

Estudio de las velocidades Doppler y su relación con las oscilaciones del campo magnético en la penumbra de las manchas solares

Francisco J. Ordoñez Araujo¹, Benjamín Calvo-Mozo¹, J. Sebastián Castellanos Durán²

¹ Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Cra 45 No. 26 85, 11001 Bogotá, Colombia.

² Max Planck Institute for Solar System Research, Justus-von-Liebig-Weg 3, D-37077 Göttingen, Germany
fjordoneza:bcalvo@unal.edu.co

Resumen

En este trabajo se estudiaron las oscilaciones locales de las velocidades Doppler en la penumbra de la mancha solar AR 12186. Para ello, se alinearon las imágenes usando el método Enhanced Correlation Coefficient (ECC), ECC+Rotación y el método propuesto por Griñón-Marín et al. (2020). Se utilizó la transformada de wavelet para extraer las potencias wavelet. Analizando la distribución de los períodos de oscilación de las potencias de wavelet de forma local y global, no se identificó un periodo dominante en dichas potencias. También, se obtuvo una atenuación en las potencias Doppler del 22.1% y 41.6% respecto a las potencias obtenidas a través del método ECC+Rotación para las potencias encontradas usando el método ECC y el método de Griñón-Marín et al. (2020), respectivamente. Además, no se encontró una correlación entre las potencias correspondientes a las velocidades Doppler y magnitud del campo magnético en la línea de la visión para los tres métodos de alineación.

Palabras clave: Sol: velocidades Doppler -Sol: campos magnéticos – Sol: oscilaciones – Sol: fotosfera – manchas solares.

Abstract

In this work, local oscillations of the Doppler Velocities in the penumbra of the sunspot AR 12186 were studied. For this purpose, the images were aligned using the Enhanced Correlation Coefficient (ECC), ECC+Rotation and the method proposed by Griñón-Marín et al. (2020). The wavelet transform was used to extract the wavelet power. Analyzing the distribution of the oscillation periods of the wavelet powers locally and globally, no dominant period was identified in these powers. Also, an attenuation in the Doppler powers of 22.1% and 41.6% was obtained with respect to the powers obtained through the ECC method obtained through the ECC+Rotation method for the powers found using the Griñón-Marín et al. (2020) method and ECC method, respectively. In addition, no clear correlation was found between the powers Doppler Velocities, and magnetic field strength at the line of sight for the three alignment methods.

Key words: Sun: Doppler velocities -Sun: magnetic fields – Sun: oscillations – Sun: photosphere – sunspotso.

1. Introducción

La existencia de oscilaciones globales de la intensidad del campo magnético con períodos entre 3-5, 10–23, 220–240, 340 y 470 minutos en manchas solares han sido reportadas en la última década [1, 2]. Estas oscilaciones fueron encontradas al analizar magnetogramas obtenidos por SOHO/MDI [3]. Recientemente, al analizar la inclinación del campo magnético en la penumbra de las manchas solares también se encontraron oscilaciones de larga duración, desde unos 48 minutos hasta del orden de 63 horas [4].

Griñón-Marín et al. (2020) dividieron las manchas solares en cuatro regiones con dos rectas de pendiente ± 1 que cruzaran por el centroide de dichas manchas. En cada una de las regiones integraron las potencias de wavelet asociadas a la componente de inclinación del campo magnético y el flujo magnético de polaridad positiva y opuesta. Estos autores encontraron que en el 64% de las 25 manchas solares estudiadas, la región que exhibía un exceso de potencia de wavelet también presentaba alto flujo de campo magnético de polaridad opuesta. Además, concluyen que las regiones con alta potencia de oscilación están conectadas con parches de flujo magnético de polaridad opuesta debido a loops coronales y que probablemente estos sean los responsables de dicha correlación.

Sin embargo, Griñón-Marín et al. (2020) no estudiaron las velocidades del plasma en las localidades donde reportaron la correlación antes mencionada. Por lo cual, en el presente trabajo, presentamos el estudio de las oscilaciones locales de las velocidades Doppler en la penumbra de la mancha solar AR 12186.

2. Metodología y tratamiento de datos

2.1. Tratamiento de datos

Los datos analizados en este trabajo fueron tomados por el Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [5] abordo del Solar Dynamics Observatory (SDO) [6]. Se analizaron datos de intensidad en el continuo, velocidades Doppler y magnitud del campo magnético en la línea de la visión para la mancha solar AR 12186, la cual se localizó en el hemisferio Sur y

fue estudiada entre el 2014-10-10 a las 06:58 UT a latitud -45° y 2014-10-16 a las 21:15 UT $+45^\circ$.

Los datos de intensidad en el continuo se les corrigió el efecto de oscurecimiento del limbo siguiendo los pasos presentados por [7]. Los datos de velocidades Doppler y magnitud del campo magnético en la línea de la visión fueron calibrados para corregir los efectos orbitales del SDO. Adicionalmente, a los Doppler se les corrigió el efecto de la rotación diferencial del Sol, corrimiento al azul, entre otros efectos detallados por [8].

2.2. Elaboración de las máscaras

En nuestro estudio para concentrarnos en la penumbra realizamos máscaras que ocultaran tanto la umbra como el entorno de la mancha. Para ello, identificamos la línea que separa la penumbra y la umbra de la mancha solar. Las máscaras se construyeron usando los datos de intensidad en el continuo del SDO. En el proceso para elaborar la máscara se normalizó la intensidad en el continuo con respecto al Sol en calma (I_{qs}), y se estableció un umbral para separar la umbra y la penumbra de la mancha solar. En la máscara de la penumbra se determinó que todos los píxeles con intensidades mayores a $0.95 I_{qs}$ y menores a $0.45 I_{qs}$ fuesen tomados como cero. La máscara de la umbra se hizo tomando como cero todos los píxeles cuya intensidad fuese mayor a $0.45 I_{qs}$. Adicionalmente, para descartar los poros de la mancha solar, se determinó que agrupaciones de píxeles cuyas áreas correspondientes sean menores a 370 píxeles fuesen tomadas como cero.

La dinámica de la mancha solar hace que en algunas ocasiones algunos píxeles de la penumbra exhiban intensidades por fuera de los rangos establecidos ($0.45 I_{qs} \leq I \leq 0.95 I_{qs}$). Por lo cual, al aplicar el umbral para identificar la penumbra dichos píxeles son descartados. Pero, en este trabajo se busca hacer un estudio local de las velocidades Doppler en penumbra, por lo cual dichos píxeles deben ser considerados. Para ello, se usó un filtro gaussiano con desviación estándar de cinco.

2.3. Alineación de las imágenes

En este trabajo, se busca estudiar las condiciones locales de las velocidades Doppler en la penumbra

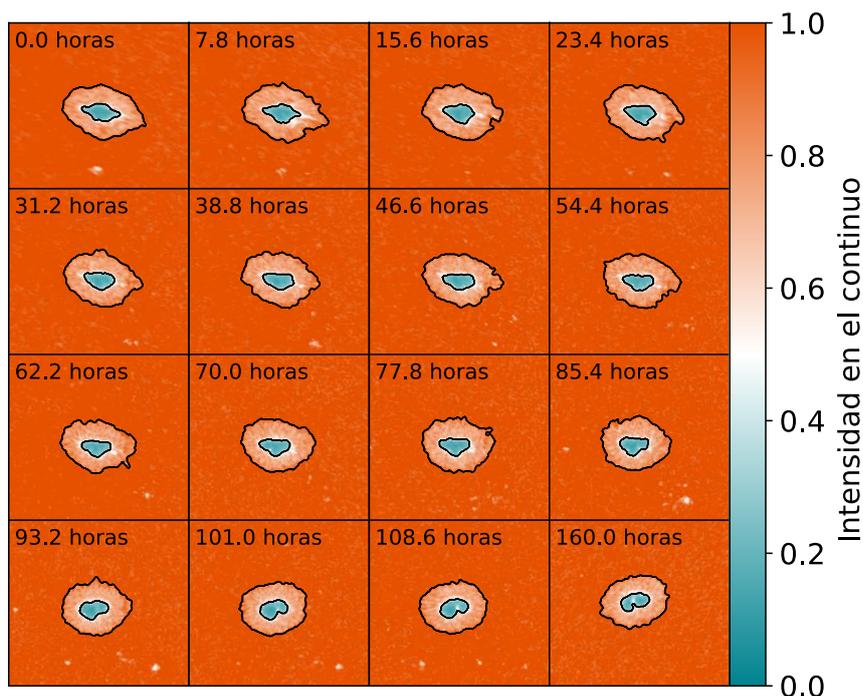


Figura 1. Segmentación de la penumbra con el método propuesto en este trabajo para la región activa AR 12186 en diferentes instantes de tiempo. Los paneles representan pasos de tiempo, el panel superior izquierdo y el panel inferior derecho correspondientes a $t = 0$ horas, $t = 160$ horas asociados a posiciones de la mancha solar sobre la superficie del Sol a longitud de -45° y $+45^\circ$ aproximadamente. En negro el contorno de la penumbra.

de la mancha solar AR 12186. Por ello, al igual que en el trabajo de Griñón-Marín et al. (2020), se deben alinear las imágenes tomadas por HMI para poder determinar la variación temporal de las velocidades Doppler para cada píxel de la penumbra.

La alineación de las 810 imágenes para cada magnitud física analizada en la línea de la visión, velocidades Doppler y magnitud de campo magnético, se hizo usando tres métodos donde se usó una transformación geométrica, es decir, traslaciones horizontales (T_x), traslaciones verticales (T_y) y un ángulo de rotación (θ). Los métodos de alineación utilizados son:

1. Método de Griñón

Se implementó el mismo método utilizado Griñón-Marín et al. (2020) para alinear las imágenes. Con la información del artículo, se creó una máscara de la umbra a la cual se le identificó el centro de intensidad (centroides). Luego, se tomaron los desplazamientos relativos de dichos centros de intensidad en las coordenadas x e y . Con esta información se alinearon las imágenes.

2. Coeficiente de correlación mejorado (ECC)

Se estimaron los parámetros óptimos de la transformación geométrica a través del Enhanced Correlation Coefficient [9].

3. Coeficiente de correlación mejorado (ECC) + Rotación

La alineación obtenida con el método ECC se le hizo una pequeña mejora en la cual se tuvo en cuenta el ángulo de rotación de la mancha solar AR 12186 en cada imagen del continuo ajustando una elipse al contorno externo de la penumbra.

2.4. Transformación de wavelet

La herramienta utilizada en este trabajo para el estudio de las condiciones locales de las velocidades Doppler de la mancha AR12186 es la transformada de wavelet [10]. El estudio local se hizo analizando las variaciones temporales de cada píxel de la penumbra.

Una vez que las máscaras y la alineación de las imágenes por los diferentes métodos descritos en las Secciones 2.2 y 2.3, se hizo una elección ad-hoc

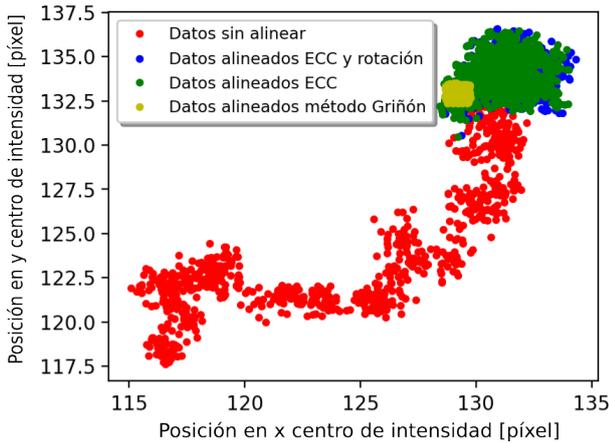


Figura 2. Posiciones de los centros de intensidad (centroides) de las máscaras de penumbra. En rojo los centros de intensidad de las máscaras sin alinear. En azul, verde y amarillo los centros de intensidad de las máscaras alineadas con el método ECC+Rotación, ECC y método propuesto por Griñón.

de los píxeles con los cuales se van a construir las series de tiempo analizar. Los píxeles estudiados son aquellos que siempre pertenecen a la penumbra. Lo anterior se hace para evitar el ruido producido por las variaciones geométricas propias de la mancha solar. A cada evolución temporal se le aplicó un detrend para eliminar su amplitud y tener solo sus oscilaciones para luego aplicar la transformada de wavelet.

Posteriormente, se aplicó un criterio de selección de datos similares al utilizado por Griñón-Marín et al. (2020):

1. Se descartaron potencias de wavelet inferiores al cuadrado de la incertidumbre de las velocidades Doppler. En el caso de la magnitud del campo magnético en la línea de la visión, se descartaron potencias de wavelet inferiores a tres veces el cuadrado de la incertidumbre estimada para la magnitud del campo magnético en la línea de la visión de la penumbra [11], es decir, $3 \times (50 \text{ G})^2$. La elección del umbral se hizo con el fin de evitar potencias espurias.
2. Potencias de wavelet por debajo del cono de influencia fueron descartadas ya que están fuera de significancia, i.e., no cumplen con el teorema de Nyquist.
3. Se descartaron potencias de wavelet correspon-

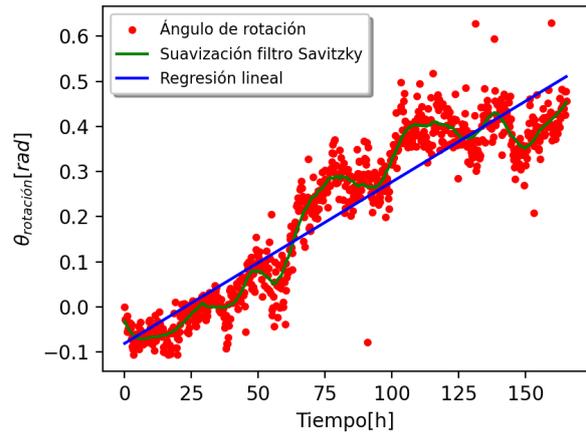


Figura 3. En rojo el ángulo de inclinación de la mancha solar. En verde el ángulo de rotación suavizado por el filtro Savitzky-Golay. En azul el ajuste lineal de los datos suavizados, con un coeficiente de correlación de Pearson de $r^2 = 0.91$ y pendiente de 4.92 grados por día.

dientes a períodos inferiores a dos veces la frecuencia de Nyquist (48 minutos). Dicha condición se impuso porque al igual que en el trabajo de Griñón-Marín et al. (2020), se busca estudiar oscilaciones de larga duración.

4. Todas las potencia que cumplían los criterios anteriores se les impuso dos condiciones extras. Se considera que un exceso de potencia de wavelet es físicamente válido si también se observa un exceso de potencia de wavelet en cuatro píxeles consecutivo y al menos por en tres píxeles adyacentes. Esta condición se impuso para tener una resolución espacial y temporal de las potencias de wavelet.

El estudio de las potencias de wavelet obtenidas a partir de las velocidades Doppler y de magnitud del campo magnético en la línea de la visión se hizo a nivel local y global. En el análisis global se estudiaron las variaciones temporales de las potencias de wavelet y se extrajeron los períodos de dicha evolución temporal. En lo local, se dividió la penumbra usando dos rectas ortogonales de pendiente ± 1 que cruzan por el centro de la mancha solar. La penumbra quedó dividida en Norte, Sur, Oriente y Occidente. Luego, en cada localidad se extrajeron los períodos de las potencias de wavelet y se integró la potencia total. El proceso anterior fue aplicado a los datos obtenidos a través de los tres diferentes métodos de alineación

trabajados en este artículo (Sección 2.3).

3. Resultados y discusión

3.1. Máscaras

La Figura 1 presenta los resultados obtenidos a través de la implantación del método descrito en la Sección 2.2. En ella se evidencia que dicho método logra identificar correctamente la penumbra y umbra de la mancha solar estudiada. Además, el método consigue descartar los poros y otras minúsculas inhomogeneidades del Sol en calma analizando la fracción de área cubierta por dichos eventos. En general, el método muestra un buen comportamiento a lo largo de todo el tiempo de observación analizado para la mancha solar AR 12186, logrando mantener su efectividad pese a la evolución dinámica propia de la mancha.

3.2. Alineación de las imágenes

En la Figura 2 se muestra que los tres métodos de alineación utilizados logran reducir los desplazamientos del centroide de la mancha solar estudiada, en ella se observa que método de Griñón-Marín et al. (2020) presenta mejores resultados reduciendo los desplazamientos del centro de intensidad de la mancha solar. Sin embargo, comparando el número de píxeles que siempre pertenecen a la penumbra (los cuales fueron luego analizados) se observa que el método de Griñón-Marín et al. (2020) proporciona un 5.4% y 6.7% menos píxeles con respecto a los mismos resultados obtenidos a través de los métodos ECC y ECC+Rotación (ver la Tabla 1). En ella se consideró un área promedio de penumbra de 5516.5 píxeles.

El ángulo de rotación de la mancha solar en función del tiempo es mostrado en la Figura 3. En ella, la pendiente del ajuste lineal muestra una rotación de la mancha solar de 4.92 grado por día (0.0034 grados por minuto). Cuando se tiene en cuenta el ángulo de rotación, el número de píxeles que siempre pertenecen a la penumbra aumenta (ver Tabla 1). Además, dado que el método propuesto en este escrito ECC+Rotación, tiene en cuenta las variaciones geométricas de la mancha solar su desempeño presenta mejoras respecto al empleado por Griñón-Marín et

al. (2020).

Tabla 1. Área total de los píxeles que siempre pertenecen a la penumbra obtenida para los tres métodos de alineación y el porcentaje que estas representa respecto al área promedio en píxeles de la penumbra.

Método de alineamiento	Píxeles que siempre pertenecen a la penumbra	Porcentaje de píxeles respecto al área promedio
ECC	3098	56.2%
ECC+Rotación	3397	61.6%
Griñón-Marín et al. (2020)	3029	54.9%

3.3. Potencias de wavelet

La Figura 4 muestra las potencias de wavelet encontradas para cada píxel de la penumbra de las velocidades Doppler que cumplen las condiciones mencionadas en la Sección 2.4. Las potencias de wavelet tienden a aparecer en la parte inferior de la mancha solar. Los filamentos con alta potencia de wavelet tienden a apuntar radialmente hacia adentro de la mancha solar. Además, se observa que al igual que en Griñón-Marín et al. (2020), las potencias encontradas disminuyen al inicio y al final del intervalo de observación estudiado. Tal efecto se puede deber a la poca resolución en períodos que tiene la transformada de wavelet en los extremos.

En un estudio global de la mancha, se analizaron los períodos de oscilación de las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler y magnitud del campo magnético en la línea de la visión para los tres métodos de alineación descritos en este trabajo. La Figura 5 muestra que en el estudio global de todos las potencias de wavelet no hay un periodo de oscilación dominante.

En un estudio local, se dividió la mancha solar estudiada como se muestra en la Figura 7. En cada localidad se aplicó el mismo análisis hecho en el estudio global y se encontró que de forma local tampoco hay un periodo de oscilación dominante para las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler, ver la Figura 6.

La Figura 8 presenta las potencias de wavelet integradas para cada una de las variables físicas estu-

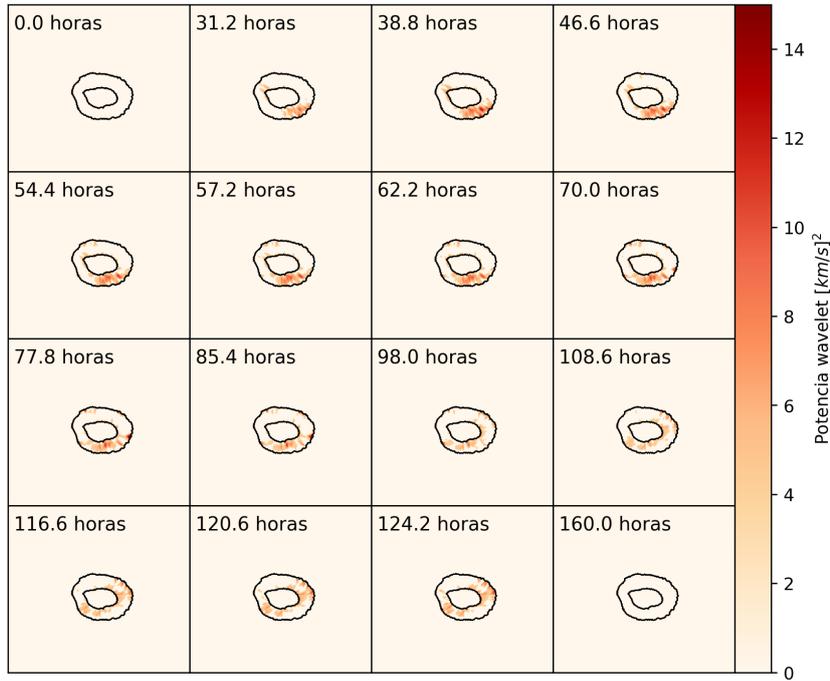


Figura 4. Potencias de wavelet Doppler de la región activa AR 12186 que cumplen con las condiciones impuestas para cada píxel de las imágenes alineadas con el método ECC+Rotación propuesto. Cada panel representa un paso de tiempo. El contorno de la penumbra está delineado en negro.

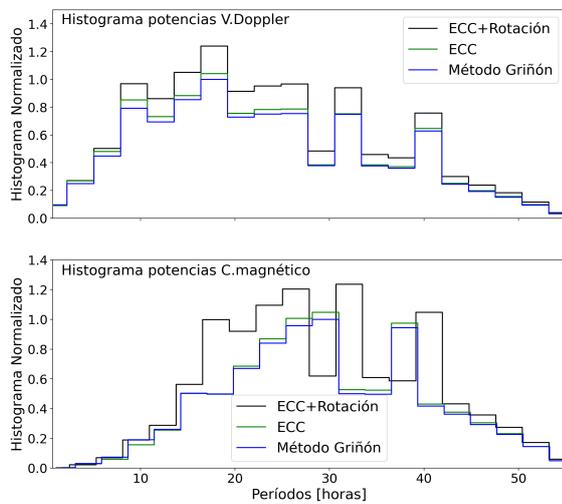


Figura 5. El panel superior: distribución de los períodos de oscilación de las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler encontradas para los tres métodos de alineación. El panel inferior: distribución de los períodos de oscilación de las potencias de wavelet asociadas a la magnitud del campo magnético en la línea de la visión en las localidades con alta potencia de wavelet de las velocidades Doppler.

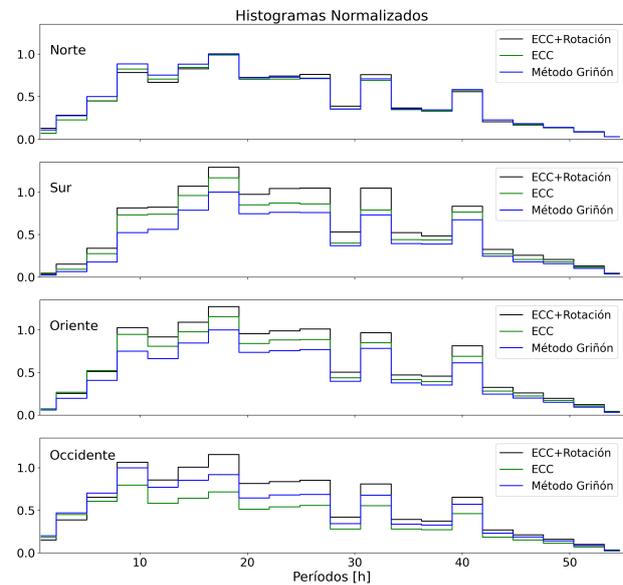


Figura 6. Distribución de los períodos de oscilación de las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler para las cuatro regiones estudiadas.

diadas en los cuatro cuadrantes. Se encuentra que en la región donde Griñón-Marín et al. (2020) reportó

una correlación entre el flujo magnético de polaridad opuesta y las potencias de oscilación asociadas a la componente de inclinación del campo magnético, exhibe una alta potencia de oscilación asociada a las

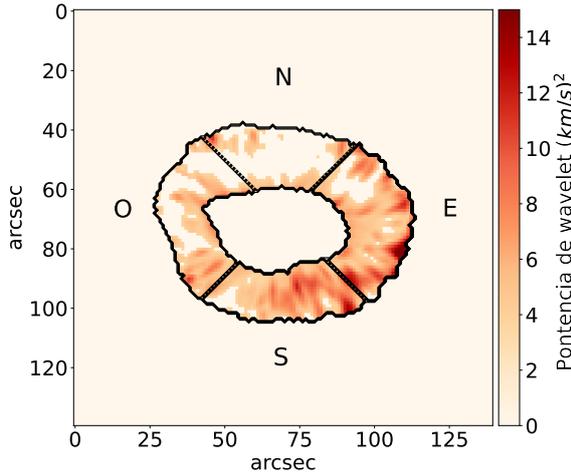


Figura 7. Potencia de wavelet máxima encontrada en cada píxel. En negro el contorno de la penumbra de la mancha solar AR 12186 dividida en norte, sur, oriente y occidente.

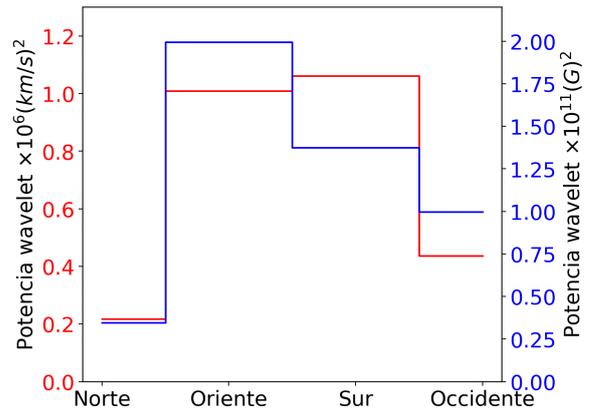
velocidades Doppler (Figura 8). En dicha localidad no se encontró una correlación clara entre las potencias de oscilación asociadas a la magnitud de campo magnético y las velocidades Doppler.

Por otra parte, al contrastar las potencias integradas obtenidas a través de los diferentes métodos de alineación, se encontró una atenuación en las potencias de las velocidades Doppler respecto a las potencias Doppler obtenidas con el método propuesto en este trabajo (ECC+Rotación) del 25.7% y 43.5% para los métodos ECC y de Griñón-Marín et al. (2020), respectivamente. Tales atenuaciones demuestran que el método de alineación utilizado afecta fuertemente las potencias de oscilación. Por ello, las correlaciones encontradas por Griñón-Marín et al. (2020) pueden verse afectadas si en vez de alinear las imágenes con su método, se utiliza un método más sofisticado (por ejemplo, ECC+Rotación) que determine los parámetros óptimos de la transformación geométrica considerando características dinámicas de la mancha solar como el ángulo de rotación.

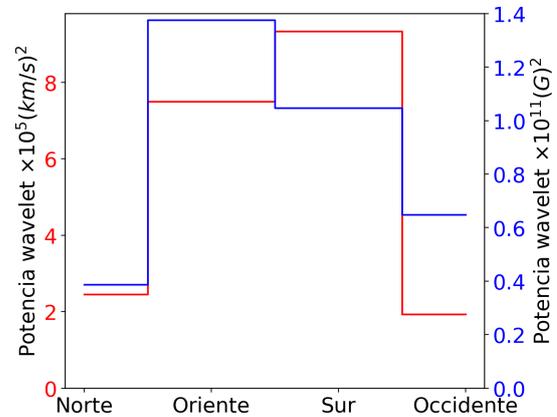
4. Conclusiones

El método propuesto en este trabajo para la construcción de la máscara presentó un buen comportamiento a lo largo de toda la serie de tiempo para la mancha solar AR 12186 (ver la Figura 1).

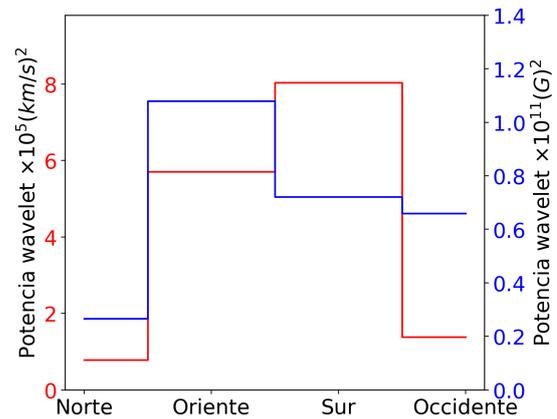
Alineando las imágenes con el método propuesto



(a) Método ECC + Rotación.



(b) Método ECC.



(c) Método Griñón.

Figura 8. Potencias de wavelet integradas en las regiones mostradas en la figura 7 para las velocidades Doppler y el campo magnético en la línea de la visión en las localidades con alta potencia de wavelet en las velocidades Doppler.

(ECC+Rotación) se obtuvo un 5.4% y 6.7% más de píxeles que son siempre parte de la penumbra respecto al mismo resultado obtenido con los métodos ECC y el método de Griñón-Marín et al. (2020). También, a través de una regresión lineal se encontró una rotación en la mancha solar AR 12186 de 4.9 grados por día. Dicha rotación no fue considerada por Griñón-Marín et al. (2020), lo cual induce a errores en su trabajo ya que al dividir la mancha solar en cuadrantes y no considerar la rotación, los píxeles van a saltar de un cuadrante a otro.

El método propuesto en este trabajo proporciona una mayor cantidad de píxeles que siempre son penumbra, es decir, se obtiene una mayor cantidad de datos susceptibles a ser analizados. Además, la alineación usando el método ECC+Rotación se hace teniendo en cuenta las variaciones geométricas de la mancha solar y la rotación de la mancha. Por lo anterior, el método propuesto presenta un mejor desempeño que el método empleado en [4].

En el estudio local y global de las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler, se encontró que para los tres métodos de alineación utilizados en este escrito no hay un periodo dominante (ver las Figuras 5 y 6). También se encontró que la distribución de períodos depende del método de alineación empleado.

Por otra parte, al integrar las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler y magnitud del campo magnético en la línea de la visión, se encontró que los métodos ECC y de Griñón-Marín et al. (2020) presentaron una atención en las potencias de wavelet del 22.1% y 41.6% respecto a las potencias encontradas con el método ECC+Rotación (ver la Figura 8). Se observa que no existe una correlación clara entre las potencias wavelet asociadas a las velocidades Doppler y magnitud del campo magnético en la línea de la visión.

Las potencias de oscilación se ven afectadas por el método de alineación utilizado. El método propuesto en este trabajo presenta mejor desempeño que el utilizado por Griñón-Marín et al. (2020). Por lo cual, dicho método puede ser aplicado a las potencias asociadas a la componente de inclinación del campo magnético para saber si las correlaciones reportadas por Griñón-Marín et al. (2020) se mantienen.

El estudio realizado en este trabajo se puede extender a un conjunto mayor de manchas solares para hacer un tratamiento estadístico y determinar si la no correlación entre las potencias de wavelet asociadas a las velocidades Doppler y intensidad del campo magnético en la línea de la visión es algo sistemático.

Declaración de conflicto de interés: Los autores manifiestan no tener conflictos de interés.

Referencias

- [1] J. Kallunki, A. Riehoakainen, *Investigation of Quasi-periodic Solar Oscillations in Sunspots Based on SOHO/MDI Magnetograms*. *Solar Physics* **280**(2), 1–8 (2012). DOI:10.1007/s11207-012-0021-x
- [2] V. Efremov et al., *Long-Period Oscillations of Sunspots Observed by SOHO/MDI*. *Solar Physics* **289**(6), 1983–1998 (2014). DOI:10.1007/s11207-013-0451-0
- [3] P.H. Scherrer, et al., *The Solar Oscillations Investigation - Michelson Doppler Imager*. *Solar Physics* **162**(1-2), 129–188 (1995). DOI:10.1007/BF00733429
- [4] A.B. Griñón-Marín, A. Pastor Yabar, H. Socas-Navarro, R. Centeno, *Discovery of long-period magnetic field oscillations and motions in isolated sunspots*. *A&A* **635**, A64–1–15 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936589
- [5] J. Schou et al., *Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Solar Physics* **275**, 229–259 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9842-2
- [6] W.D. Pesnell et al., *The Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Solar Physics* **275**, 3–15 (2012). DOI:10.1007/s11207-011-9841-3
- [7] J.S. Castellanos Durán, L. Kleint, *The Statistical Relationship between White-light Emission and Photospheric Magnetic Field Changes in Flares*. *ApJ* **904**(2), 96 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab9c1e
- [8] J.S. Castellanos Durán, A. Lagg, S. Solanki, *How rare are counter Evershed flows?* *A&A* **651**, L1 (2021). DOI: 10.1051/0004-6361/202141159
- [9] G. Evangelidis, E. Psarakis, *Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **30**(10), 1858–1865 (2008). DOI: 10.1109/TPAMI.2008.113
- [10] C. Torrence, G. Compo, *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. *BAMS* **79**(1), 61–78 (1998). DOI:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- [11] S. Couvidat et al., *Observables Processing for the Helioseismic and Magnetic Imager Instrument on the Solar Dynamics Observatory*. *Solar Physics* **291**(7), 1887–1938 (2016). DOI:10.1007/s11207-016-0957-3