

# **Cambios tipo Heaviside durante flares: Análisis de la componente en la línea de la visual y el vector campo magnético**

**Heaviside changes during flares:  
Analysis of the line-of-sight component and vector components of the magnetic field**

J. S. Castellanos-Durán <sup>a</sup>\*, L. Kleint <sup>b</sup>, B. Calvo-Mozo <sup>a</sup>.

<sup>a</sup>*Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 45 # 26-85 Bogotá D.C., Colombia.*

<sup>b</sup>*University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland, Bahnhofstrasse 6, 5210 Windisch, Switzerland*

Aceptado xxxx; Publicado en línea xxxx.

ISSN 2256-3830.

## **Resumen**

Los Flares son fenómenos muy energéticos en la atmósfera solar observados en todo el espectro electromagnético, desde rayos  $\gamma$  hasta el radio. El único proceso físico capaz de almacenar esta gran cantidad de energía ( $\sim 10^{32}$  erg) y liberarla en minutos es el campo magnético. La reconexión de las líneas de campo magnético acelera partículas, y así estas partículas se precipitan hacia la atmósfera solar baja, calentando y moviendo plasma a lo largo de su camino. Para entender mejor los procesos flare, es necesario investigar la estructura y cambios del campo magnético en la atmósfera solar. Durante las pasadas décadas, diversos autores han encontrado cambios tipo paso en la componente de la línea de la visual del campo magnético durante flares. Analizamos la componente en la línea de la visual del campo magnético durante siete flares ocurridos en el presente ciclo solar. Estos eventos ocurrieron entre Febrero y Septiembre del 2011, y tuvieron clasificaciones GOES entre M1.4 y X6.9. Encontramos cambios y transientes del campo magnético con valores más grandes a  $3\sigma$ . Nuestro propósito es crear una muestra estadística grande de cambios relacionados con flares para el campo magnético, lo cual nos permitirá determinar cómo es la reorganización del campo magnético 3D durante flares.

**Palabras Claves:** Flares Solares, Liberación de energía, Observaciones del vector campo magnético.

## **Abstract**

Flares are highly energetic phenomena in the solar atmosphere observed throughout the electromagnetic spectrum, from  $\gamma$ -ray to radio emission. The only physical process able to release such an amount of energy ( $\sim 10^{32}$  erg) within minutes involves magnetic fields. It is believed that reconnection of magnetic field lines accelerates particles, and then these particles precipitate into the lower solar atmosphere, heating and moving plasma along the way. To better understand flare processes, it is necessary to investigate the structure and changes of the magnetic field in the solar atmosphere. During the past decades, several authors have found stepwise changes in the line-of-sight component of the magnetic field during flares. We analysed the magnetic line-of-sight during seven flares from the current solar maximum. These events occurred from February to September 2011 and have GOES classifications from M1.4 to X6.9. We found

\* jscastellanosd@unal.edu.co

stepwise and transient changes of the magnetic field with values greater than  $3\sigma$ . Our goal is to create larger statistics of flare-related changes and especially to investigate the vector magnetic field, which allows us to determine how the 3D magnetic field rearranges during flares.

**Keywords:** Solar flares, Energy release, Vector Magnetic field observations.

## 1. Introducción

Las fulguraciones o *flares* fueron observados por primera vez en el siglo 19 separadamente por Carrington [1] y Hodgson [2] el primero de Septiembre de 1859. Desde esa época esta clase de eventos astrofísicos han sido estudiados ampliamente. En el modelo estándar de flares [3] reconoce a la reconexión magnética como la responsable de liberar la energía almacenada en los campos magnéticos coronales; acelerando con ello partículas y precipitándolas hacia capas más bajas de la atmósfera solar lo que produce un calentamiento de la localidad y movimientos de plasma a lo largo de todo su camino [4].

Diversas observaciones han mostrado cambios abruptos y persistentes en el campo magnético durante flares en escalas de tiempo de minutos e.g. [5, 6, 7]. Aunque existe una estrecha relación entre los cambios en el campo magnético y los flares, el modelo estándar de flares asume que los campos magnéticos fotosféricos no cambian debido al proceso flare [5, 8]. En particular Sudol & Harvey del 2005 [5] estudiaron cómo se comporta la componente en la línea de la visual de los campos magnéticos fotosféricos usando los datos medidos en la línea del Ni I con una longitud de onda 6768 Å. Calculando la fuerza de Lorentz aplicada a la fotosfera por los campos magnéticos coronales, asumiendo el modelo de McClymont, se han encontrado evidencias de que existen más cambios, en las componentes del campo magnético en la dirección normal a la de la visual, que incrementan contrario aquellos que decaen los cuales son del orden de  $10^{22}$  dinas. En otras palabras, estimando cuánta energía de la liberada por el flare se usa en reorganizar los campos magnéticos fotosféricos asumiendo un equilibrio de fuerzas; llegando a la conclusión que dichos campos se vuelven más verticales debido al proceso flare. Estos resultados están acordes con la imagen de que los campos se vuelven más horizontales para producir ondas sísmicas [6].

Table 1  
Descripción de la fecha, hora de inicio, hora de pico y hora del final del evento, así como la clase GOES de los flares seleccionados.

Evento	Fecha	Inicio	Final	Pico	Clase
1.	09 08 2011	07:48:00	08:08:00	08:05:00	X6.9
2.	24 09 2011	09:21:00	09:48:00	09:40:00	X1.9
3.	30 07 2011	02:04:00	02:12:00	02:09:00	M9.3
4.	18 02 2011	09:55:00	10:11:00	10:00:00	M6.6
5.	14 03 2011	19:30:00	19:52:00	19:38:00	M4.2
6.	07 03 2011	19:43:00	20:12:00	20:01:00	M3.7
7.	03 08 2011	04:29:00	04:35:00	04:32:00	M1.7

Algunos resultados son consistentes con *el síndrome del flare grande* [9] en estudios de campos magnéticos fotosféricos durante la fase impulsiva de los flares [10]. En esta fase es donde se emite la mayor cantidad de energía, y se ha detectado por el satélite RHESSI una rápida emisión  $> 100$  keV correlacionada con los cambios en los campos magnéticos longitudinales. De igual manera se reportaron variaciones rápidas irreversibles en la vecindad de la línea magnética neutral en la atmósfera solar durante el “Bastille Day Flare”[7].

Las técnicas de medida y los códigos de inversión para obtener el vector de completo de campo magnético han avanzado considerablemente en las últimas décadas [11]. Estos avances tecnológicos han permitido calcular la cizalladura magnética de la región activa antes y después de un evento concluyendo que existen variaciones de esta debida al proceso flare. Por último, en un estudio reciente de dos flares de clase X homólogos que ocurrieron en Septiembre 6 del 2011 se observaron cambios en el ángulo de inclinación de campo magnético fotosférico [12].

## 2. Observaciones

Se analizó 7 flares ocurridos durante el máximo solar 24 con GOES clases entre M1.7 hasta X6.9. Esta muestra se seleccionó teniendo en cuenta que todos los eventos hayan sido observados por los satélites Solar Dynamics Observatory (SDO), Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) y el Solar-B (Hinode). En la tabla 1 se describen las propiedades básicas de la muestra seleccionada.

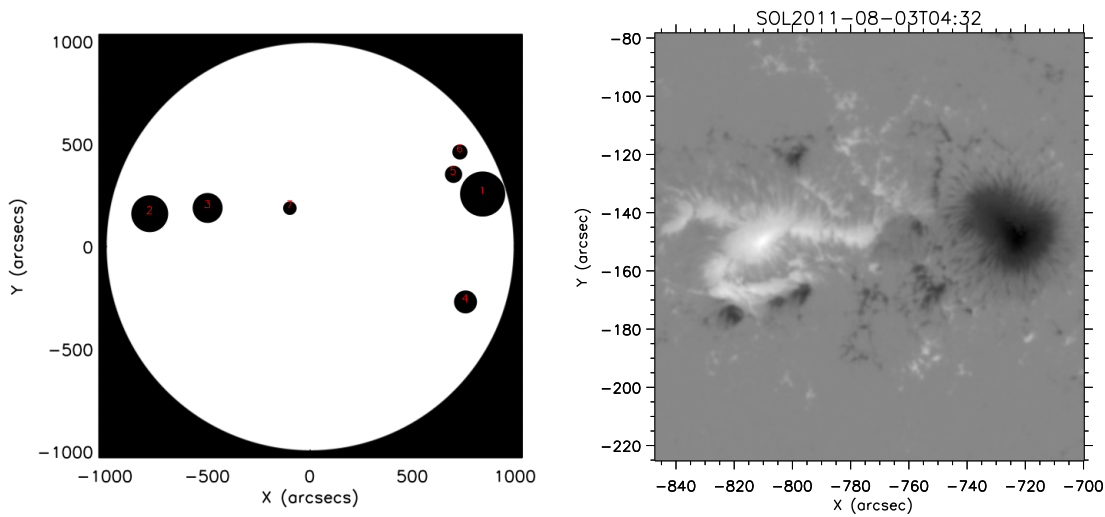


Fig. 1: *Izquierda* - Localización de los eventos estudiados, donde la ubicación de los círculos negros representa la localización de los eventos y su tamaño está escalado a la clase GOES de cada flare. *Derecha* - Ejemplo una de las regiones activas que hospedó al evento SOL2011-08-03T0432.

Para analizar la muestra de flares, hemos empleado las imágenes de campo magnético en la línea de la visual tomadas por el instrumento Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) a bordo del satélite SDO. Los intervalos de observación fueron de noventa minutos para cada evento, donde cada rango temporal se centra en el pico GOES de cada evento. La cadencia del instrumento es de 45 segundos, lo que quiere decir que para cada evento se tiene una secuencia de 120 imágenes de campo magnético fotosférico ( $\sim 530$  GB de datos analizados). Para el interés de este trabajo, el área seleccionada cubre completamente la región activa que hospedó al flare y es centrada en las coordenadas heliocéntricas dadas por RHESSI. Cada secuencia de imágenes fueron co-alineadas sustrayendo la rotación diferencial solar usando la rutina *drot\_map.pro* bajo el entorno *SSWIDL*. La localización heliográfica de los 7 eventos seleccionados se encuentra en el panel izquierdo de la figura 1, donde el tamaño de los círculos negros es proporcional a la clase GOES del evento. A la derecha de esta figura 1 se encuentra representada la región activa que albergó el evento SOL2011-08-03T0432.

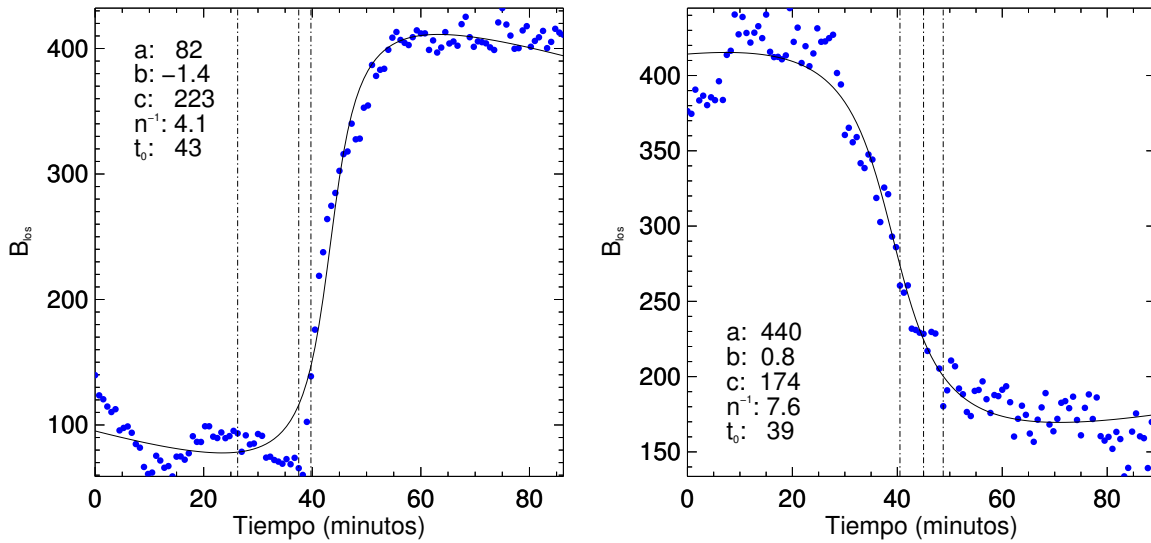


Fig. 2: Mejor ajuste de la función tipo escalón 1 a los perfiles de evolución de campo magnético ocurridos en los flares X1.9 SOL2011-09-24T09:40 (Izquierda) y M9.3 SOL2011-07-30T02:12 (Derecha)

### 3. Discusión

Sudol & Harvey 2005 [5] propusieron un función tipo Heaviside para cunficar los cambios irreversibles en los campos magnéticos longitudinales dada por

$$B_l(t) = a + bt + c \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1}[n(t - t_0)] \right\} \quad (1)$$

donde  $t$  representa el tiempo,  $a$  y  $b$  el modelo de evolución de la señal de fondo,  $c$  consiste en la mitad de la amplitud del cambio,  $t_0$  representa el punto medio del cambio en el campo, y  $n$  es el inverso de la escala de tiempo en la cual se produce el cambio en el campo. Es importante recalcar que esta forma funcional se utiliza para cuantificar los cambios tipo paso por lo que hay que tener cuidado a la hora de sobre interpretar dicha forma funcional. Se realizó el ajuste de la función (1) a toda la muestra, unos  $\sim 2.8 \times 10^4$  perfiles de evolución del campo  $B_{los}$ , usando un algoritmo de tipo Levenberg-Marquardt para mínimos cuadrados no lineales. La gráfica 2 muestra dos ejemplos de cambios irreversibles que tuvieron lugar en los flares X1.9 SOL2011-09-24T09:40 y M9.3 SOL2011-07-30T02:12.

Las condiciones aplicadas para escoger los candidatos a cambios irreversibles son: (i) la amplitud del paso debe ser mayor a  $3\sigma \gtrsim 150$  G; (ii) la pendiente de la señal de fondo debe ser menor a 3; (iii) el punto medio del paso debe estar en un intervalo de 20 minutos centrado en el pico del flare. Además de estas condiciones, se revisó visualmente uno por uno la muestra de perfiles ( $\sim 12000$ ) y sus ajustes respectivos para la escogencia final de la muestra.

Para cuantificar los cambios irreversibles se realizaron diagramas de densidades de los perfiles de campo a los cuales se les ha restado la señal de fondo lineal. Dicho diagrama equivale a una grilla de  $N \times M$ , donde  $N$  es el número de imágenes en la secuencia (120) y  $M$  equivale a 50 G. En cada pseudo-pixel de la grilla se cuenta el número de datos que sucedieron en el instante  $t$  y que tiene una intensidad dada. Se encontró que para los eventos existe una tendencia a encontrar más cambios de tipo positivo/negativo que no dependen de la clase del evento.

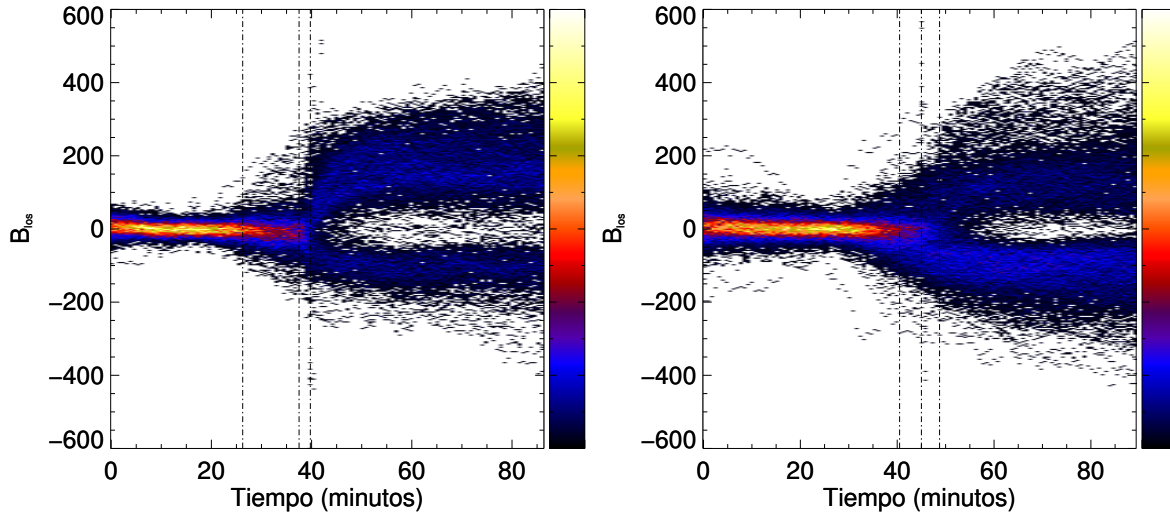


Fig. 3: Diagrama de densidad de todos los cambios irreversibles que tuvieron lugar en los eventos SOL2011-09-24T09:40 (*Izquierda*) y SOL2011-07-30T02:12 (*Derecha*)

La ubicación de los cambios en el campo longitudinal nos da una señal de cómo es la topología de los campos fotosféricos y cómo estos varían debido al proceso flare. La gráfica 4 muestra la ubicación de los cambios positivos tipo escalon (píxeles azules) y aquellos cambios negativos (píxeles rojos). Durante el evento SOL2011-09-24T09:40 se observa un núcleo alargado de cambios negativos del tipo Heaviside en un área de  $\sim 400 \text{ arcsec}^2$ . Por otro lado, durante el evento SOL2011-07-30T02:12 los cambios tipo escalón sucedieron a lo largo de la región activa, siendo más pronunciado a la cantidad de cambios positivos en el campo longitudinal.

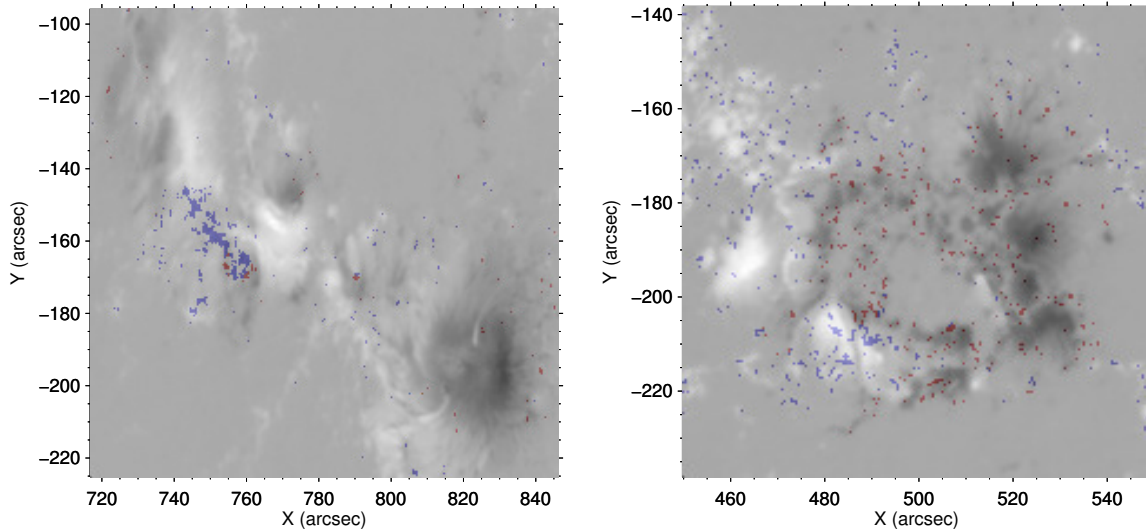


Fig. 4. Locación de los cambios irreversibles en la región activa que hospedó a los eventos SOL2011-09-24T09:40 (*Izquierda*) y SOL2011-07-30T02:12 (*Derecha*). Los píxeles azules representan un cambio positivo tipo Heaviside y los rojos significan cambios negativos.

#### 4. Conclusiones

Se analizaron 7 flares energéticos ocurridos en el presente máximo solar encontrando cambios irreversibles en los campos magnéticos fotosféricos en su componente de la línea de la visual debidos al proceso flare. Se encontró que hay una tendencia a haber más cambios de un tipo para cada flare bien sean positivos o negativos. Estos campos se localizan mayormente en la penumbra donde el campo magnético es menos intenso que en la umbra y donde la inclinación de estos empieza a tener un rol importante [13, 14].

La locación de la región activa conduce a que el campo medido sea la suma de otras componentes del campo por lo que un estudio detallado de cambios del vector completo de campo magnético se vuelve necesario para la comprensión completa de la liberación de energía por los campos magnéticos y sobre cómo es su reestructuración.

#### References

- [1] R. C. Carrington. Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *MNRAS*, 20:13–15, November 1859.
- [2] R. Hodgson. On a curious Appearance seen in the Sun. *MNRAS*, 20:15–16, November 1859.
- [3] K. Shibata and T. Magara. Solar Flares: Magnetohydrodynamic Processes. *Living Reviews in Solar Physics*, 8:6, December 2011.
- [4] H. S. Hudson. Global Properties of Solar Flares. *Space Sci. Rev.*, 158:5–41, January 2011.
- [5] J. J. Sudol and J. W. Harvey. Longitudinal Magnetic Field Changes Accompanying Solar Flares. *ApJ*, 635:647–658, December 2005.
- [6] G. J. D. Petrie and J. J. Sudol. Abrupt Longitudinal Magnetic Field Changes in Flaring Active Regions. *ApJ*, 724:1218–1237, December 2010.
- [7] A. G. Kosovichev and V. V. Zharkova. Magnetic Energy Release and Transients in the Solar Flare of 2000 July 14. *ApJL*, 550:L105–L108, March 2001.
- [8] E. R. Priest and T. G. Forbes. The magnetic nature of solar flares. *A&A Rev.*, 10:313–377, 2002.
- [9] G. S. Kerr and L. Fletcher. Physical Properties of White-Light Sources in the 2011 Feb 15 Solar Flare. *ArXiv e-prints*, January 2014.
- [10] E. W. Cliver, G. J. D. Petrie, and A. G. Ling. Abrupt Changes of the Photospheric Magnetic Field in Active Regions and the Impulsive Phase of Solar Flares. *ApJ*, 756:144, September 2012.
- [11] J. M. Borrero, S. Tomczyk, M. Kubo, H. Socas-Navarro, J. Schou, S. Couvidat, and R. Bogart. VFISV: Very Fast Inversion of the Stokes Vector for the Helioseismic and Magnetic Imager. *Sol. Phys.*, 273:267–293, October 2011.
- [12] C. Liu, N. Deng, J. Lee, T. Wiegmann, C. Jiang, B. R. Dennis, Y. Su, A. Donea, and H. Wang. Three-dimensional Magnetic Restructuring in Two Homologous Solar Flares in the Seismically Active NOAA AR 11283. *ApJ*, 795:128, November 2014.
- [13] J. M. Borrero and K. Ichimoto. Magnetic Structure of Sunspots. *Living Reviews in Solar Physics*, 8:4, September 2011.
- [14] S. K. Solanki. Sunspots: An overview. *A&A Rev.*, 11:153–286, 2003.