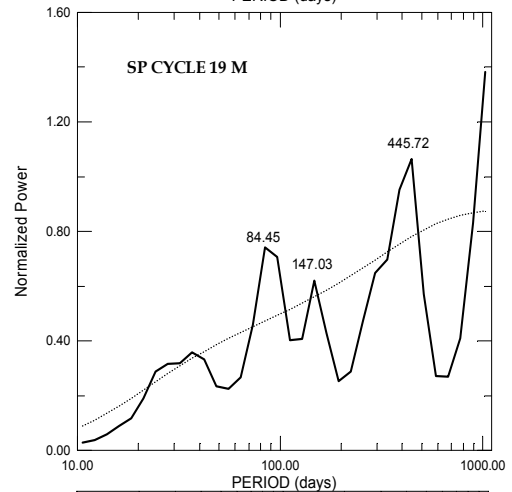
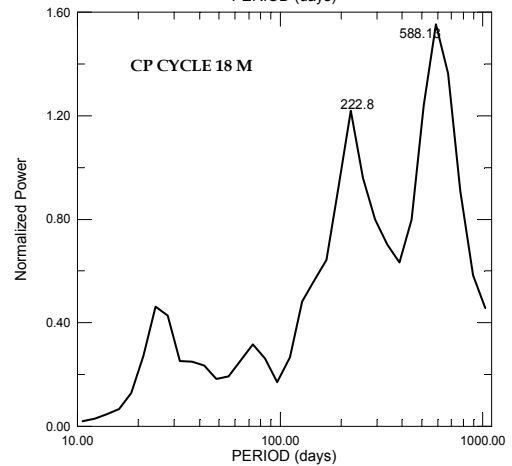
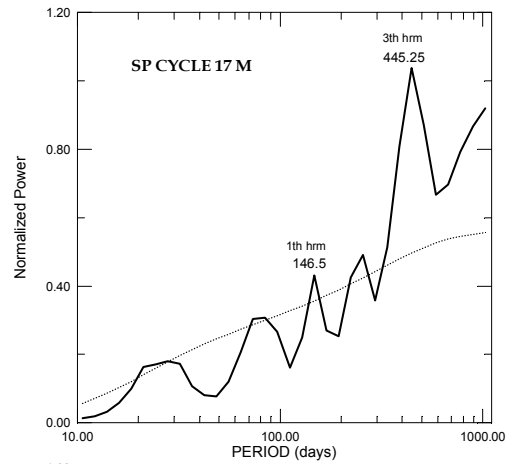
Figura 1cont.: Serie temporal empleada del radio solar.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1) Sunspot areas

En la figura 2 se observan los espectros wavelet de los ciclos solares 17 a 23 tomados en el entorno de sus máximos respectivos. Para el ciclo 21 se analiza adicionalmente la subida y la bajada del ciclo para entender como se configura la señal en el tiempo. La línea de puntos corresponde al nivel estadístico de significación de 95 %, considerando un espectro de ruido “rojo” creciente a frecuencias bajas, que asegura la confianza en los datos. En la tabla 1, se indica con “A” un nivel alto del periodo indicado y con “B” un nivel bajo. Con “D” se indica un pico correspondiente a un periodo distorsionado. Como puede observarse, la periodicidad de 160 días, con un ancho de banda de 20 días, está presente por encima del nivel de significación pero con un valor bajo, salvo en el ciclo 18 (ausente) y en el 21 con un valor alto, coincidiendo con las cascadas de flares energéticos. Los otros periodos corresponden, en algunos casos exactamente, al 2º, 3º, 4º armónicos.

En particular, el 3º armónico ha sido identificado como una señal de 1.3 años en los sunspots (Krikova¹⁰), y el periodo fundamental en 151 días fue identificado sorprendentemente en las intensidades de rayos cósmicos anómalos a 73 AU del sol, por el staff del Voyager 1 (Hill¹¹), lo que muestra los alcances de la señal. Está claro que cuando se tiene un nivel bajo en algún armónico, este es alto en otro. Si bien debe realizarse un modelo correcto para considerar la energía de cada modo, se tiene una primera indicación de la conservación de la oscilación.



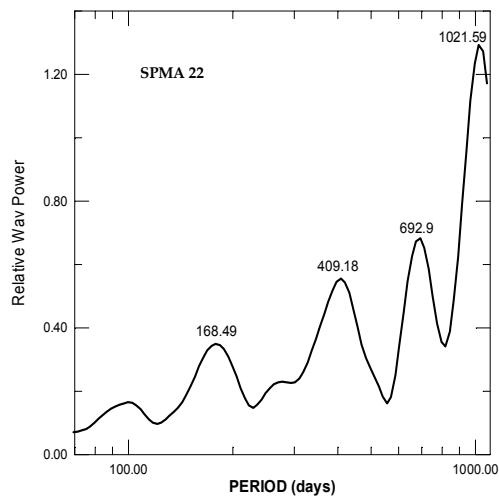
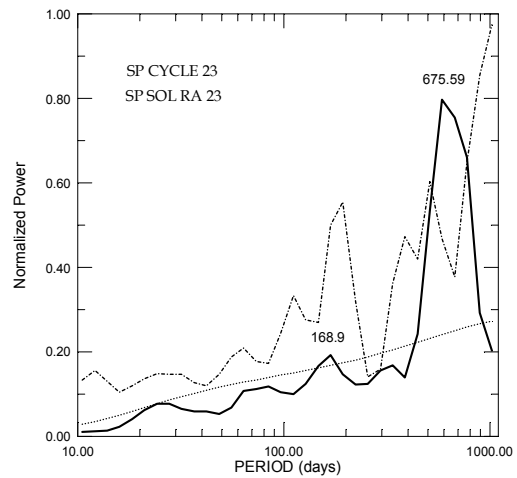
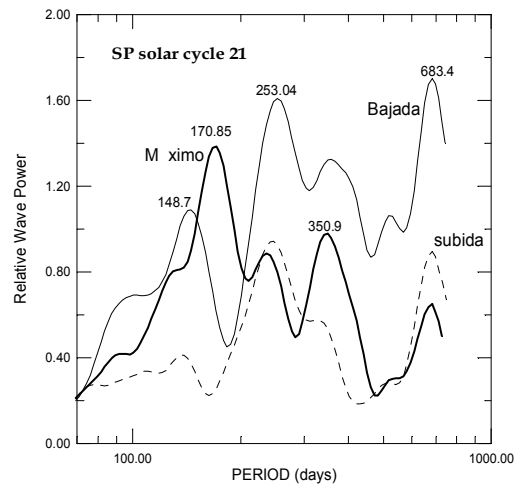
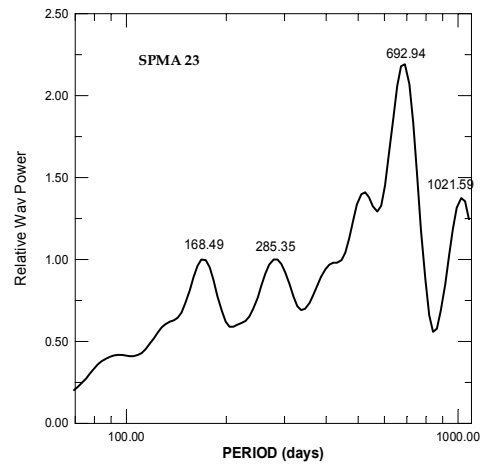
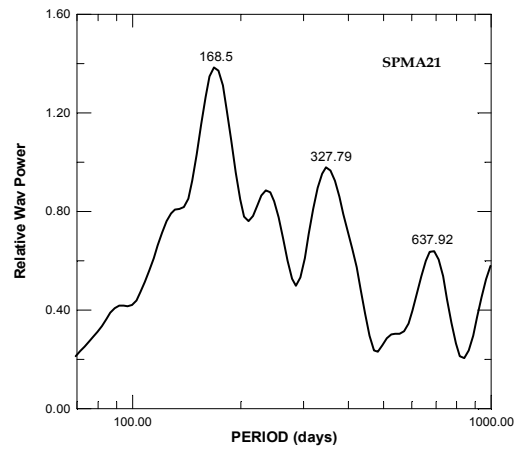


TABLA 1: Intensidad relativa del periodo fundamental y sus submodos.

Ciclo	P	150-170 d	325-345 d	440-460 d	608-690 d
17		B	--	A	--
18		--	--	--	D
19		B	--	A	--
20		B	A	--	B
21		A	B	--	B
22		B	--	A	A
23		B	--	--	A

Figura 2: Espectros wavelet de los máximos para los ciclos solares 17 a 23. Para el ciclo 21 se analiza la configuración del periodo fundamental de 160 días en el máximo, comparándolo con el ascenso y el descenso del ciclo 21. En el último bloque, se muestra el espectro global del ciclo 23, junto con el espectro para el radio del sol a lo largo de todo este ciclo. Se puede observar que se descorrelacionan en el 4º armónico, pero están en fase para periodos menores.

Si se considera el acople de tres modos de oscilación en el plasma, la condición para que pueda existir transferencia de energía entre un modo excitado (el fundamental de frecuencia ω_1) y sus armónicos está dada por:

$$\omega_1 > \omega_2, \omega_3 \Rightarrow \omega_1 = \omega_2 + \omega_3 \text{ resonant conditio.}$$

$$k_1 = k_2 \pm k_3 \Rightarrow \alpha(k) \text{ well defined}$$

En un plasma la relación de dispersión puede ser altamente no lineal, conduciendo a que no se excitan exactamente los armónicos, sino frecuencias próximas a estos, de modo que el ancho de banda $\Delta\omega$ puede ser un proxy de la relación de dispersión. El dato relevante para esta discusión es que las condiciones indicadas se cumplen ampliamente en los modos encontrados en el análisis wavelet, incluso en varios ciclos se está cerca de la condición resonante.

2) Radio solar

La medición del radio solar es delicada y puede realizarse por distintas técnicas. En la actualidad no se han explorado la gama de periodos estudiados aquí, aunque en datos pretéritos (1683 a 1718) fue identificada una signatura en 155 días (Ribes⁽¹²⁾). Nuestra búsqueda se orientó a probar la posible influencia de la periodicidad en un parámetro que involucra a todo el sol como su radio. Los espectros obtenidos corresponden al intervalo 1992.5 a 2003.41 (ciclos 22 y 23), al ciclo 23 (Figura 4), y al máximo de este ciclo (Figura 3). Se adjunta el escalograma de áreas de manchas solares correspondiente al máximo del ciclo 23 (Figura 5a) y el escalograma del radio solar para el mismo intervalo (Figura 5 b).

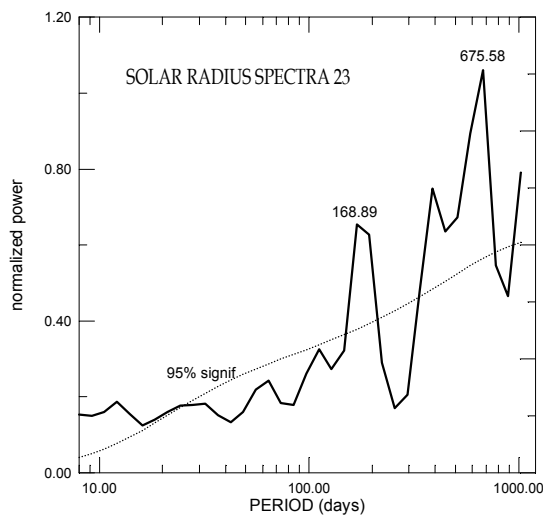


Figura 3: Espectro wavelet del radio solar para el máximo del ciclo 23, se puede apreciar la presencia de un periodo de 168 días y su 4° armónico, lo que indica que esta oscilación involucra un fenómeno global en el sol.

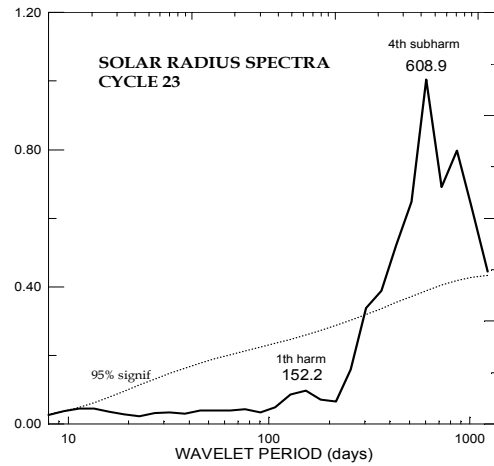


Figura 4: Al considerar todo el ciclo 23, se atenúa el fundamental y se afina el 4° armónico.

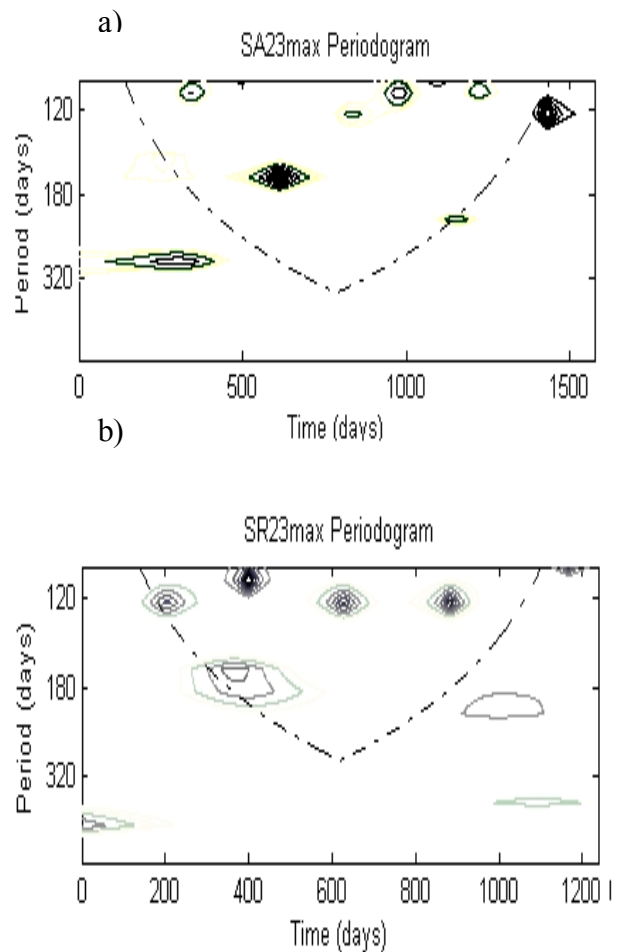


Figura 5:a) Escalograma para las áreas de manchas solares durante el máximo del ciclo 23. Las zonas de mayor brillo indican mayor intensidad. Se pueden observar presentes la signatura en 160 días y el 2° armónico de este.

Figura 5:b) Escalograma para el radio del sol para el mismo intervalo. Aparecen claramente un pico próximo al periodo de 160 días. La línea de trazos representa el nivel de 95 % de significación.

IV. CONCLUSIONES

Es concluyente la evidencia de la no desaparición de la oscilación de 160 días, y su acople con submodos cuyo estudio puede permitir anticipar eventos de emergencia de flujo magnético. La aparición de esta señal en el radio del sol muestra que es una oscilación real que involucra a todo el sol. Es menester continuar este estudio con los numerosos datos de parámetros solares existentes y desarrollar el marco teórico para comprender la transferencia de energía en ondas que afectan el funcionamiento del dínamo solar.

Agradecimientos

Al Dr. Guillermo G. De Castro y al INPE-Centro de Radioastronomía y Astrofísica Mackenzie CRAAM, por haber provisto los datos de radio solar, a la Universidad de Buenos Aires, UBACyT X-329 y Cátedra de Física CBC, al Instituto de Astronomía y Física del Espacio IAFE.

Referencias

- 1 - Rieger E. et al. Nature **312**, 623-625
- 2 - Lean J. Astrophys. J. **363**, 718-727 (1990)
- 3 - Oliver R., Ballester J. L. & Baudin F. Nature **394**, 552-554 (1998)
- 4 - Duhau, S. Sol. Phys., **213**, 203-212 (2003)
- 5 - Duhau S. & Chen C.Y. Geophys. Res. Lett. (2002)
- 6 - Ballester J. L., Oliver R., Baudin F. Ap. J **522**, L153-L156 (1999)
- 7 - Silva A.M. & Duhau S. Ann.AFA. Vol **14**, 292 – 297 (2003)
- 8 - Selhost, C.L., Silva A.V., Costa, J.E.R., A&A, **420**,1117-1121 (2004)
- 9 - Torrence CH. & Compo G.P. Bull. Am. Meteor.Soc. **79** (1) 61-78 (1998)
- 10 - Krivova, N.A. & Solanki, S.K., A & A, **394**, 701-706 (2002)
- 11 - Hill, M.E., Hamilton, D.C., Krimigis, S.M., Am. Geophys. Union Meeting (2001)
- 12 - Ribes, E., Merlin, Ph., Ribes, J.C., Bartholot, R., Ann.Geophys., vol 7, 321-329 (1989)