

## ESTADÍSTICA DE MANCHAS SOLARES Y TERREMOTOS EN CHILE

### STATISTICS OF SUNSPOTS AND EARTHQUAKES IN CHILE

Virginia Mabel Silbergleit<sup>1,2</sup> y Patricia Alejandra Larocca<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Gas y Petróleo, Facultad de Ingeniería, UBA

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup>Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Facultad de Ingeniería, UBA

#### RESUMEN

La actividad solar influye sobre el geosistema y una manifestación de esta actividad son las manchas solares. En el presente trabajo se realiza un estudio estadístico del número de manchas solares y del momento sísmico para terremotos con epicentros en Chile, durante los años 1906 al 2011. Se estudian periodogramas donde se verifican periodicidades de aproximadamente 11 y 22 años para el Sol y entre 2.4 y 8.5 años; 11-14 y 26.2 años para la magnitud sísmica. El coeficiente de correlación hallado para las series mencionadas fue de  $C = 0.6$ . Se obtuvieron buenos ajustes utilizando la función de Weibull para ambas series.

**Palabras claves:** manchas solares, periodicidades, sismos, estadísticas.

#### ABSTRACT

Solar activity influences the geosystem and this activity could be studied by sunspots. In this paper a statistical study of sunspots and the seismic moment of earthquakes with epicenters in Chile during the years 1906 to 2011 is done. We study periodograms in which periodicities of about 11 and 22 years for the Sun and between 2.4 and 8.5 years; 11-14 and 26.2 years for the earthquake magnitude are observed. The correlation coefficient between the above mentioned data was  $C = 0.6$ . For both data series the Weibull function showed good fits

**Keywords:** sunspots, periodicities, earthquakes, statistics.

#### INTRODUCCIÓN

El objetivo del estudio es observar las semejanzas y diferencias estadísticas entre el número de manchas solares y los terremotos en Chile. La ocurrencia de los terremotos tiene una distribución no homogénea sobre la superficie terrestre, en general, se producen en áreas donde se dan límites tectónicos diferentes. En el caso de Chile, el gran terremoto de magnitud sísmica 9.5 ocurrido en Valdivia, el 22 de mayo de 1960, (el mayor de la historia de la humanidad) se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

Chile se encuentra dentro del cinturón de fuego del Pacífico (larga cadena de volcanes y estructuras tectónicas activas que rodea el Océano Pacífico). Este es uno de los países con mayor sismicidad en el mundo. Durante el último siglo se observó un promedio de ocurrencia de terremotos destructores cada 10 años liberándose un alto porcentaje de la energía sísmica, debido principalmente a la interacción entre las placas de Nazca y Sudamérica. Estas placas convergen con una velocidad relativa del orden de 8 cm/a en la dirección N78°E, (Compte y Pardo, 1991). Esta tectónica provoca la subducción de la placa oceánica (Placa de Nazca) bajo el continente (Placa Sudamericana), proceso que genera esfuerzos suficientes para dar origen a sismos.

En la zona central de Chile, el rasgo batimétrico más destacado de la placa oceánica de Nazca es la dorsal de Juan Fernández, cadena de volcanes extintos, que es subductada alrededor de los 33°S.

Algunos de los montes submarinos más importantes de esta cadena son las islas de Juan Fernández que emergen sobre el nivel del mar y bajo el mar el monte O'Higgins pronto a subductar, cercano a la fosa oceánica, (Pardo, 2001).

Del estudio de la ocurrencia de sismos en sus países, diversos autores publicaron los siguientes resultados: a) Du Xinxing, S. (1997) frecuencias de 7; 14; 22 y 42 años, b) Liritzis y Tsapanos( 1992) frecuencias de 3; 4.5; 6.5: 8: 9, 14-20 y 31-34 años y c) Madhava Rao and Kaila (1986) valores entre 3 y 12 años.

De acuerdo a las observaciones mostradas en USGS (<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq1/measure.html>), la cantidad de sismos débiles es mayor que la correspondiente a sismos destructivos, a sismos mayores y a grandes sismos. Ritz (1984) y Serrano y col, (2003) han investigado la relación entre las actividades solar y sísmica. Mazzarella y Palumbo (1988) a partir de estudios de terremotos en Italia indicaron que la actividad solar y las anomalías magnéticas son propensas a desencadenar terremotos.

Han y col. (2004) estudiaron la relación entre la actividad solar y los grandes terremotos ( $M_w \geq 8$ ) en China. Ellos observaron un aumento en la cantidad de sismos en los años de máxima actividad solar. Sobolev y col. (1998) y Zolotov y col. (2010) proponen la existencia de una interacción entre el viento solar, la radiación de partículas y los terremotos.

Tavares y Acevedo (2011) encontraron relaciones entre el incremento de eventos solares durante la última mitad del siglo XX y la intensificación de la ocurrencia de terremotos.

Simpson (1967) vinculó la máxima frecuencia en la aparición de terremotos con la moderada y alta actividad solar.

Las manchas solares son áreas oscuras sobre la superficie del mismo que contienen fuertes campos magnéticos. El tamaño de una mancha solar moderada es muchas veces mayor que el de la Tierra, las mismas pueden permanecer por semanas o meses antes de desaparecer. Debido a la rotación solar, las manchas muestran movimientos de izquierda a derecha.

La periodicidad media de 11 años fue observada por primera vez por Heinrich Schwabe (1789-1875) y la de 22 años lleva el nombre de George Ellery Hale (1868-1938) quién descubrió que las manchas solares se deben a la acción del campo magnético solar que limita la emisión de radiación del Sol. El número de manchas solares ( $R_z$ ) es un observable vinculado con la intensidad de la componente toroidal del campo solar global.

Duhau y Martinez (2012) estudiaron las transiciones de la dínamo solar y su vinculación con los rápidos cambios climáticos. Presentaron variables solar-terrestres asociadas a fenómenos solares algunas de ellas aptas para producir actividad sísmica.

En el presente trabajo se estudiaron los valores de la magnitud sísmica superficial ( $M_s$ ) y del número de manchas solares ( $R_z$ ) utilizando:

- Periodogramas de  $R_z$  y  $M_s$  obtenidos mediante la transformada rápida de Fourier.
- Regresión lineal entre  $R_z$  y  $M_s$  considerando los valores máximos anuales.
- Distribuciones estadísticas aplicadas a los máximos del momento sísmico,  $M_s$  y de las manchas solares  $R_z$ .

## DATOS Y METODOLOGÍA

Una magnitud sísmica es una medida relacionada con la cantidad de energía liberada en forma de ondas. Se puede considerar como el tamaño relativo de un temblor y se determina tomando el logaritmo (base 10) de la amplitud máxima de movimiento de alguna onda superficial a la que se le aplica una corrección por distancia al epicentro y profundidad local. Se define  $M_s$  a la magnitud adimensional de ondas superficiales por:

$$M_s = \log(A/T) + 1,66 \log(D) + 3,3$$

Donde:

D= distancia foco-estación

A= amplitud de movimiento de suelo

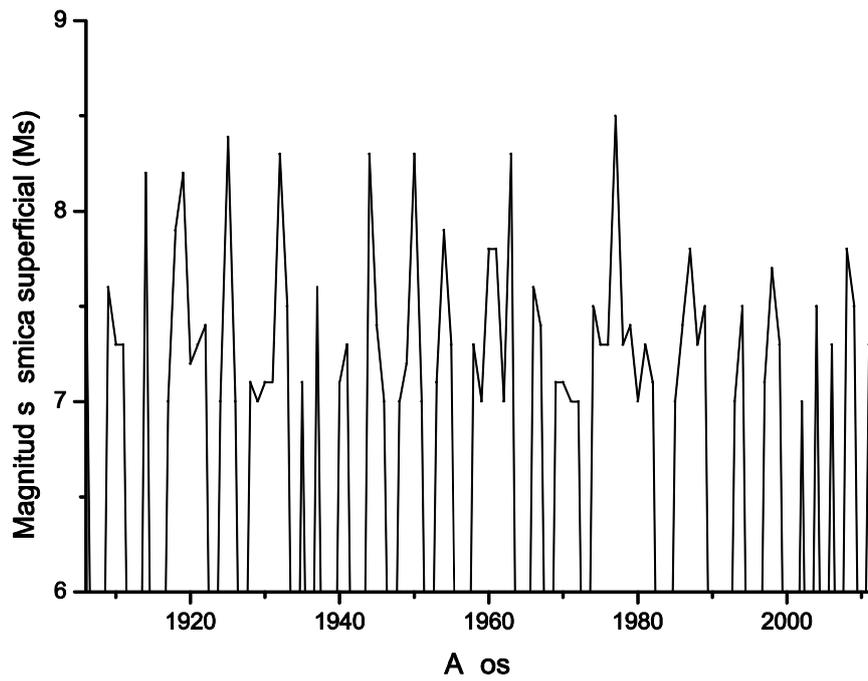
T=período de la onda lineal

Los datos sísmicos se obtuvieron a través del Servicio Sismológico de la Universidad de Chile (<http://ssn.dgf.unchile.cl>). Se consideraron los sismos con  $M_s \geq 7$  para el período 1906-2011 (La Figura 1 muestra el gráfico de los datos correspondientes).

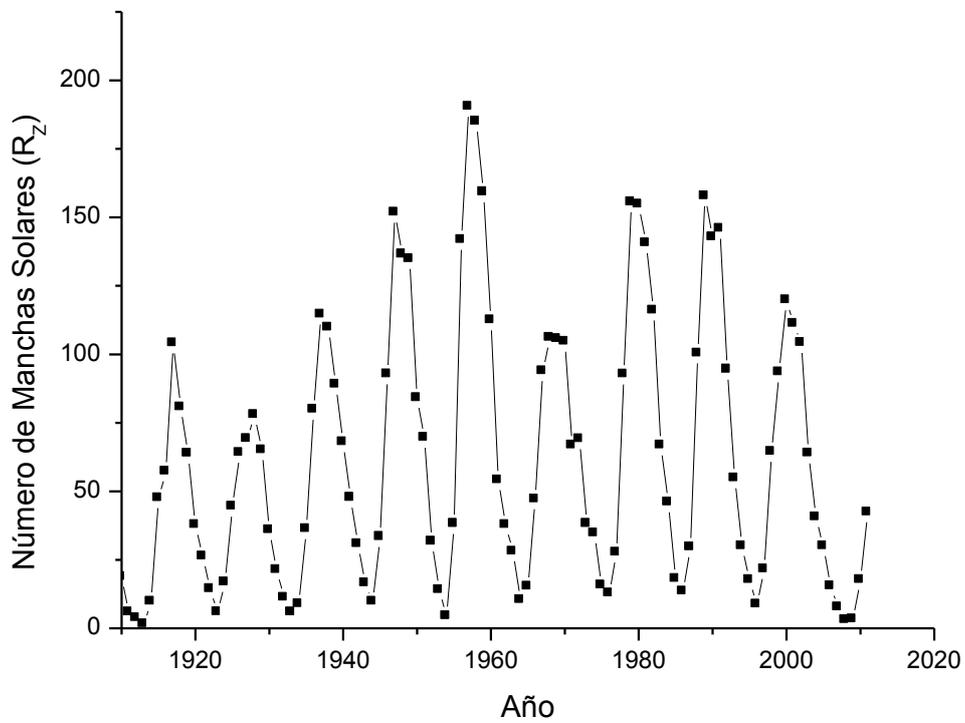
Terremotos observados en Chile han sido estudiados previamente por Silbergleit y Prezzi (2012) quienes estimaron los valores máximos esperables para la próxima década.

El número de manchas solares  $R_z$  es la magnitud que mide el número y tamaño de las manchas solares. Los valores promedios anuales de  $R_z$  se obtuvieron a través de Nacional Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/>), la Figura 2 muestra el gráfico de los datos correspondientes.

Trabajos vinculados a la actividad solar fueron previamente publicados por Silbergleit y Larocca, (2001, 2005).



**Figura 1.** Ms para terremotos de Chile (valor medio anual) desde 1906 a 2011.  
**Figure 1.** Ms for Chilean earthquakes (annual average) since 1906 to 2011.



**Figura 2.** Número de manchas solares (promedio anual) desde 1906 a 2011.  
**Figure 2.** Number of sunspots (annual average) since 1906 to 2011.

## RESULTADOS DEL ANALISIS DE LAS SERIES

### a) Estudio de periodogramas

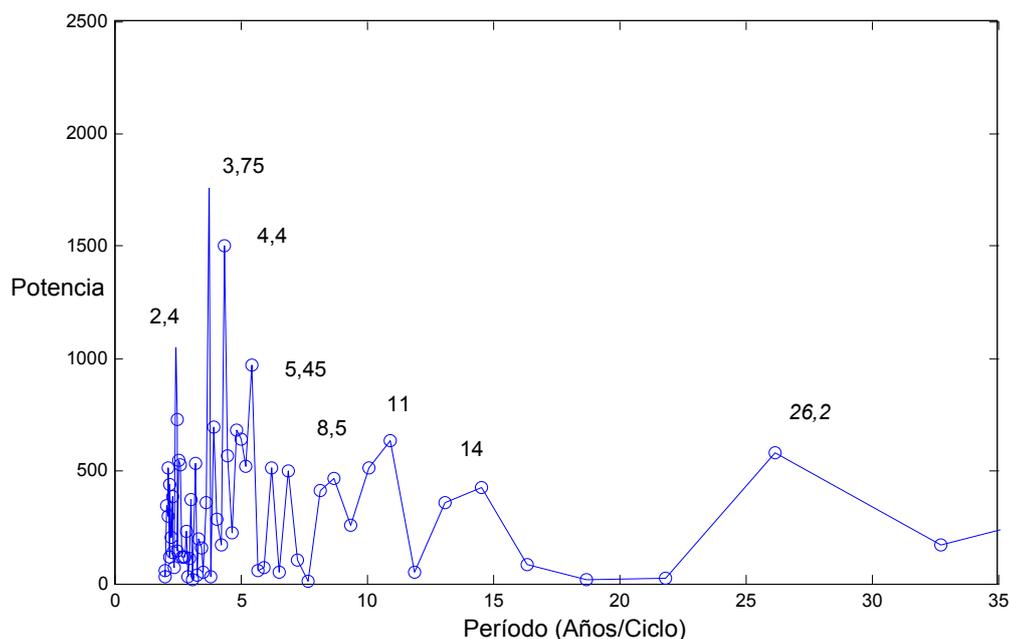
Para estimar las periodicidades de  $M_s$  y  $R_z$  se realizaron los espectros de potencia. En la Figura 3 se muestra el espectro de potencia de las serie  $M_s$  en función del tiempo. Se observan picos de 2.4; 3.75; 4.4; 5.45; 8.5; 11-14 y 26,2 años. En Chile durante el período citado se detectaron el número de sismos mostrado en la Tabla 1.

$M_s$	Número de terremotos
Menores a 7	57
7,1 -7,5	54
7,6 -8	11
8,1 -8,5	8
8,6 -9	1

**Tabla 1.** Número de terremotos observados en Chile entre 1906 y 2011 según su magnitud sísmica superficial.

**Table 1.** Number of earthquakes observed in Chile between 1906 and 2011 according to their surface seismic magnitude.

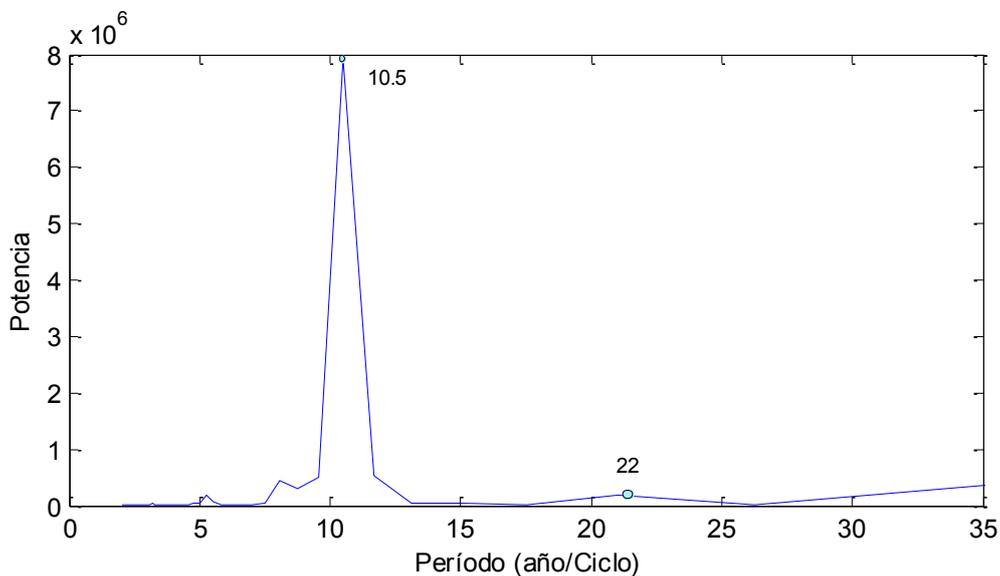
Los picos de 11 y 26,2 años podrían asociarse con los que aparecen en la Figura 4 para  $R_z$ .



**Figura 3.** Periodograma correspondiente al  $M_s$  para el período 1906-2011 (el máximo corresponde a 3,75 años y luego pueden notarse picos de 4,4; 5,45; 8,5; 11; 14 y 26,2 años).

**Figure 3.**  $M_s$  periodogram for the period 1906-2011 (the maximum corresponds to 3.75 years and spikes of 4.4; 5.45; 8.5; 11; 14 and 26.2 years can be identified).

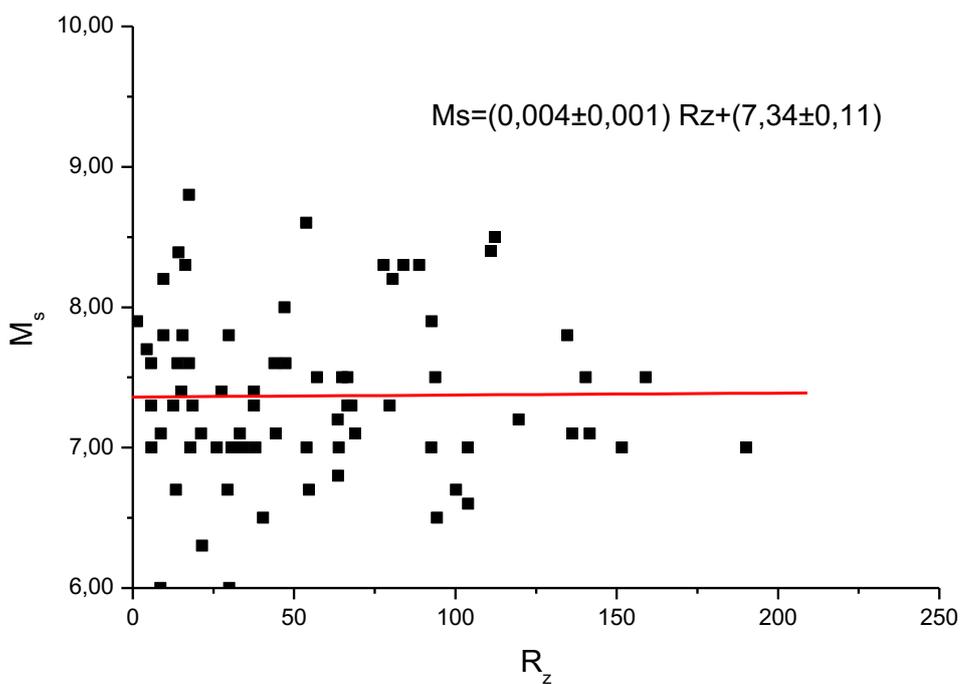
En la Figura 4 se muestra el espectro de potencia de las serie  $R_z$  en función del tiempo. Se observan dos picos de 10.5 años y de 22 años, que se corresponden con el ciclo de Schwabe y el de Hale respectivamente.



**Figura 4.** Periodograma correspondiente a  $R_z$  para el intervalo 1906-2011 (el máximo corresponde a 10,5 años).  
**Figure 4.**  $R_z$  periodogram for the period 1906-2011 (the maximum corresponds to 10.5 years)

**b) Regresión lineal entre  $M_s$  y  $R_z$**

Se analizó la correlación temporal entre los promedios anuales de  $M_s$  y  $R_z$ . El coeficiente de correlación entre ambas series temporales fue de  $C= 0.6$ . La Figura 5 muestra el ajuste y la ecuación de la recta de regresión.



**Figura 5.**  $R_z$  vs  $M_s$  para el período 1906-2011.  
**Figure 5.**  $R_z$  vs.  $M_s$  for the period 1906-2011.

### c) Análisis de funciones de distribución

Cada fenómeno aleatorio genera su propia variable aleatoria que se distingue además por su naturaleza física, por la probabilidad asociada a cada valor posible caracterizada por su función de distribución o probabilidad acumulada. Muchas veces es conveniente calcular la derivada de la función de distribución llamada densidad de probabilidad pues ésta mide la forma en que se agrupan las observaciones de una eventual muestra para distintos valores de la variable.

Se analizaron distintas funciones de densidad de probabilidad para los valores máximos de  $R_z$  por ciclo solar y  $M_s$ .

La determinación, el análisis y la validación a partir de la prueba de Kolmogorov-Smirnov permite obtener una estimación de la curva representativa a partir de los resultados muestrales. En las Tablas 2 y 3 se muestran los ajustes de dichas funciones para  $R_{zMax}$  y su ordenamiento por el criterio de máxima verosimilitud y calidad de ajuste ( Mermoz y García, 2006).

Modelo	L	P
Weibull	-115.97	0.9919
Normal	-116.33	0.9908
Gamma	-116.44	0.9865
Gumbel Max	-117.01	0.9878
LogNormal	-117.07	0.9779
Gamma Inv	-118.04	0.9650
Gumbel Min	-117.79	0.9665
Exponencial	-131.10	0.7907

**Tabla 2** Modelos de distribuciones propuestos para  $R_{zMax}$ . (L es el logaritmo de la máxima verosimilitud y P es el parámetro de ajuste lineal).

**Table 2.** Distribution models proposed for  $R_{zMax}$ . (L is the logarithm of the maximum verosimilitude and P is the linear adjustment parameter).

	$\omega$	$\beta$
<b>Método de Momentos</b>	3.092	122.97
<b>Ajuste lineal</b>	2.991	123.42
<b>Máxima verosimilitud</b>	3.219	123.02

**Tabla 3.** Coeficientes  $\omega$  y  $\beta$  de la distribución de Weibull, obtenidos a partir de los distintos ajustes.

**Table 3.**  $\omega$  and  $\beta$  coefficients of the Weibull distribution, calculated for the different adjustments.

En la Tabla 2 se observa que las distribuciones que mejor ajustan  $R_{zMax}$  son las de Weibull y la Normal (con  $P = 0.99$ ). En la Tabla 4 se muestra que las mismas funciones de distribución son las que también mejor ajustan  $M_{sMax}$  (con  $P=0.96$ ). Se consideraron los valores de los parámetros obtenidos por el método de ajuste lineal que son mostrados en las Tablas 3 y 5, respectivamente.

Modelo	L	P
Normal	-98.955	0.9621
Weibull	-100.07	0.9581
Gamma	-102.44	0.9419
Gumbel Min	-104.14	0.9166
LogNormal	-104.83	0.9276
Gamma Inv	-107.87	0.9105
GumbelMax	-118.17	0.7844
Exponencial	-239.41	0.4683

**Tabla 4** Modelos de distribuciones propuestos para  $M_{sMax}$ . L es el logaritmo de la máxima verosimilitud y P es el parámetro de ajuste lineal.

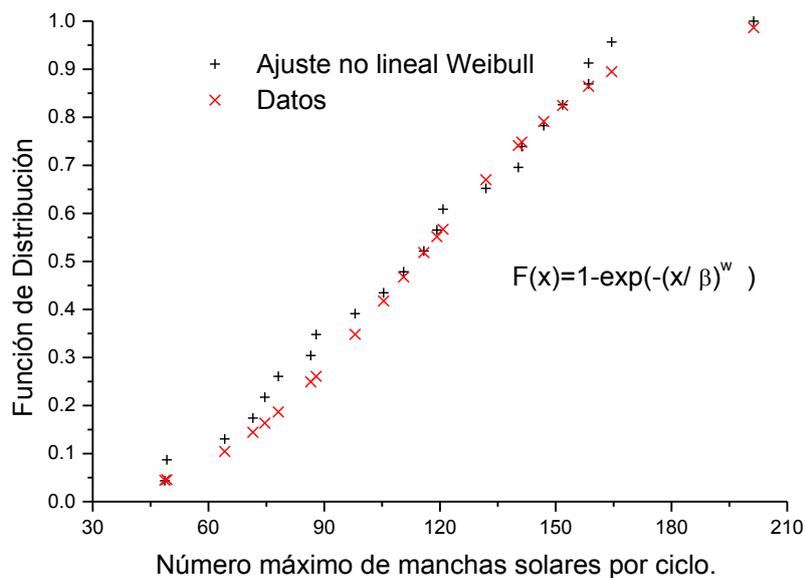
**Table 4.** Distribution models proposed for  $M_{sMax}$ . L is the logarithm of the maximum verisimilitude and P is the linear adjustment parameter.

	$\omega$	$\beta$
<b>Método de Momentos</b>	10.313	74.210
<b>Ajuste lineal</b>	93.982	74.524
<b>Máxima verosimilitud</b>	93.051	74.181

**Tabla 5.** Coeficientes  $\omega$ ,  $\beta$  de la distribución de Weibull, para  $M_{sMax}$  por los métodos especificados.

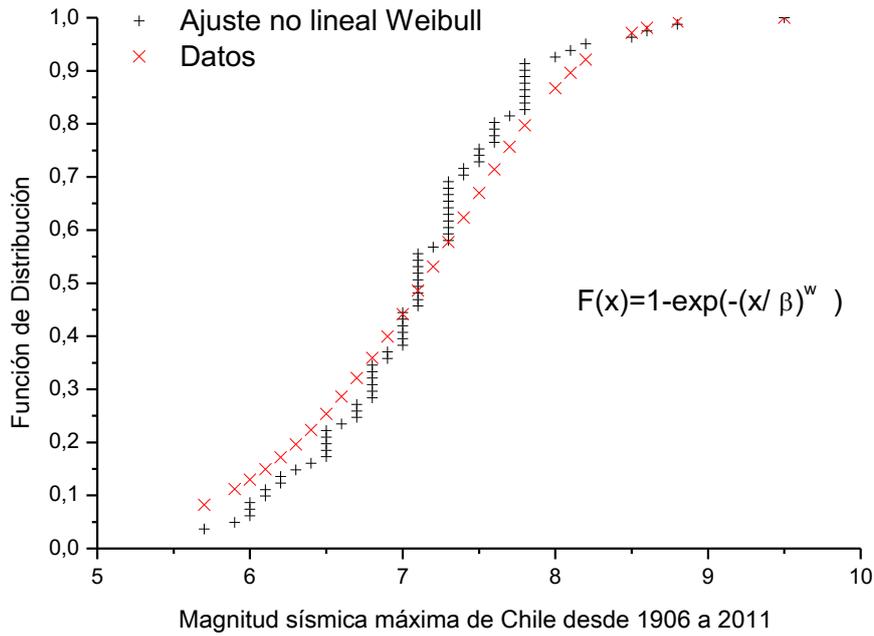
**Table 5.**  $\omega$  and  $\beta$  coefficients of the Weibull distribution, calculated for  $M_{sMax}$  using the specified methods.

Los datos fueron procesados con el programa MOVAC (Mermoz y García, 2006). Los resultados se muestran en las Figuras 6 y 7.



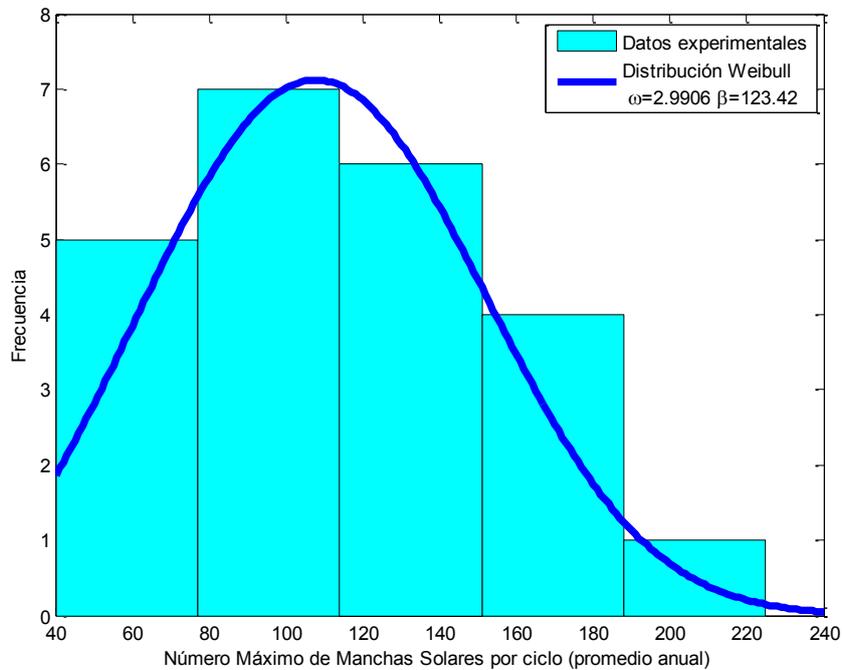
**Figura 6.** Función de distribución para el número máximo de  $R_{zMax}$  desde el ciclo solar 1 al 23.

**Figure 6.** Distribution function for the maximum number of  $R_{zMax}$  since solar cycle 1 to 23.

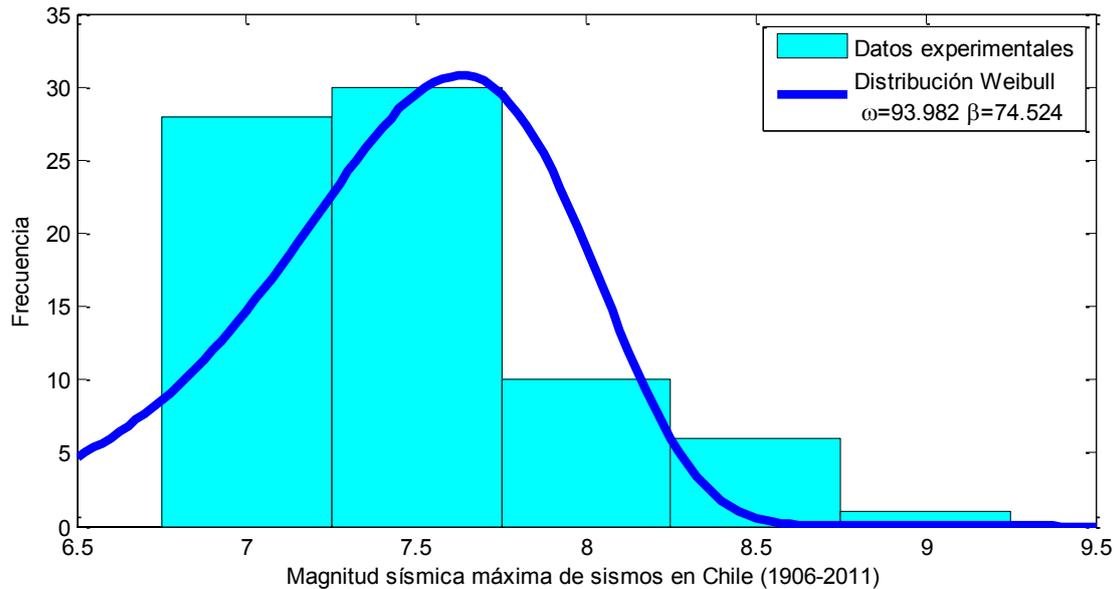


**Figura 7.** Función de distribución para  $M_{sMax}$ .  
**Figure 7.** Distribution function for  $M_{sMax}$ .

En las Figuras 8 y 9 se muestran los histogramas para el número  $R_{zMax}$  y  $M_{sMax}$ . Se representaron las funciones de densidad de probabilidad obteniéndose que el 66% de los  $R_{zMax}$  y el 72% de los  $M_{sMax}$  se encuentran en los intervalos  $70 \leq R_{zMax} \leq 150$  manchas y  $7.5 \leq M_{sMax} \leq 8.5$  respectivamente.



**Figura 8.** Histograma correspondiente a  $R_{zMax}$  y la función de densidad de Weibull.  
**Figure 8.** Histogram corresponding to  $R_{zMax}$  and Weibull density function.



**Figura 9.** Histograma correspondiente a  $M_{sMax}$  y la función de densidad de Weibull.  
**Figure 9.** Histogram corresponding to a  $M_{sMax}$  and Weibull density function.

## CONCLUSIONES

A partir del presente estudio se concluye que:

1- utilizando el método de Transformada Rápida de Fourier para el análisis de las periodicidades en  $M_s$  y  $R_z$  durante los últimos cien años se encontraron periodicidades similares a las obtenidas en trabajos previos. Estos corresponden a distintos países, sin embargo los resultados son consistentes, y podrían explicarse considerando que el número de sismos débiles es mayor que el correspondiente a sismos destructivos, sismos mayores y grandes sismos, en consecuencia las frecuencias que aparecen en la Figura 3 estarían vinculadas a los diferentes períodos de ocurrencia sísmica. Para el caso de  $R_z$  aparece claramente el período conocido como ciclo de Schwave (en 10.5 años ver Figura 4) y el de Hale. Periodicidades similares se observaron en  $M_s$  (con valores de 11 y 26.4 años, (ver Figura 3).

2- el coeficiente de correlación entre el  $R_z$  y  $M_s$  ( $C=0.6$ ) muestra una intensidad de la relación lineal entre ellos que podría ser denominada "moderada" ya que es un 40% menor que una correlación fuerte y un 60% mayor que una débil. Este resultado podría deberse al azar por lo cual no significa que obligadamente exista una relación lineal causa-efecto entre las dos variables.

3- a partir del análisis de funciones de probabilidad para  $R_{zMax}$  y  $M_{sMax}$ , y utilizando para ambas series la distribución de Weibull se obtuvieron buenos ajustes en los dos casos, por lo tanto podemos asegurar que esta distribución es apropiada para utilizarse con los datos estudiados. Este hecho también se manifiesta en las funciones de densidad de probabilidad graficadas sobre los histogramas para  $R_{zMax}$  y  $M_{sMax}$ .

Los resultados antes mencionados muestran las semejanzas y diferencias obtenidas para las series estudiadas. Futuros estudios de modelado físico y estadístico contribuirán a completar el análisis aquí presentado.

**Agradecimientos.** Este trabajo se ha realizado con recursos económicos correspondientes a los proyectos: PIP N° 11420090100258 (CONICET) y PIP N° 20020090100131 (UBACYT), Argentina. Las autoras agradecen las importantes correcciones y sugerencias realizadas por los revisores.

## REFERENCIAS

Comte, D., y M. Pardo, 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and Southern Peru seismic gap: *Natural Hazards* 4: 23-44.

- Duhau, S. y E. A. Martinez, 2012. Solar dynamo transitions as driver of sudden climate changes. In Global Warming-Impacts y Future Perspective. Ed. Bharat Raj Singh, ISBN 978-953-51-0755-2, In Tech. doi: 105772/51814.
- Du Xinxing, S., 1997. Wavelets data based analysis of dynamic seismicity period: Earthquake, 17,3: 259-264.
- Han, Y.B., Guo, Z.J., Wu, J. y L.H. Ma , 2004. Possible triggering of solar activity to big earthquakes ( $M_s \geq 8$ ) in faults with near west-east strike in China: Science in China Series GPhysics, Mechanics y Astronomy, 47: 173-181.
- Liritzis I. y T. M. Tsapanos , 1992. Probable evidence for periodicities in global seismic energy release: Earth, Moon y Planets, 60 (2): 93-108.
- Madhava Rao, N. y K. L. Kaila , 1986. Model of earthquake energy periodicity in the Alpide-Himalayan seismotectonic belt: Tectonophysics, 124 (3-4): 261-270.
- Mazzarella, A. y A. Palumbo , 1988. Solar geomagnetic and seismic activity: Nuovo Cimento C, Serie 1: 353-364.
- Mermoz O. y R. García, 2006. Distribuciones univariantes de probabilidad: modelos y su identificación. Edit. Nueva Librería. Buenos Aires, Argentina. 1ra. Ed. 218p.
- Pardo M., Informe de la Actividad Sísmica del 09 de Abril de 2001. Servicio Sismológico. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.(<http://ssn.dgf.unchile.cl>).
- Ritz, M. 1984. Short communication: A high conductivity anomaly on the West African craton (MALI). Journal of Geophysics, 55: 182-184.
- Serrano I., Zhao, D., Morales, J. y F. Torcal , 2003. Seismic tomography from local crustal earthquakes beneath eastern Rif Mountains of Morocco: Tectonic Physics, 367: 187-201.
- Silbergleit V. y P. Larocca, 2001. Estimate of the upper limit of amplitude of solar cycle no.23, Atmósfera. 3.
- Silbergleit, V.M. y P. A. Larocca, 2005. Geomagnetic activity y solar cycles. Advances in Space Research vol. 36 issue 12 2005. 2384-2387.
- Silbergleit V. M. y C. Prezzi., 2012. Statistics of major Chilean earthquakes recurrente. Natural Hazards, 62, 2 , 445-458. DOI: 10.1007/s11069-012-0086-8.
- Simpson J. F., 1967. Solar Activity as a triggering mechanism for earthquakes. Earth y Planetary Science Letters, 3:417-425.
- Sobolev, G.A., Shestopalov, I. P. y E.P Kharin, 1998. Geoeffective solar flashes and seismic activity of the Earth: Fizika Zemli (in Russian), 7: 85-90.
- Tavares, M. y A. Azevedo , 2011. Influences of Solar Cycles on earthquakes: Natural Science, 3 6: 436-443.
- Zolotov O.V., Namgaladze, A. A., Zkharenkova, I. E., Shagimuratov, I. I. y O.V. Martynenko, 2010. Modeling of ionospheric earthquake precursors generated by various electric field sources: Natural Hazards Earth System Sciences, 10: 7-18. obtained from different  $M_s$  settings.

Recibido: 15-10-2013  
 Aceptado: 06-08-2014