



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio observacional de la dinámica de puntos brillantes en una zona del Sol en calma

Yeimy Gerardine Berrios Saavedra

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Observatorio Astronómico Nacional
Bogotá, Colombia
2021

Estudio observacional de la dinámica de puntos brillantes en una zona del Sol en calma

Yeimy Gerardine Berrios Saavedra

Tesis presentada como requisito para optar al título de:
Magister en Ciencias Astronomía

Director:

Dr. Santiago Vargas Domínguez

Codirector:

Dr. Dominik Utz

Línea de investigación:

Astrofísica Solar

Grupo de investigación:

Group of Solar Astrophysics (GoSA)

Universidad Nacional de Colombia
Observatorio Astronómico Nacional - Facultad de Ciencias
Bogotá, Colombia
2021

A mi familia y amigos.

Agradecimientos

En este aparte me gustaría agradecer a todas las personas que con su valioso aporte permitieron el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación. En primer lugar quiero dar gracias a Dios por permitirme finalizar con éxito una etapa más en mi vida académica. En segundo lugar a mi familia, pues con su preciado apoyo me acompañaron en este largo camino. Un especial agradecimiento a los profesores Santiago Vargas, Dominik Utz y Benjamin Calvo porque con sus constantes aportes y revisiones contribuyeron al fortalecimiento de los conceptos y procesos necesarios para el presente estudio. De la misma forma, mi más leal gratitud a mis compañeros de maestría Anyul Figueroa, Itamar Alfonso, Didier Cuellar y Fredy Espinosa quienes hicieron parte de este proceso de formación académica y animaron cada nuevo reto.

Resumen

Las observaciones en alta resolución de la fotosfera solar han revelado la existencia de estructuras compuestas de diminutos Puntos Magnéticos Brillantes o MBPs (por sus siglas en inglés). Tales estructuras a pequeña escala están asociadas con regiones de campo magnético fuerte del orden de kilogauss (kG) (Beck et al., 2007). Diversas investigaciones han encontrado que el diámetro promedio de un MBP está en el rango de 100 - 300 km, su velocidad horizontal promedio entre $0,2 - 5 \text{ kms}^{-1}$ y su tiempo de vida de 2,5 a 10 minutos en promedio (Utz et al., 2009b).

Es relevante estudiar estos elementos magnéticos y establecer su contribución al comportamiento de la atmósfera solar, y particularmente al bien conocido problema del calentamiento coronal. Aunque pequeños, los MBPs podrían contribuir significativamente a la energía requerida en la corona debido a que cubren toda la superficie del Sol y albergan intensos campos magnéticos. Teóricamente, el movimiento del punto de anclaje de un MBP genera un flujo de energía que asciende a la corona y puede contribuir a su calentamiento (Choudhuri et al., 1993).

En este trabajo, el análisis de MBPs se hace a través del uso de series de tiempo de imágenes de la fotosfera solar adquiridas con telescopios solares de alta resolución, tanto en tierra como espaciales i.e., el instrumento SOT/Hinode (Telescopio Óptico Solar) y HiFI/GREGOR (generador de imágenes de alta resolución) en la banda G (4308 \AA).

Con el fin de detectar los MBPs, se hace uso de un algoritmo automático de segmentación e identificación, a partir del cual se rastrean estos elementos pequeños para medir su movimiento propio. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis estadístico de cientos de MBPs por medio de histogramas de área y diámetro, así como analizando curvas de luz que evidencian su variación en intensidad. Adicional a esto, se mide la velocidad horizontal promedio de estas estructuras para caracterizarlas durante la evolución de la región solar bajo estudio.

Los resultados establecen que las medidas de los parámetros dinámicos de los MBPs están influenciadas por el instrumento utilizado, ya que con el cambio de la resolución espacial y temporal se obtienen parámetros diferentes. Con una resolución de $0,108 \text{ arcseg/px}$ se obtuvo para el área de los MBPs un valor medio de $37000 \cdot | \div 1,7 \text{ km}^2$, para el diámetro promedio $260 \cdot | \div 1,5 \text{ km}$ y una velocidad horizontal media de $1,1 - 2,3 \text{ kms}^{-1}$ (se encontraron dos poblaciones de MBPs en los resultados de velocidad).

Por su parte, para una resolución de $0,0286 \text{ arcseg/px}$ se encontraron dos poblaciones de

MBPs cuyas áreas promedios fueron de $5700 \cdot | \div 1,6 \text{ km}^2$ y $20000 \cdot | \div 1,6 \text{ km}^2$ respectivamente, para el diámetro un valor medio de $80 \cdot | \div 1,3 \text{ km}$ para el primer grupo de MBPs y de $150 \cdot | \div 1,5 \text{ km}$ para el segundo y una velocidad promedio de $1,9 \text{ kms}^{-1}$ y $7,5 \text{ kms}^{-1}$ para cada una de las poblaciones.

Palabras clave. Sol: puntos magnéticos brillantes, fotosfera, campo magnético, Técnicas: procesamiento de imágenes.

Abstract

High-resolution observations of the solar photosphere reveal a large fine structure composed of tiny Magnetic Bright Points (MBPs), which are small-scale features associated with strong magnetic field regions of the order of kilogauss (kG) (Beck et al., 2007). Different investigations have found that the average diameter of a MBP lays in a range of 100 - 300 km, its horizontal average velocity between $0,2\text{-}5 \text{ kms}^{-1}$ and its lifetime of 2,5 to 10 minutes on average (Utz et al., 2009b).

It is relevant to study these magnetic elements and establish their contribution to the behaviour of the solar atmosphere, and ultimately to the well known coronal heating problem. Although being small, MBPs could significantly contribute to the energy budget in the corona as they cover the entire surface of the Sun and harbour strong magnetic fields. Theoretically, the movement of the footpoint of an MBP generates a flow of energy that ascends to the corona and can contribute to its heating (Choudhuri et al., 1993).

In this work, the analysis of MBPs is done by means of time series of images of the solar photosphere acquired with high resolution ground-based and space-borne solar telescopes, i.e. SOT/Hinode instrument (Solar Optical Telescope) and the HiFI/GREGOR (High-resolution Fast Imager) in the G-band (4308 \AA).

In order to detect MBPs, an automatic segmentation and identification algorithm is used, and these small elements are subsequently tracked to measure its proper motions. A statistical analysis of hundreds of MBPs is carried out, as well as histograms of their area and size, and light curves displaying their variation in intensity. In addition, the average horizontal velocity of these structures is measured to characterize them during the evolution of the solar region under study.

The results establish that the measurements of the dynamic parameters of the MBPs are influenced by the instrument used since with the change of the spatial and temporal resolution different values are obtained. With a resolution of 0,108 arcsec/px, was obtained for the area of the MBPs an average value of $37000 \cdot | \div 1,7 \text{ km}^2$, for the mean diameter $260 \cdot | \div 1,5 \text{ km}$ and a mean horizontal velocity of $1,1 - 2,3 \text{ kms}^{-1}$ (two populations of MBPs were found in the velocity results).

On the other hand, for a resolution of 0,0286 arcse/px, two populations of MBPs were found whose mean areas were $5700 \cdot | \div 1,6$ and $20000 \cdot | \div 1,6 \text{ km}^2$ respectively, for the diameter an average value of $80 \cdot | \div 1,3 \text{ km}$ for the first group of MBPs and $150 \cdot | \div 1,5 \text{ km}$ for the second and an mean velocity of $1,9 \text{ kms}^{-1}$ and $7,5 \text{ kms}^{-1}$ for each of the populations.

Keywords. Sun: magnetic bright points, photosphere, magnetic field, Techniques: image processing.

Contenido

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Lista de figuras	xv
Lista de tablas	1
1. Introducción	2
1.1. El Sol	3
1.1.1. Estructura interna	5
1.1.2. Atmósfera solar	6
1.1.3. Fotosfera	10
1.1.4. Campo magnético solar	12
2. Puntos Magnéticos Brillantes	18
2.1. Caracterización de los Puntos Magnéticos Brillantes	18
2.2. Estudios previos sobre la dinámica de Puntos Magnéticos Brillantes	20
2.3. Instrumentación	22
2.3.1. HINODE/SOT	22
2.3.2. GREGOR/HiFI	25
3. Datos y Metodología	27
3.1. Datos	27
3.1.1. Tratamiento preliminar de los datos	30
3.2. Metodología	34
3.2.1. Segmentación de las imágenes	35
3.2.2. Identificación de los Puntos Magnéticos Brillantes	38
4. Resultados y análisis	43
4.1. Tamaño de Puntos Magnéticos Brillantes	43
4.2. Velocidad de Puntos Magnéticos Brillantes	62
4.3. Curvas de luz de los Puntos Magnéticos Brillantes	77
4.4. Evolución del tamaño de los Puntos Magnéticos Brillantes	78
4.5. Trayectoria de los Puntos Magnéticos Brillantes	79

5. Conclusiones y discusión	80
5.1. Trabajo futuro	82
Bibliografía	84
A. Anexos	88

Lista de Figuras

1-1.	En la imagen de la izquierda se muestra una fotografía de la corona solar durante el eclipse total de Sol del 2 de julio de 2019 cerca al mínimo solar, y en la imagen de la derecha se aprecia una fotografía del eclipse total de Sol del 21 de agosto de 2017 cerca al máximo solar. Imágenes tomadas de /NASA/Gopalswamy.	3
1-2.	Esquema general de las capas del Sol. Se aprecia la estructura interna desde el núcleo, pasando por la zona radiativa hasta la zona convectiva. También se pueden observar las capas de la atmósfera solar: fotosfera, cromosfera y corona. Imagen modificada de Calvin J. Hamilton (Views of the Solar System).	5
1-3.	Manchas solares de la región activa AR 12192. Imagen tomada con el instrumento HMI - <i>Helioseismic and Magnetic Imager</i> del satélite SDO, el 24 de octubre de 2014.	6
1-4.	Imagen en H-Alpha de la cromosfera tomada por el <i>National Solar Observatory</i> , Sacramento Peak.	7
1-5.	Una fulguración menor y una eyección de masa coronal producen una prominencia que se eleva en un arco curvo. Imagen del día 8 de septiembre de 2010 del telescopio espacial SOHO.	8
1-6.	Una gran eyección de masa coronal registrada el 2 de diciembre de 2002 por el satélite SOHO (<i>Solar and Heliospheric Observatory</i>).	9
1-7.	En la imagen se pueden ver bucles coronales de diferentes tamaños. La imagen fue tomada por el satélite TRACE el 26 de septiembre del año 2000.	10
1-8.	Energía solar en función de la longitud de onda. La curva “nivel del mar” es hecha para una masa de aire $X = \sec z = 1$, donde z es la distancia cenital del astro. Imagen tomada de Twidell and Weir (2006).	11
1-9.	Imagen de la granulación solar tomada con el instrumento SOT/Hinode el 10 de marzo de 2007 en 4308 Å.	11
1-10.	Diagrama mariposa realizado con magnetogramas del observatorio Kitt Peak. El color rojo representa flujo magnético positivo y el azul negativo. Imagen tomada de Petrie (2015).	13
1-11.	Ciclos solares desde el año 1974 hasta el 2012. La imagen muestra el número de manchas promedio mensual. Imagen tomada de Petrie (2012).	14

1-12. Modelo de dínamo solar. a) Las líneas de campo magnético poloidal van de Sur a Norte. b) La rotación solar genera líneas de campo toroidal en sentido Este-Oeste. c) Cuando la línea de campo es muy fuerte esta perfora la superficie solar. d) En esta región se forman las manchas solares. e) y f) Los puntos de pie de las manchas solares poseen polaridad opuesta. g) En las zonas de las manchas se forman flujos meridionales que generan líneas de campo poloidal, para que finalmente en h) se invierta la polaridad original. Imagen modificada de Dikpati and Gilman (2008).	15
2-1. Modelo del tubo de flujo magnético delgado. En la ubicación del tubo se presenta una depresión, en esta región el material caliente sale a la superficie. Imagen modificada de Steiner et al. (2001).	19
2-2. Perspectiva de Hinode en órbita. Imagen tomada de Tsuneta et al. (2008).	23
2-3. Esquema del montaje OTA (<i>Optical Telescope Assembly</i>) del SOT. Espejo tip-tilt (Tip tilt mirror), espejo para reducir el calor (Heat dump mirror), espejo secundario (Secondary mirror), puerta lateral (Side door), puerta superior (Top door), estructura de armadura (CFRP truss structure), espejo primario (Primary mirror), unidad de lentes colimadores (Collimator Lens Unit), Modulador de polarización: placa de cuarzo rotatoria (Polarization modulator: rotating quartz waveplate). Imagen tomada de Hurlburt et al. (2009).	24
2-4. Diseño del montaje FPP (<i>Focal Plane Package</i>) del SOT. Hurlburt et al. (2009).	25
2-5. Telescopio GREGOR en el observatorio del Teide en Tenerife, España. Cortesía Observatorio de Izaña.	26
3-1. Imagen del disco solar del día 10 de marzo de 2007 adquirida con el telescopio espacial SOHO/MDI junto con el campo de visión resaltado y ampliado. La ubicación del FOV desde el centro del Sol se encuentra en una posición de $x_{cen} = 41''$ y $y_{cen} = 104''$	28
3-2. Imagen del conjunto de datos I, de $111,6 \times 55,8$ arcseg ² (rotada 90°), en nivel cero de calibración. Se muestran varios píxeles falsos (puntos negros). La flecha roja destaca uno de ellos.	29
3-3. Imagen del disco solar del día 13 de julio de 2019 adquirida con el telescopio SDO/HMI, resaltando la región de interés que se amplía para mostrar los detalles de la granulación fotosférica. El tamaño de la imagen es de $32,4 \times 26$ arcseg ² . La posición del FOV desde el centro del Sol es $x_{cen} = 0''$, $y_{cen} = 0''$	30
3-4. Observaciones de la fotosfera en una zona de granulación solar. Izquierda: Dos imágenes del conjunto de datos I sin ajuste de intensidad. Derecha: Las mismas imágenes después de ajustar el rango de intensidad.	31

3-5. Histograma de intensidad de la primera imagen del conjunto de datos I. Se puede apreciar que la diferencia entre la intensidad mayor y menor en el 5 % del número de píxeles es de 143 (la línea roja representa el rango dinámico) y que el valor medio para la intensidad es de 97.	32
3-6. Histograma de intensidad de la imagen número 1 del conjunto de datos II. Se puede apreciar que la diferencia entre la intensidad mayor y menor en el 5 % del número de píxeles es de 68 (la línea roja representa el rango dinámico) y que la media de la distribución tiene un valor de 137.	33
3-7. De izquierda a derecha: sección de una imagen del conjunto de datos I (de 22 x 32 arcseg ²), segmento más brillante de la imagen (contorno verde) y el segmento aislado.	35
3-8. Izquierda: Parte interior de cada segmento de una imagen del conjunto de datos I (de 22 x 32 arcseg ²). Derecha: Bordes de cada segmento.	36
3-9. Izquierda: Región de una imagen del conjunto de datos I (de 22 x 32 arcseg ²). Derecha: La misma sección segmentada.	36
3-10. Cuadro de diálogo para que el usuario configure los parámetros de entrada del proceso de segmentación.	37
3-11. Sección de una imagen del conjunto de datos I y los resultados del proceso de segmentación a partir de cada una de las cinco reglas. El lector se puede remitir al documento para más detalles.	38
3-12. Imagen completa del conjunto de datos I de 55,8 x 111,6 arcseg ² . En color rojo se muestran los MBPs identificados sobre esta.	40
3-13. Interfaz gráfica de usuario para configurar los parámetros de entrada del proceso de identificación.	41
3-14. Histograma del gradiente de intensidad, para las imágenes del conjunto de datos I. Esta representación permite establecer el límite entre gránulos y MBPs. Las estructuras con un bajo gradiente de brillo son gránulos (a la izquierda de 0,2) y las estructuras con alto gradiente de brillo son MBPs (a la derecha de 0,2).	42
4-1. Píxeles de un segmento. No todos los píxeles del segmento pertenecen al MBP. Se debe definir un porcentaje de intensidad a partir del cual se cuentan los píxeles para establecer el tamaño del MBP.	43
4-2. Superficie del Punto Magnético Brillante de la figura 4-1. Se aprecian los píxeles que pertenecen al MBP y algunos de su alrededor. Es evidente que el MBP es más brillante que la red intergranular.	44
4-3. Superficie del MBP de la figura 4-1. Se aprecia el nivel de intensidad de la estructura respecto a la intensidad original de la imagen. En la zona deprimida se puede notar el contraste entre el punto brillante y su alrededor en la red intergranular.	44

4-4. Criterio para establecer el área de un MBP en píxeles. El concepto que subyace a este criterio se fundamenta en encontrar un rango de independencia entre el tamaño del MBP y el porcentaje de intensidad de corte.	45
4-5. Derivada del porcentaje de intensidad respecto al tamaño del MBP en píxeles. Esta figura muestra la pendiente de la gráfica anterior. Se puede notar que en el 80 % se presenta la menor pendiente.	46
4-6. Distribución del área de los MBPs (en km^2) con ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de la distribución bimodal (verde). La línea vertical (azul) indica la resolución espacial por difracción del instrumento SOT.	47
4-7. Distribución del área de los MBPs (km^2) con ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de la distribución bimodal (verde). La línea vertical indica la resolución espacial por difracción del SOT (azul).	49
4-8. Distribución de los diámetros de los MBPs en kilómetros con ajuste a una curva log normal (rojo) y sus componentes (verde). La recta vertical (azul) muestra el límite de la resolución óptica de Hinode.	50
4-9. Distribución de los diámetros de los MBPs (km) con ajuste a una curva log normal (rojo) y sus componentes (verde). La recta vertical (azul) muestra el límite de la resolución óptica del telescopio Hinode.	52
4-10. Una imagen completa del conjunto de datos II y MBPs identificados sobre esta en color rojo.	54
4-11. Criterio para establecer el área de un MBP en píxeles. La línea vertical verde representa nuestra definición (80 %). La línea vertical roja representa la definición estándar para el tamaño de un MBP.	55
4-12. Derivada del porcentaje de intensidad respecto al tamaño del segmento en píxeles. Esta figura muestra la pendiente de la figura 4-11. En el rango de 70 a 90 % la derivada es menor y con ello la pendiente de la recta de la figura 4-11 también es menor. Por lo tanto 80 % representa la menor pendiente. . .	55
4-13. Histograma de frecuencias del área de los MBPs (km^2) con la curva de ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de esta distribución (verde).	56
4-14. Histograma de frecuencias del área de los MBPs (km^2) con ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de esta distribución (verde).	57
4-15. Histograma del diámetro de los MBPs en km para el conjunto de datos II. Se aprecia en color rojo el ajuste a una curva logarítmica normal junto con sus dos componentes en verde.	58
4-16. Histograma del diámetro de los MBPs en km para el conjunto de datos II. Se aprecia en color rojo el ajuste a una curva logarítmica normal junto con sus dos componentes en verde.	59

4-17.Histograma del diámetro de los MBPs (en km) para el conjunto de datos II con corte en 50 % de intensidad. Se aprecian dos barras a la izquierda de la línea vertical azul, la cual representa la resolución espacial por difracción del telescopio GREGOR.	61
4-18.Distribución de la velocidad de los MBPs junto con un ajuste Rayleigh (en rojo) y sus dos componentes (en verde).	64
4-19.Distribución de la velocidad en x con ajuste Gaussiano en color rojo y en color verde sus dos componentes. La línea recta vertical se ubicó en una velocidad igual a cero.	65
4-20.Distribución de la velocidad en y con ajuste Gaussiano (rojo) y sus dos componentes (verde). La línea punteada vertical se ubicó como referencia en un valor de velocidad igual a cero.	66
4-21.Gráfica de dispersión de la velocidad en x e y . Se puede ver que el rango en el cual está el mayor número de MBPs es -5 a 5 kms^{-1} en la componente x y también de -5 a 5 kms^{-1} en la componente y	69
4-22.Distribución de velocidades (ver figura 4-21) en tres dimensiones incluyendo el número de elementos para cada valor de velocidad (Vx, Vy). Se puede ver que alrededor de 50 MBPs tienen velocidades en el rango aproximado de -2 a 2 kms^{-1} tanto en la componente x como y	70
4-23.Distribución de dos componentes de la velocidad con ajuste Rayleigh (rojo) y las dos componentes de la distribución (verde).	71
4-24.Distribución de la velocidad en x con ajuste Gauss (rojo) y sus dos componentes (verde).	72
4-25.Distribución de la velocidad en y con ajuste Gauss (rojo) y sus dos componentes (verde).	74
4-26.Gráfica de dispersión de la velocidad (Vx, Vy). Se puede ver que el rango en el cual está el mayor número de MBPs es aproximadamente -3 a 3 kms^{-1} tanto en la componente x como y	75
4-27.Imagen 4-26 en tres dimensiones. Se puede ver que alrededor de 50 MBPs tienen velocidades en el rango de -1 a 2 kms^{-1} en la componente x	76
4-28.Curva de luz de seis MBPs (diferentes colores para cada uno) del conjunto de datos I con valores de intensidad normalizados al valor medio del Sol en calma. El tiempo de vida medio de estos elementos magnéticos corresponde a una secuencia de ocho imágenes.	77
4-29.Evolución del tamaño de seis MBPs (diferentes colores para cada uno) del conjunto de datos I.	78
4-30.Camino seguido por cuatro MBPs del conjunto de datos I. El símbolo * señala el punto de partida del MBP.	79

A-1. Código para determinar el área de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %	88
A-2. Código para determinar el área de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %	88
A-3. Código para determinar el área de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %	89
A-4. Código para determinar el diámetro de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %	89
A-5. Código para determinar el diámetro de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %	90
A-6. Código para determinar el diámetro de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %	90
A-7. Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	90
A-8. Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	91
A-9. Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	91
A-10 Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	92
A-11 Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	92
A-12 Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	93
A-13 Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	93
A-14 Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I . .	94

Lista de Tablas

4-1. Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 80 %.	48
4-2. Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 50 %.	49
4-3. Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 80 %.	51
4-4. Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 50 %.	51
4-5. Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 80 %.	57
4-6. Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 50 %.	58
4-7. Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 80 %.	59
4-8. Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 50 %.	60
4-9. Parámetro de ajuste μ para la velocidad del conjunto de datos I.	63
4-10. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente x de la velocidad del conjunto de datos I.	66
4-11. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente y de la velocidad del conjunto de datos I.	67
4-12. Parámetro de ajuste μ para la velocidad del conjunto de datos II.	72
4-13. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente x de la velocidad del conjunto de datos II.	73
4-14. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente y de la velocidad del conjunto de datos II.	73

1. Introducción

En los últimos años los diferentes avances en el campo de la astrofísica solar han permitido ampliar, cada vez más, la comprensión sobre nuestra estrella. Avances teóricos han hecho posible entender diversos fenómenos solares, y la creación de nuevos instrumentos ha permitido detallar en nuestra estrella, diminutos elementos que nunca antes habíamos visto, al tiempo que simulaciones numéricas cada vez más realistas han facilitado modelar eventos en el Sol sin precedentes.

Actualmente, se continúan realizando investigaciones que aporten al gran cúmulo de conocimiento sobre nuestra estrella. En particular, el estudio de pequeñas estructuras sobre la superficie del Sol ha sido de gran interés durante los últimos 20 años. Estos elementos, de naturaleza magnética, son tan pequeños que se requiere de técnicas avanzadas de observación para su detección en imágenes solares. Reciben el nombre de Puntos Magnéticos Brillantes o MBPs (por las siglas en inglés de *Magnetic Bright Points*) y aún siendo tan pequeños pueden llegar a aportar la energía suficiente para calentar la corona, permitiendo ampliar la comprensión del conocido *problema del calentamiento coronal* como lo indica Liu et al. (2018). Esto se debe a que los MBPs se encuentran sobre toda la superficie del Sol y a que albergan intensos campos magnéticos. Teóricamente, el movimiento del punto de pie o anclaje (*footpoint*) de un MBP genera un flujo de energía que asciende a la corona solar y puede aportar al calentamiento de la misma (Choudhuri et al., 1993). Por lo tanto, se hace necesario conocer cuál es área, el diámetro y la velocidad de estos elementos. Para deducir estos parámetros, se realiza la identificación y el seguimiento de los MBPs a partir de una serie de datos de alta resolución espacial y temporal.

La identificación de MBPs se realiza con un algoritmo automático de detección que se basa en el siguiente procedimiento: se segmenta cada una de las imágenes, haciendo una partición de las mismas en ciertas zonas de igual intensidad. Posterior a esto, se identifican los MBPs con base en su gradiente de brillo, el cual es alto debido a que estos son elementos muy brillantes que se encuentran en una región más oscura. Finalmente, estos diminutos elementos son rastreados en una secuencia de imágenes con el fin de determinar sus características dinámicas y evolutivas. Este proceso lo describe en mayor detalle Utz et al. (2014).

Las imágenes que se procesan para este fin son adquiridas por telescopios solares de alta resolución, como el telescopio GREGOR, que produce series temporales de alta calidad gracias

a su sistema de óptica adaptativa, y el telescopio espacial Hinode, cuyas observaciones no son afectadas por la atmósfera terrestre ni por la degradación asociada en la calidad de la imagen.

1.1. El Sol

El estudio del Sol es de gran importancia debido a que esta estrella es nuestra principal fuente de luz y energía y, al ser la más cercana al planeta Tierra, representa un gigantesco laboratorio astrofísico en donde podemos estudiar en detalle gran cantidad de procesos físicos. Los resultados que se derivan de sus estudios pueden ser extendidos a estrellas similares (e.g. rotación estelar, manchas estelares, actividad estelar, entre otros).

Durante varios siglos diferentes culturas han observado el Sol con el fin de entender su naturaleza. Con el advenimiento del telescopio se descubren las manchas solares, posteriormente se le asocia al Sol un periodo “de actividad” de aproximadamente once años, así como también se empezaron a encontrar detalles como las llamadas *plages* y las fáculas, las cuales son zonas en la superficie solar donde el brillo superficial es ligeramente mayor a su alrededor. Desde tiempos remotos, diversas culturas pudieron apreciar fenómenos relacionados con el Sol, como los eclipses solares, entre los que se destacan los eclipses totales de Sol, en los cuales aparecía una envoltura que luego se conoció como la corona solar. Su forma varía, de modo que en diversos eclipses tiene un aspecto diferente, siendo mucho más amplia cerca de los máximos de actividad solar (Stix, 2012), como se aprecia en la figura 1-1.

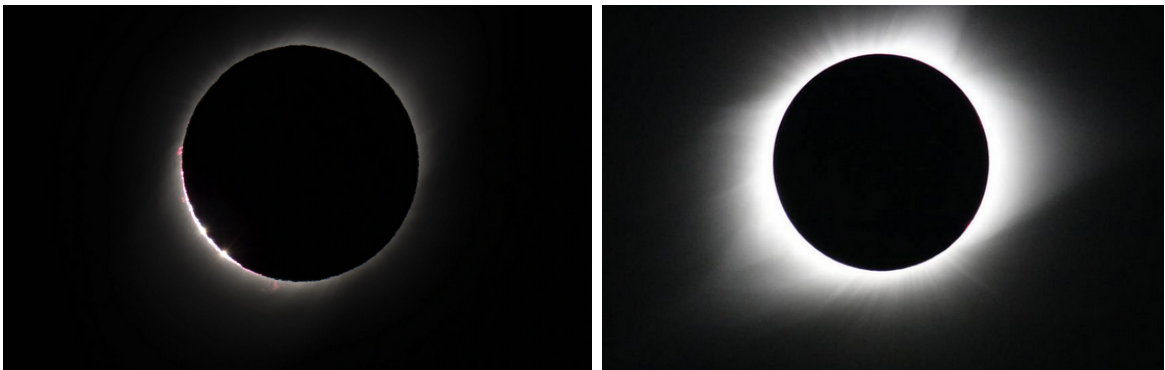


Figura 1-1.: En la imagen de la izquierda se muestra una fotografía de la corona solar durante el eclipse total de Sol del 2 de julio de 2019 cerca al mínimo solar, y en la imagen de la derecha se aprecia una fotografía del eclipse total de Sol del 21 de agosto de 2017 cerca al máximo solar. Imágenes tomadas de /NASA/Gopalswamy.

Con la alborada del siglo XX hemos logrado profundizar en el conocimiento de la estructura

interna del Sol y de su atmósfera, tanto de la fotosfera como de la cromosfera. Así mismo, se han desarrollado herramientas o técnicas observacionales que permiten el estudio de la corona solar de forma permanente. Lyot en 1930 construyó el primer coronógrafo, que consistía en una máscara que eclipsaba el disco solar permitiendo detectar la corona. En 1908 Hale pudo medir la intensidad de campo magnético en las manchas solares empleando el efecto Zeeman evidenciando la naturaleza magnética de las manchas y su afectación en la corona (Chaplin, 2006). Estudios posteriores, en diferentes regiones del espectro, permitieron comprender diversos fenómenos heliosféricos. Por ejemplo, la imagen del Sol en un filtro de la línea $H\alpha$ (6563 Å) que muestra no solamente fenómenos de la cromosfera solar sino también fenómenos tales como prominencias, espículas, jets, entre otros.

En el último par de décadas del siglo XX, numerosas misiones espaciales lograron estudios en diversas regiones del ultravioleta, rayos X, rayos gamma, análisis de magnetogramas y Dopplergramas del Sol, así como el estudio del viento solar o partículas provenientes del Sol y de ondas de radio. Todo este acervo científico ha permitido hacernos a una imagen mucho más profunda del Sol y su entorno.

También se han realizado investigaciones que estudian la relación del Sol con el sistema solar y sus implicaciones en el denominado clima espacial, ya que al ser un sistema dinámico con un campo magnético variable produce eventos solares de gran potencia que afectan su entorno, como las fulguraciones solares. En septiembre 1 de 1859, Carrington observó un destello brillante cerca de una región de manchas solares, fenómeno que se denominó *solar flare* (ver Sweet (1969)) en su expresión inglesa o fulguración en nuestro idioma. En particular, las fulguraciones que emiten en el rango visible se les conoce hoy en día como fulguraciones en luz blanca (white light flare). Una sola fulguración (erupción solar) puede ir acompañada de la eyección de masa coronal (CME por sus siglas en inglés) causando efectos sobre nuestro planeta que pueden representar daños en las comunicaciones de onda de radio corta, y afectaciones a satélites y sistemas eléctricos. Por ejemplo, al día siguiente del evento de Carrington las auroras boreales se vieron tan al sur como Colombia, y en el norte de Estados Unidos hubo gran afectación tanto en las estaciones de telégrafo como en las líneas de transmisión de las mismas. Modernamente, el 13 de marzo de 1989, como lo indica Kitchatinov (2014) se presentó un gran apagón en el estado de Québec, Canadá debido a una tormenta magnética creada por las partículas provenientes del Sol luego de una CME asociada a una fulguración muy energética (clase GOES X15) que ocurrió tres días antes.

Como estrella, se estima que el Sol se formó hace aproximadamente 5000 millones de años. En la clasificación espectral de Harvard es una estrella del tipo G5 de la secuencia principal. Su temperatura superficial efectiva es de ~ 5777 K, con una masa de 2×10^{30} kg y un radio $R_{\odot} = 7 \times 10^8$ m. Se estima que se encuentra en la mitad de su tiempo de vida como estrella en la fase secuencia principal. Estudios teóricos han mostrado que la fuente de energía

principal en su núcleo es la transformación de Hidrógeno en Helio a partir de procesos de fusión nuclear conocidos como la cadena protón-protón. Se encuentra a una distancia de una unidad astronómica de la Tierra (1 UA), esto es aproximadamente $1,5 \times 10^{11}$ m, e irradia una energía de $3,8 \times 10^{26}$ J cada segundo (Stix, 2012).

1.1.1. Estructura interna

El interior del Sol está conformado por varias regiones, dependiendo de los procesos físicos que se dan en esas zonas. Comenzando por su núcleo, que ocupa un 25 % de su radio desde el centro y contiene casi la mitad de su masa, siendo la región donde se produce la energía del Sol. Posteriormente, se encuentra una región muy amplia en donde el transporte de la energía se lleva a cabo por radiación, luego hacia el 86 % del radio del Sol se encuentra una región donde el transporte de energía se da por convección. A estas zonas se les conoce con el nombre de zona radiativa y zona convectiva, respectivamente, como se muestra en la figura 1-2.

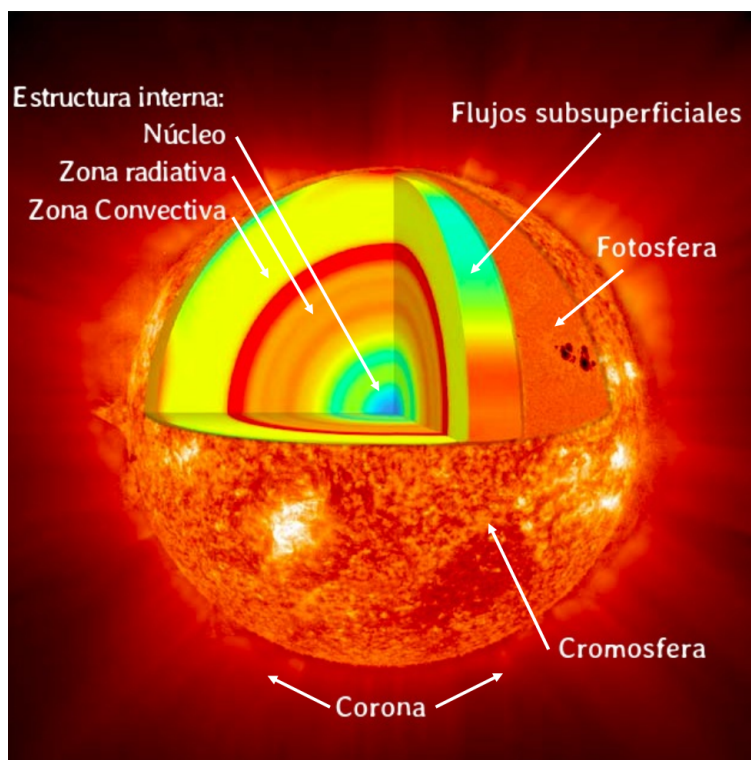


Figura 1-2.: Esquema general de las capas del Sol. Se aprecia la estructura interna desde el núcleo, pasando por la zona radiativa hasta la zona convectiva. También se pueden observar las capas de la atmósfera solar: fotosfera, cromosfera y corona. Imagen modificada de Calvin J. Hamilton (Views of the Solar System).

El núcleo cubre un cuarto del interior solar y es en este donde ocurre el proceso que transforma a cuatro protones en Helio, energía y algunos subproductos, principalmente a través de la cadena protón-protón. La energía en el núcleo es generada por reacciones termonucleares creando temperaturas extremas de alrededor de $15,7 \times 10^6$ K. Bajo estos extremos de temperatura y presión (10^{12} atm), explica Gibson (1973), tienen lugar las reacciones de fusión nuclear que alimentan la energía de la estrella. Con el aumento del radio, disminuye la temperatura y la densidad encontrando la zona radiativa en la cual la principal forma de transferencia de energía es por medio de la radiación. En esta zona, la energía se mueve lentamente hacia afuera tomando cientos de miles de años para atravesar esta capa. Por último, continua Gibson (1973), se encuentra la zona convectiva ocupando el 14% restante del interior solar (a $0,86 R_{\odot}$). En esta capa la temperatura ha decaído y la opacidad aumenta, debido a que los fotones son absorbidos, impidiendo el transporte radiativo, por lo tanto se favorece la convección. Aquí la energía continúa moviéndose hacia la superficie por medio de corrientes de convección de gas caliente y frío.

1.1.2. Atmósfera solar

Al igual que el interior, la atmósfera solar está dividida en varias capas, iniciando con la fotosfera o esfera de luz, pasando por la cromosfera o esfera de color, la región de transición y finalmente la corona como se puede apreciar en la figura 1-2.

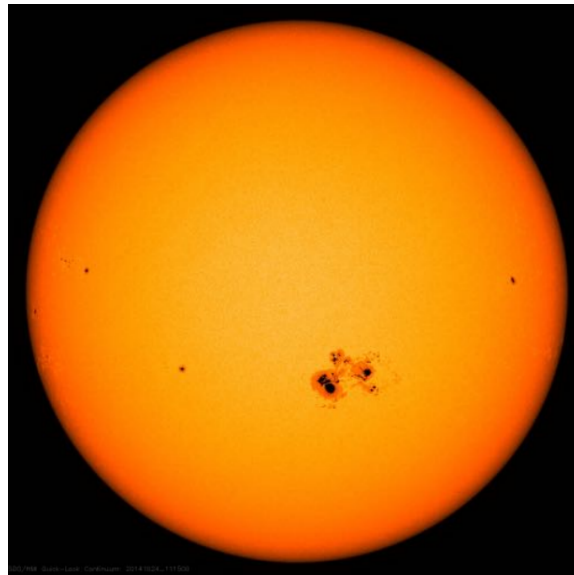


Figura 1-3.: Manchas solares de la región activa AR 12192. Imagen tomada con el instrumento HMI - *Helioseismic and Magnetic Imager* del satélite SDO, el 24 de octubre de 2014.

La capa más interna de la atmósfera solar es la **fotosfera**, que será discutida en más detalle en la sección 1.3, cuya profundidad óptica es $\tau_{5000} = 1$, en esta se producen las líneas de absorción, su temperatura es de aproximadamente 5800 K. Es la superficie que emite radiación al espacio, por ello, es la parte visible del Sol, la cual se extiende por alrededor de 500 kilómetros. Su principal característica es la granulación solar, que corresponde a celdas convectivas con tamaños de miles de kilómetros, (Wiegmann et al., 2014). Es en esta región donde aparecen las manchas solares, presentadas en la figura **1-3**, que son concentraciones de campo magnético de menor temperatura que sus alrededores y con escalas espaciales de alrededor de 10000 km.

Seguida de esta, se encuentra la **cromosfera**, mostrada en la figura **1-4**, de unos 1500 km de espesor. Esta región se caracteriza por tener un cambio abrupto de temperatura, en su parte inicial conocida como cromosfera baja la temperatura promedio es de 4000 K y en su parte final o cromosfera alta la temperatura es de aproximadamente 6000 K (Gibson, 1973). Es en esta zona donde se producen fenómenos como las *plages*, que son abrillantamientos alrededor de las manchas solares (partes blancas de la imagen) equivalentes a las fáculas que se presentan en la fotosfera, las *espículas*, cuyo mecanismo de generación no se conoce con claridad, y los *filamentos cromosféricos* (estructuras elongadas y oscuras en la imagen), los cuales son evidencia de campo magnético y se presentan en el centro del disco (Gibson (1973)). Los filamentos ubicados en el limbo solar, son llamados prominencias, y se ven como estructuras brillantes que contrastan con el fondo oscuro del espacio como se aprecia en la figura **1-5**.

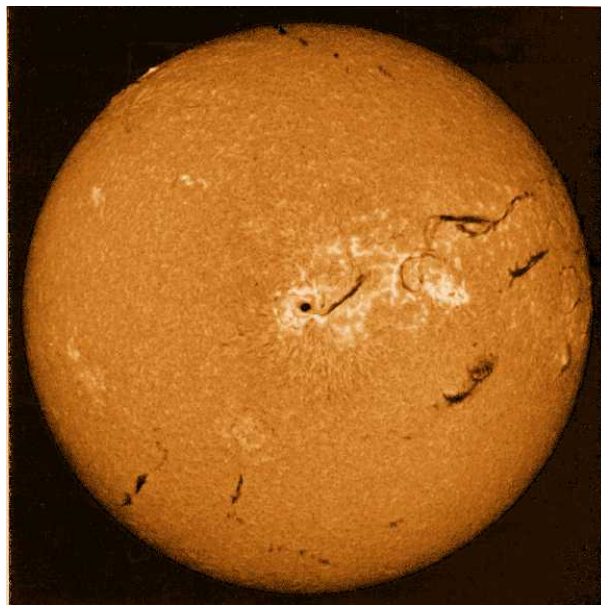


Figura 1-4.: Imagen en H-Alpha de la cromosfera tomada por el *National Solar Observatory*, Sacramento Peak.

La cromosfera no es visible fácilmente, ya que es una capa ópticamente delgada, pero sí puede ser observada, incluso a simple vista, justo en el momento de la totalidad durante un eclipse de Sol cuando la luna bloquea la luz que proviene de la fotosfera, Stix (2012). Durante estos eclipses, esta región presenta más de 3000 líneas de emisión dentro de las cuales se encuentran $H\alpha$ (6563 Å), $H\beta$ (4861 Å), $H\gamma$ (4340 Å) y $H\delta$ (4102 Å). En particular, la línea del hidrógeno $H\alpha$ es una de las líneas cromosféricas más fuertes.

Cuando observamos el espectro del Sol, la línea de $H\alpha$ aparece en absorción, la cual ocurre en la fotosfera. Ahora bien, si usamos un filtro $H\alpha$ este permite observar estructuras cromosféricas pues en la cromosfera la línea $H\alpha$ es de emisión. Las llamadas espículas, mencionadas anteriormente, son un fenómeno muy interesante que se observa sobre el limbo solar como elementos levemente oscuros sobre la superficie brillante del Sol. Son estructuras de tipo “jet” que poseen un movimiento preferentemente hacia afuera del limbo solar y alcanzan 10000 km de altura sobre la cromosfera. Su tiempo de vida promedio está entre pocos segundos a minutos, ver Gibson (1973).

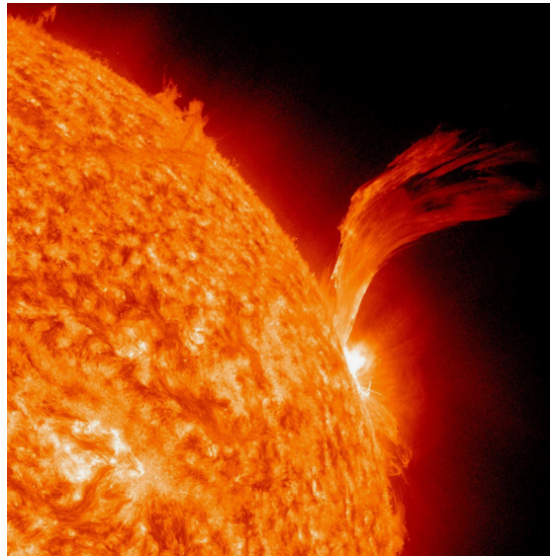


Figura 1-5.: Una fulguración menor y una eyección de masa coronal producen una prominencia que se eleva en un arco curvo. Imagen del día 8 de septiembre de 2010 del telescopio espacial SOHO.

Entre la cromosfera y la corona, existe una delgada zona llamada *región de transición*, donde la temperatura aumenta rápidamente y la densidad disminuye. Los chorros o jets son estructuras características de esta región (ver De Pontieu et al. (2017)), y se reconocen como zonas brillantes con un tiempo de vida que está en un rango de 20 a 80 segundos y una temperatura de $\sim 10^5$ K. Como afirma Stix (2012) uno de los instrumentos que se ha dedicado a realizar observaciones de esta zona es el telescopio y espectrógrafo de alta resolución HRTS

(*High Resolution Telescope and Spectrograph*). El telescopio espacial IRIS (*Interface Region Imaging Spectrograph*) y tres canales del observatorio de dinámica solar SDO/AIA (171 Å, 304 Å y 1600 Å) también han hecho posible el estudio de diversos fenómenos explosivos en esta región de la cual aún se desconoce bastante.

Finalmente, **la corona** es la última capa de la atmósfera solar y se extiende millones de kilómetros en el sistema solar. Produce las líneas fuertes o radiación ultravioleta como las líneas del Hierro Fe XIV y Calcio Ca XV. Sorprendentemente, en la corona la temperatura aumenta hasta 2 millones de Kelvin, lo cual representa un problema actualmente abierto muy debatido y denominado “el calentamiento de la corona solar”. Esta región de la atmósfera solar emite en ondas de radio y rayos X, y es aquí donde se produce el viento solar que está conformado por partículas cargadas que fluyen hacia el espacio exterior y cuya trayectoria está influenciada por el campo magnético del Sol, ver Stix (2012). La corona no es fácilmente observable, pero en los eclipses totales de Sol se le puede ver como un anillo de luz blanca o con un instrumento llamado coronógrafo que cumple la función de eclipsar la luz del Sol de manera artificial.

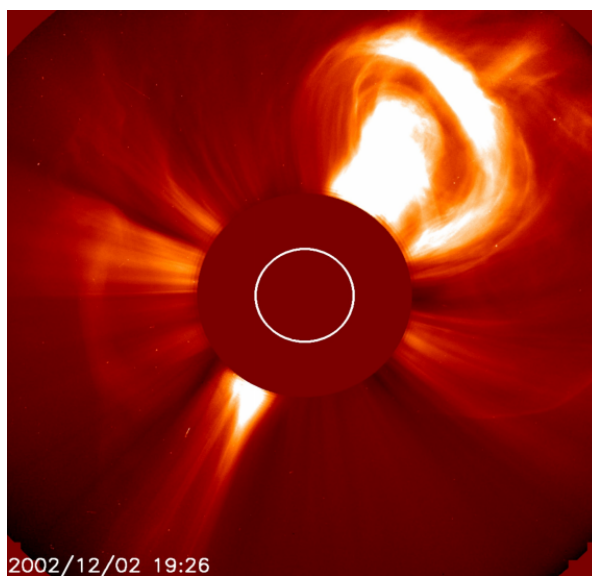


Figura 1-6.: Una gran eyección de masa coronal registrada el 2 de diciembre de 2002 por el satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*).

Los fenómenos característicos de esta región son las eyecciones de masa coronal o CMEs (*Coronal Mass Ejections*) que corresponden a plasma expulsado por el Sol como se muestra en la figura 1-6, los bucles coronales o estructuras de plasma atrapadas en las líneas de campo magnético (figura 1-7) y los agujeros coronales o regiones donde las líneas de campo están abiertas permitiendo que las partículas escapen al medio interplanetario. Para más

detalles ver Wiegmann et al. (2014).



Figura 1-7.: En la imagen se pueden ver bucles coronales de diferentes tamaños. La imagen fue tomada por el satélite TRACE el 26 de septiembre del año 2000.

1.1.3. Fotosfera

En esta sección se realizará una descripción más detallada de la fotosfera, conocida como superficie solar. Al avanzar hacia el exterior de la zona de convección, se encuentra la primera capa de la atmósfera solar llamada esfera de luz o fotosfera. En esta región la densidad de gas, la presión y la temperatura han disminuido. Aquí un fotón tiene una baja probabilidad de ser reabsorbido o dispersado, es más probable que este escape hacia capas más altas. Algunas de las características de esta zona son: la gravedad superficial tiene un valor de $27g$, la presión es de $\sim 0,01$ atm y la temperatura en la parte superior tiene un valor de ~ 4300 K (Gibson, 1973). La energía irradiada por la fotosfera está centrada en el espectro visible, como se puede ver en la figura 1-8, y constituye la mayoría de la energía emitida al espacio.

Un fenómeno característico de la fotosfera solar es el *oscurecimiento del limbo* en luz visible. Esto se debe a que si el Sol es considerado esférico, su proyección como imagen es la de un disco, así que la parte radialmente más externa del disco solar básicamente contiene la luz que procede de las partes más altas de la misma, las cuales son de menor temperatura que las capas más internas de la fotosfera (Karttunen et al., 2016). Por el contrario, al observar el Sol en rayos X, se aprecia un limbo brillante, debido a que en dichas regiones contribuyen más elementos de la corona que en la parte central del disco de imagen. Recordemos que la corona solar tiene temperaturas del orden de $2 - 3 \times 10^6$ K, por lo tanto es un emisor fuerte en rayos X blandos, conocidos también como rayos térmicos.

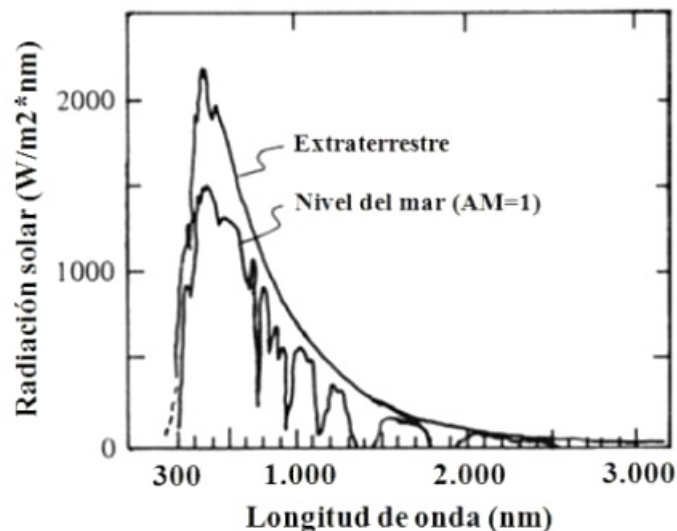


Figura 1-8.: Energía solar en función de la longitud de onda. La curva “nivel del mar” es hecha para una masa de aire $X = \sec z = 1$, donde z es la distancia cenital del astro. Imagen tomada de Twidell and Weir (2006).

Otra de las características más notables de la fotosfera es la granulación, la cual es un indicativo de la convección del Hidrógeno. La granulación es un patrón de células convectivas similar a granos, presentado en la figura 1-9; en el centro de cada célula el plasma caliente sube, se desplaza horizontalmente para luego descender en forma de gas frío en su borde (Karttunen et al., 2016). El tiempo de vida de estas células convectivas es de aproximadamente 10 minutos y su tamaño está en el rango de $0,5'' - 2''$ (Kawaguchi, 1980).

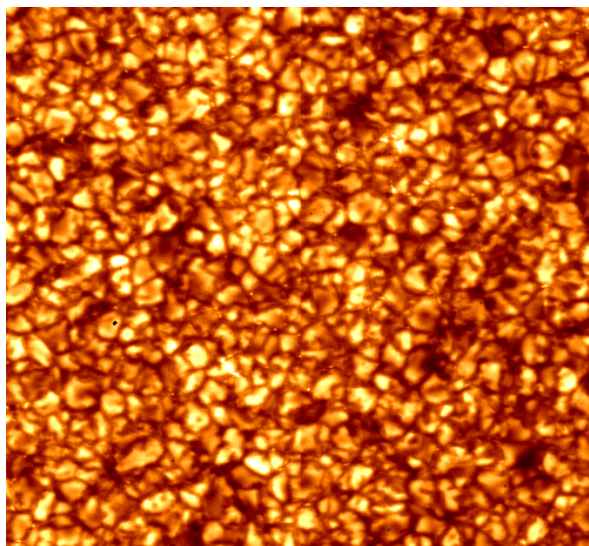


Figura 1-9.: Imagen de la granulación solar tomada con el instrumento SOT/Hinode el 10 de marzo de 2007 en 4308 \AA .

Un patrón más grande que la granulación, unas 18 veces mayor, es la supergranulación que dura en promedio 120 veces más que un gránulo (~ 1 día), posee un tamaño angular que está en un rango de $0,3'$ - $0,6'$ (Del Moro et al., 2004). Se considera que también es de origen convectivo.

1.1.4. Campo magnético solar

Dado que la presente investigación se enmarca en el contexto del campo magnético, a continuación se realizará una breve descripción de la teoría relacionada con el campo magnético a gran escala, la teoría de dínamo solar y el ciclo solar magnético. Lo anterior debido a la pertinencia de los MBPs como estructuras pequeñas de fuerte campo magnético, que son elementos determinantes en el periodo de mínimo solar cuando prácticamente no hay regiones activas. En el capítulo 2 se realizará la descripción del campo magnético a pequeña escala.

Son varias las estructuras que revelan la magnitud del campo magnético solar, desde escalas grandes como manchas solares (10000 km de diámetro), que tienen un campo magnético de alrededor de 4500 G, hasta diminutos puntos brillantes (100 km de diámetro) de varios kilogauss. Dichas estructuras son concentraciones de campo magnético que se forman en tubos de flujo en la zona convectiva (ver Domingo et al. (2009)). Hay más fenómenos que evidencian la presencia del campo magnético solar y este abarca no solo grandes escalas de longitud sino también de tiempo. Las manchas solares son la evidencia sobre la superficie solar de la perforación de los tubos de flujo que provienen del interior solar. Por su parte, las fulguraciones son la reorganización de enormes bucles de campo magnético que no pueden escapar del Sol. En adición a esto, también se presentan grandes concentraciones de campo magnético en regiones en las cuales unos tubos de flujo muy estrechos atraviesan la fotosfera solar y corresponden a los mencionados MBPs.

El campo magnético solar a gran escala puede ser representado como un enorme imán de barra con sus polos cercanamente alineados con el eje de rotación del Sol. Lo anterior representa un modelo de dipolo simple a gran escala con sus líneas de campo envolviendo al Sol de polo a polo lo cual representa una configuración poloidal. Con el transcurrir del tiempo, esta configuración empieza a volverse toroidal, es decir en sentido este-oeste. En la figura **1-10** se muestra que en el inicio de un ciclo empiezan a aparecer manchas solares en latitudes de aproximadamente 40° tanto al norte como al sur del ecuador solar y con el paso de los años estas manchas empiezan a aparecer en latitudes más bajas alcanzando un máximo en su número y ubicadas en aproximadamente 20° al norte y al sur del ecuador solar (ver Karttunen et al. (2016)). Al transcurrir un tiempo aproximado de 11 años se repite esta variación en el número y ubicación de las manchas, como se puede notar en la figura **1-11**.

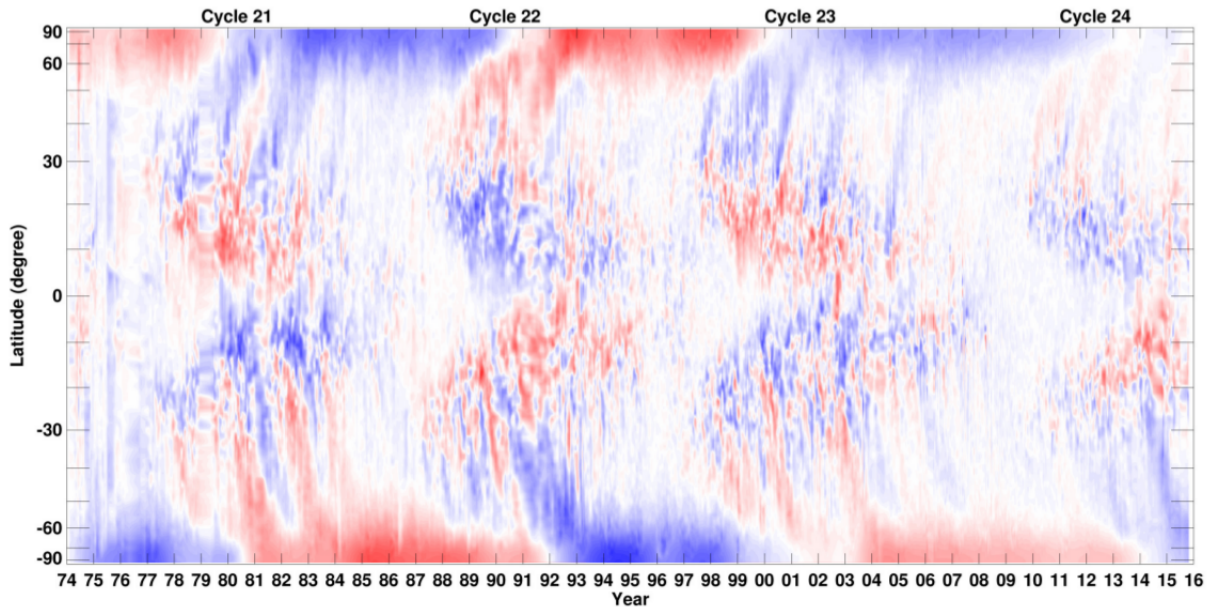


Figura 1-10.: Diagrama mariposa realizado con magnetogramas del observatorio Kitt Peak. El color rojo representa flujo magnético positivo y el azul negativo. Imagen tomada de Petrie (2015).

Al cabo de unos 22 años la componente poloidal del campo magnético cambia de polaridad ocasionando que las manchas también cambien su polaridad (ver reglas de polaridad formuladas por Hale, descritas en Stix (2012)). Si se piensa en un enorme imán de barra ubicado en sentido norte sur, un giro de 180° de esta barra representaría la inversión del campo magnético, la cual se produce cuando las manchas ocasionadas por el campo magnético toroidal son más numerosas.

La primera vez que se habla del ciclo solar es en 1844 cuando Schwabe reportó que la aparición de manchas solares se presentaba cada 10 años, (Stix, 2012). Posteriormente Martin Woodard y Bob Noyes encontraron evidencia del ciclo solar en el año 1980 al observar datos recopilados del instrumento ACRIM a bordo del satélite *Solar Maximum Mission* de la NASA. Estos investigadores encontraron que las frecuencias de los modos completos del Sol oscilaban con el pasar de los años, siendo mayores en los periodos de alta actividad solar (mayor número de manchas) y menores en los periodos de mínima actividad solar (Chaplin, 2006). Actualmente sabemos que estos cambios en el ciclo solar se deben a la regeneración y reorganización de los campos magnéticos; el viejo campo magnético se desintegra para dar paso al nuevo. Lo anterior sucede tanto en las capas internas del Sol como en su atmósfera y se evidencia en fenómenos como las asombrosas fulguraciones.

Una clara evidencia del ciclo solar es la presencia y la variación en el número de manchas solares. Sorprendentemente, como lo indica Karttunen et al. (2016) en la segunda mitad del

siglo XVII estas manchas solares casi desaparecieron por completo de la superficie del Sol. A este evento se le conoce como mínimo de Maunder, en honor a Walter Maunder que fue quien lo registró. Se cree que en este periodo de tiempo también disminuyó la radiación solar.

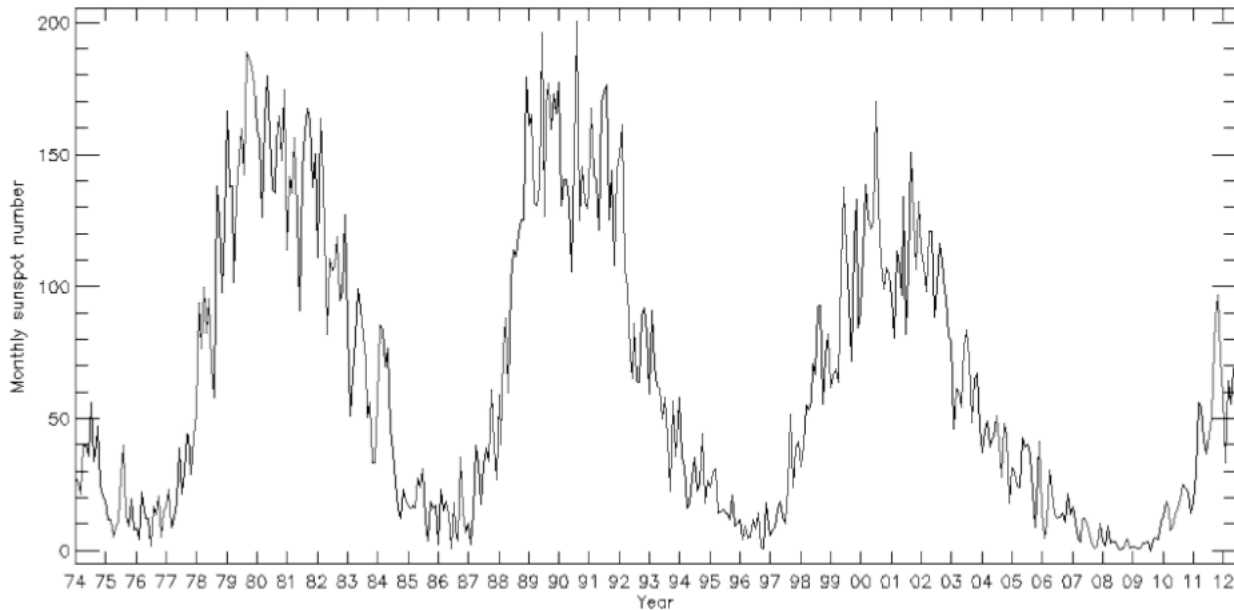


Figura 1-11.: Ciclos solares desde el año 1974 hasta el 2012. La imagen muestra el número de manchas promedio mensual. Imagen tomada de Petrie (2012).

Pero, ¿qué produce el campo magnético en el Sol? Como afirma Solanki et al. (2006) se estima que un dínamo causado por la rotación de una zona que se encuentra justo debajo de la zona convectiva es la causa de la actividad solar. Allí el campo magnético se estira y se extiende por causa de la rotación. El campo se aplasta, y aumenta el número de líneas de campo por lo que este se hace más fuerte y expulsa al plasma provocando que los tubos sean más ligeros y puedan flotar y ascender hasta perforar la fotosfera y es allí donde aparecen las manchas solares (ver figura 1-12).

Los puntos de anclaje de las manchas solares poseen polaridad opuesta como se puede ver en la figura 1-12 e y f. Lo anterior se debe a que a medida que el Sol rota las líneas de campo a su alrededor, que se encuentran en sentido Norte-Sur, se alargan en sentido Este-Oeste por causa de dicha rotación, y la parte terminal del pliegue romperá la superficie solar formando un bucle de campo magnético en el que uno de los anclajes marca el lugar donde el campo asciende y el otro donde el campo desciende de regreso a la superficie solar, Chaplin (2006).

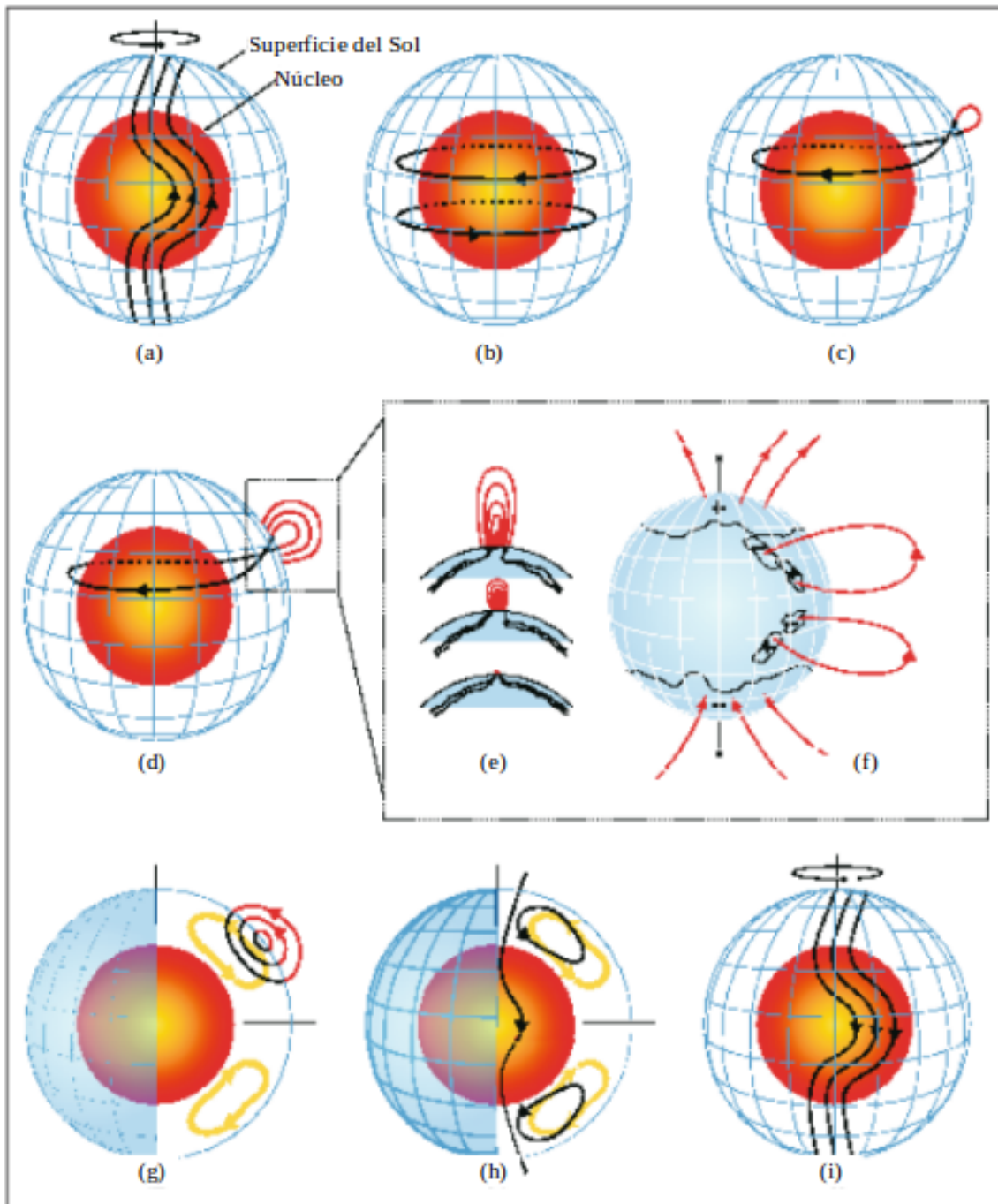


Figura 1-12.: Modelo de dínamo solar. a) Las líneas de campo magnético poloidal van de Sur a Norte. b) La rotación solar genera líneas de campo toroidal en sentido Este-Oeste. c) Cuando la línea de campo es muy fuerte esta perfora la superficie solar. d) En esta región se forman las manchas solares. e) y f) Los puntos de pie de las manchas solares poseen polaridad opuesta. g) En las zonas de las manchas se forman flujos meridionales que generan líneas de campo poloidal, para que finalmente en h) se invierta la polaridad original. Imagen modificada de Dikpati and Gilman (2008).

La teoría que sustenta el modelo del dínamo solar es la inducción electromagnética. Este mecanismo es análogo al funcionamiento de un dínamo de bicicleta en el que la energía mecánica hace girar un eje que está magnetizado y se encuentra dentro de una bobina. Este movimiento genera un campo magnético variable que induce una corriente eléctrica en la bobina y esta corriente alimenta una pequeña bombilla en la bicicleta.

La primera vez que se sugiere la teoría de un dínamo solar es en 1919, año en el que Joseph Larmor plantea esta idea (Tobias, 2002). Sin embargo, en la actualidad es un campo aún desconocido pero sustentado por evidencia observacional. Por ejemplo permite explicar el hecho que el campo magnético poloidal se convierta en toroidal para dar paso a las manchas solares. Sin embargo, no solamente durante el ciclo solar se presenta un cambio del campo magnético poloidal al toroidal sino que, además, al cabo de 22 años sucede el efecto contrario, esto es, el campo magnético toroidal se transforma en poloidal con sus polos norte y sur invertidos, y las regiones activas nuevas que se han formado también poseen una polaridad invertida respecto al ciclo anterior (Chaplin, 2006).

Para que se presente el efecto de dínamo en el Sol se requiere de dos componentes: por un lado un campo magnético y por otro un conductor en movimiento, este último es el plasma solar. El efecto es el siguiente, el movimiento del plasma conductor en el campo magnético existente genera campos eléctricos que a su vez producen corrientes eléctricas y nuevamente estas corrientes eléctricas generan nuevos campos magnéticos (Tobias, 2002).

A lo largo de los años diversas investigaciones han tratado de encontrar el lugar exacto donde ubicar al dínamo en el Sol. Como explica Chaplin (2006), una primera idea surgió al mencionar que este podría estar localizado en la superficie. Lo anterior porque no se conocía el movimiento del plasma en el interior y porque al colocar al dínamo allí se podía explicar, a partir de la rotación diferencial observada, el surgimiento y desplazamiento de las manchas solares hacia el ecuador junto con el cambio de campo magnético poloidal en toroidal, lo que se conoce como efecto omega. Posteriormente, continua Chaplin (2006), se ubica el dínamo en la zona de convección al considerar que la velocidad de rotación disminuye en la dirección interior del Sol. Se elige esta región debido a su alta conductividad y al movimiento de su plasma. Al igual que en el modelo anteriormente mencionado esta ubicación del dínamo también permite explicar el cambio de un campo magnético poloidal en uno toroidal pero el efecto inverso no puede ser explicado por este modelo. Un tercer modelo ubica al dínamo en una delgada región del interior solar denominada tacoclina que se cree que rota como un cuerpo rígido. Este modelo surgió porque en los dos anteriormente mencionados no había correspondencia entre el gradiente positivo de los modelos de rotación y el gradiente negativo del modelo de dínamo en la zona de convección (ver Chaplin (2006) para más detalles.)

Por el contrario, los datos observacionales llevaron a la conclusión de que había una delgada

capa justo debajo de la zona de convección en la cual el gradiente de rotación es tan fuerte que podía ser el responsable del efecto omega sobre las líneas de campo magnético. En este modelo un campo poloidal inicial se ubica en la tacoclina y por causa de la rotación diferencial del Sol las líneas de campo se curvan dando paso a un campo magnético toroidal a lo largo del ecuador. Una vez este campo es lo suficientemente fuerte empieza a subir por la zona de convección ya que experimenta la flotabilidad que genera el aumento de la presión magnética para finalmente perforar la superficie del Sol dando paso a las manchas solares. Con el tiempo, los residuos de campo magnético se dispersan y son arrastrados hacia los polos por corrientes meridionales. El campo magnético vuelve a descender a la tacoclina y el ciclo se repite (Babcock, 1961). Este modelo se conoce con el nombre de dínamo de Babcock y se ajusta muy bien a los resultados observacionales. Para más detalles sobre el proceso del ciclo ver figura **1-12**.

En conclusión, son varios los modelos que intentan explicar la naturaleza del campo magnético solar y la ubicación del dínamo. Aún existen muchos detalles en estos modelos de dínamo solar que no son muy claros. La discusión continúa y se sigue buscando evidencia observacional y teórica para explicar los fenómenos mencionados.

2. Puntos Magnéticos Brillantes

En el presente capítulo se realizará una introducción a los Puntos Magnéticos Brillantes (MBPs por sus siglas en inglés). En la primera sección se discutirá qué es un MBP y cuáles son sus propiedades físicas. Por otro lado, en la segunda sección se describirán de manera breve las investigaciones que se han realizado acerca del estudio de estos elementos magnéticos.

2.1. Caracterización de los Puntos Magnéticos Brillantes

Los MBPs son estructuras a pequeña escala en la fotosfera solar que se encuentran sobre todo el disco solar, tanto en la superficie del Sol en calma como en regiones activas. Se localizan en la red intergranular, específicamente aparecen en la unión de celdas granulares. Están asociados con regiones de fuerte campo magnético de varios kilogauss, del orden de 1,5 kG, (Steiner et al. (2001), Wiehr et al. (2004), Nisenson et al. (2003), Keller (1992)). Se caracterizan por presentar un diámetro en el rango de 100 a 300 km, presentan una velocidad promedio de 0,2 - 5 kms⁻¹ y un tiempo de vida de alrededor de 2,5 a 10 minutos como lo muestran los resultados de Beck et al. (2007), Sánchez et al. (2004), Utz et al. (2009b), entre otros.

Estas estructuras corresponden a tubos delgados de flujo magnético (ver figura 2-1) que inician en la fotosfera y se amplían con el aumento de la altura (este modelo de confinamiento de los tubos de flujo se aplica principalmente para la fotosfera y la cromosfera, en donde la densidad no es tan baja como en la corona solar). La presión magnética dentro del tubo en unidades SI está dada por:

$$P_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2-1)$$

Donde P_B es la presión magnética, B el campo magnético y μ_0 la permeabilidad del vacío.

Cuando se observan estos elementos magnéticos en fotogramas de alta resolución, se ven más brillantes que sus alrededores; esto se debe a que el campo magnético en el tubo de flujo produce una presión magnética y, con el fin de que haya equilibrio, la presión del gas dentro del tubo debe ser menor provocando una menor densidad dentro del mismo. Por ende la opacidad disminuye generando que se emita más radiación desde las capas más profundas.

Sumado a esto, las paredes calientes del tubo de flujo también aportan un exceso de radiación que hace que el elemento magnético se vea brillante (Utz, 2007).

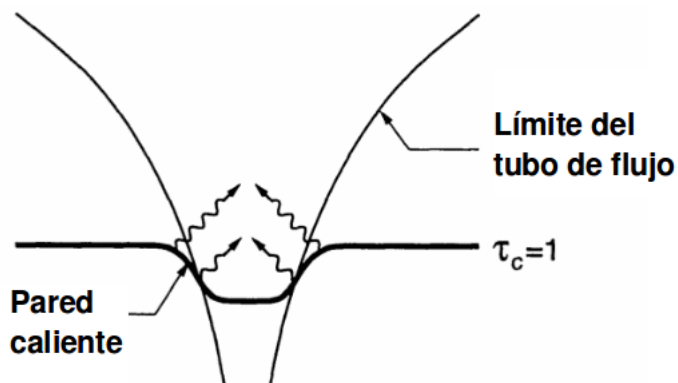


Figura 2-1.: Modelo del tubo de flujo magnético delgado. En la ubicación del tubo se presenta una depresión, en esta región el material caliente sale a la superficie. Imagen modificada de Steiner et al. (2001).

Como ya se ha mencionado, estos elementos magnéticos son notablemente visibles en la atmósfera solar, especialmente en la banda G, que es una banda molecular centrada en 430 nm. Corresponde a una banda de absorción de Fraunhofer del espectro solar que contiene una mezcla de varias especies como Fe, Ti, Ni, Cr, Ca, etc. Esta banda molecular consiste en transiciones electrónicas entre subniveles rotacionales y vibracionales de la molécula interestelar radical metino CH (Steiner et al., 2001).

La razón por la cual se observa un aumento en el brillo de los MBPs, en la banda G, se debe a la depresión mostrada en la figura 2-1. La radiación que emite el elemento magnético proviene de capas más profundas y por lo tanto más calientes. A estas profundidades, la molécula de CH se disocia fácilmente debido a la alta temperatura, permitiendo que la radiación pueda escapar (Steiner et al., 2001).

Los MBPs también se pueden observar en otras longitudes de onda. De acuerdo con Nisenson et al. (2003), los MBPs y la filigrana (cadenas de características brillantes ubicadas sobre la red granular) son observados en líneas del espectro solar como $H\alpha$, Ca II, H y K, en líneas formadas en la fotosfera e incluso en longitudes de onda del continuo.

2.2. Estudios previos sobre la dinámica de Puntos Magnéticos Brillantes

A continuación se realiza una breve descripción de algunas de las investigaciones que se han desarrollado sobre los puntos magnéticos brillantes, cuyo comportamiento dinámico ha sido estudiado por diferentes autores a lo largo de los últimos años. De acuerdo con Sánchez et al. (2004), la presencia de MBPs en la fotosfera solar, primero fue reportada por Dunn and Zirker (1973) y luego por Mehlretter (1974). Nisenson et al. (2003) y Berger et al. (1996) encontraron que los MBPs forman grupos, tras ser empujados por los gránulos. También encontraron que dos MBPs se pueden unir y formar uno solo, o que un MBP se puede dividir en dos. En particular, Berger (1998) analizó imágenes en la banda G y en el continuo tomadas con el Swedish Vacuum Solar Telescope (SVST) en el Observatorio Roque de los Muchachos en la isla Canaria de La Palma, encontrando divisiones y uniones rápidas de MBPs.

Por otro lado, varias investigaciones han reportado medidas de la velocidad de los MBPs. Muller et al. (1994) midió la velocidad de 29 MBPs aislados encontrando un promedio de $1,33 \text{ kms}^{-1}$. Martin et al. (1994) usando imágenes tomadas con Fe I (5576 \AA) encontró velocidades en un rango de $0,26 - 0,62 \text{ kms}^{-1}$. De la misma manera, Berger et al. (1996) midió la velocidad de MBPs en la banda G encontrando magnitudes entre 1 y 5 kms^{-1} . De acuerdo con Möstl et al. (2006) dicha velocidad horizontal se produce por el movimiento convectivo de los gránulos, que empujan y presionan a los tubos de flujo magnético.

En relación al tiempo de vida de estos elementos magnéticos, Utz et al. (2009b) encontró un valor promedio de 2,50 minutos y lo comparó con los resultados de otras investigaciones las cuales reportan valores mayores a este. Por ejemplo, Sánchez et al. (2004) reportó un tiempo de vida máximo de 10 minutos y Möstl et al. (2006) de 4,4 minutos en promedio.

De otra parte, Muller et al. (1994), haciendo uso de datos del observatorio Pic du Midi, midió el movimiento propio del punto de anclaje de tubos de flujo a nivel fotosférico alrededor de regiones activas, encontrando histogramas de velocidad con un valor promedio para la velocidad de $1,4 \text{ kms}^{-1}$. Él concluyó que la corona solar podría ser calentada por ondas que se propagan a través de los tubos de flujo magnético. De la misma manera, Choudhuri et al. (1993) encontró que el punto de pie fotosférico de las líneas de campo magnético coronal se mueven, ocasionalmente, de forma rápida con una velocidad típica de 3 kms^{-1} lo cual podría tener un profundo impacto en el calentamiento coronal.

Si bien, varias de las propiedades físicas de los MBPs han sido cuantificadas en trabajos previos, el presente estudio se centra en determinar el tamaño, el diámetro y la velocidad horizontal de los MBPs, tema de interés de autores como Möstl et al. (2006), Muller et al. (1994), Utz et al. (2009b), con el fin de medir esos parámetros con observaciones de mejor

resolución espacial y temporal hechas con el telescopio óptico solar (SOT) del satélite Hinode y, principalmente, del telescopio GREGOR ubicado en Tenerife, España.

Se considera relevante el estudio de las propiedades físicas de los MBPs teniendo en cuenta que, de acuerdo con Utz et al. (2009b) y con Möstl et al. (2006), se estima que el movimiento rápido de los pies de un MBP puede excitar ondas magnetohidrodinámicas que podrían contribuir al calentamiento de la corona solar. Adicionalmente, debido al movimiento de los tubos de flujo se pueden desencadenar fulguraciones ¹. Por otro lado, es de interés en la comunidad de astrofísica solar saber si los campos magnéticos a pequeña escala de los MBPs están conectados con el campo magnético global del Sol. De igual manera, se busca establecer si el campo magnético interactúa, a pequeña escala, con el patrón de granulación solar y si tiene influencia en la irradiancia solar (Utz et al., 2009b). De hecho, si se tiene en cuenta que los MBPs se encuentran sobre toda la superficie solar, que tienen una intensidad más alta que el Sol en calma y que tienen fuertes campos magnéticos, se sugiere que puede existir una relación con el campo magnético global del Sol y con el cambio en la irradiancia solar total.

Al analizar en detalle observaciones solares (conociendo que el eje solar está inclinado respecto a la eclíptica) se encuentra que a latitudes altas, los polos presentan un incremento en el número de MBPs con respecto a latitudes bajas. Este incremento solo tiene lugar durante un mínimo solar, cuando el campo magnético es poloidal, siendo nuevamente evidencia de que existe una relación entre el campo magnético global del Sol y los MBPs (Blanco et al., 2017). Adicionalmente, varias preguntas que han sido ampliamente investigadas están relacionadas con las propiedades físicas de los MBPs. Por ejemplo, cuando se generan ondas magnetohidrodinámicas, estas se propagan a través de las líneas de campo a las capas más altas de la corona, ¿Dichas ondas se podrían disipar y contribuir al calentamiento coronal? ¿El flujo magnético es generado por una superficie de dínamo local o por el flujo que emerge de las capas más profundas?, ¿Los tubos de flujo se componen de subestructuras más pequeñas? (Möstl et al., 2006).

Por otro lado, las estructuras magnéticas en movimiento o MMFs (*Moving Magnetic Features*) también son elementos magnéticos a pequeña escala que se presentan alrededor de regiones activas. Los MBPs y las MMFs parecen tener características muy similares. Al hacer el seguimiento de los MBPs, desde que aparecen hasta que desaparecen, y compararlos con MMFs, se podrá proveer información sobre sus propiedades físicas que puede ser útil para la caracterización de los tubos de flujo.

En resumen, en el presente estudio se busca contribuir a la caracterización de las propiedades físicas de los MBPs a partir de histogramas de tamaño, diámetro y velocidad. Para ello se

¹Fenómenos energéticos en la atmósfera solar con grandes liberaciones de energía.

estudian MBPs en dos regiones del Sol en calma debido a que la mayoría de las investigaciones se han dedicado a estudiarlos en las regiones activas. Además en la región del Sol en calma se presenta un mayor número de estos elementos y su forma es más simple que en las regiones activas, por lo tanto son más fáciles de rastrear (Utz, 2007).

2.3. Instrumentación

Dado que las imágenes analizadas en la presente investigación son obtenidas con el satélite Hinode y el telescopio GREGOR, a continuación se hará una breve descripción de estos, en términos de su diseño y funcionamiento.

2.3.1. HINODE/SOT

Hinode es una misión conjunta entre agencias espaciales de Japón, Estados Unidos, Europa y Reino Unido, lanzada el 23 de septiembre de 2006. La nave espacial lleva los tres instrumentos presentados en la figura 2-2; el Telescopio Óptico Solar (SOT), el Espectrómetro de Imagen en el Extremo Ultravioleta (EIS), y el Telescopio de Rayos X (XRT). Estos proporcionan datos desde la fotosfera hasta la corona del Sol. Este satélite tiene una inclinación de -98° y está en una órbita polar sincrónica al Sol, es decir en una órbita alrededor de la Tierra, que mantiene fija su orientación relativa con el Sol de tal manera que el ángulo entre el plano de la órbita y el eje Tierra - Sol se mantiene constante a lo largo del año (Hurlburt et al., 2009).

El SOT cuenta con un Telescopio gregoriano de difracción limitada OTA (*Optical Telescope Assembly*) con una apertura de 0,5 m. Su campo de visión es de aproximadamente 360×200 arcseg². El ancho de banda observado cubre un rango de 380 nm a 670 nm. Ver figura 2-3.

Este instrumento provee medidas del vector completo de campo magnético del Sol en una escala espacial de 150 km a 200 km sobre un campo de visión muy grande con el fin de obtener pequeñas regiones activas. La cadencia del instrumento y su sensibilidad permiten observar tanto los cambios estables (calentamiento coronal) como los transitorios (fulguraciones y eyecciones de masa) en la atmósfera del Sol. Adicionalmente, posee una apertura de 0,5 metros, con un espejo primario de 562 mm y uno secundario de 262 mm. Su longitud focal efectiva es de 4527 mm y cuenta con una unidad de lentes colimadores (*Collimator Lens Unit*, CLU). Además tiene recubrimientos UV e IR que limitan el paso de calor al sistema FPP.

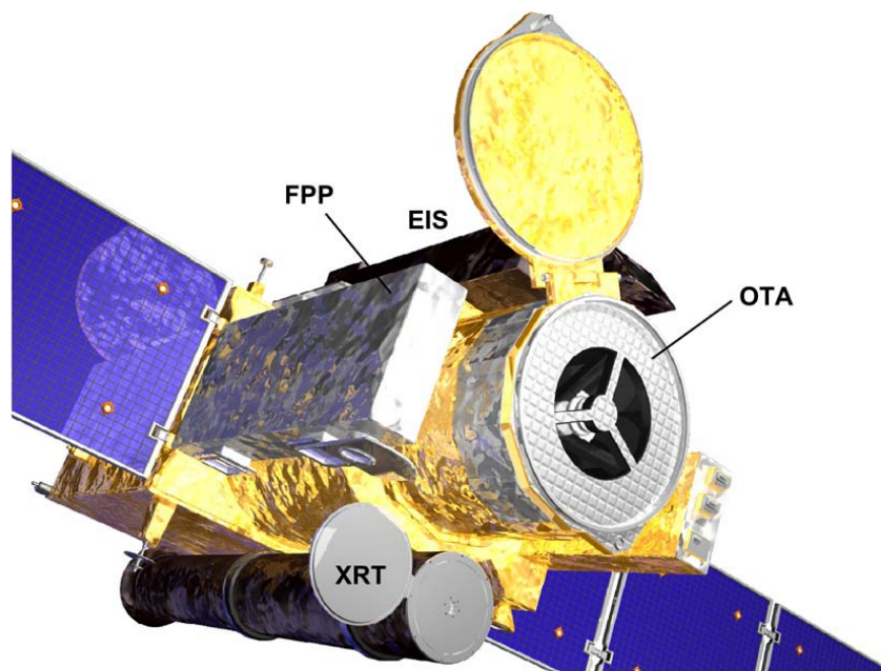


Figura 2-2.: Perspectiva de Hinode en órbita. Imagen tomada de Tsuneta et al. (2008).

El paquete de instrumentos del SOT, conocido como paquete de plano focal FPP (*Focal Plane Package*), cuenta con cuatro sistemas; el generador de imágenes de filtro de banda ancha (*Broad-band Filter Imager*, BFI), el filtro de imágenes de banda estrecha (*Narrow-band Filter Imager*, NFI) el espectropolarímetro (*Spectropolarimeter*, SP) y el rastreador de correlación (*Correlation Tracker*, CT). Estos componentes se muestran en la figura 2-4.

El generador de imágenes de filtro de banda ancha (BFI) registra datos de estructuras fotosféricas y cromosféricas del Sol en un rango de longitud de onda de 388,3 nm a 668,4 nm, tanto del Sol en calma como en regiones activas. Produce imágenes fotométricas en seis bandas (banda CN, Línea H Ca II, banda G y tres bandas en el continuo) de alta resolución (0,0541 arcseg/px) sobre un campo de visión de 218" x 109". El BFI permite obtener medidas precisas de los flujos horizontales y la temperatura de la fotosfera. A partir de imágenes BFI se pueden medir velocidades horizontales a través de rastreo de correlación local (*Local Correlation Tracking*, LCT).

El generador de imágenes de filtro de banda estrecha (NFI) registra imágenes de alta resolución de un campo de visión de 320 x 160 arcseg², obteniendo magnetogramas tanto del Sol en calma como de regiones activas. Los fotogramas son registrados por una cámara CCD de 4096 x 2048 píxeles. Este instrumento proporciona imágenes polarimétricas de alta resolución espacial (0,08 arcseg/px) tanto en intensidad Doppler, como del vector completo de Stokes.

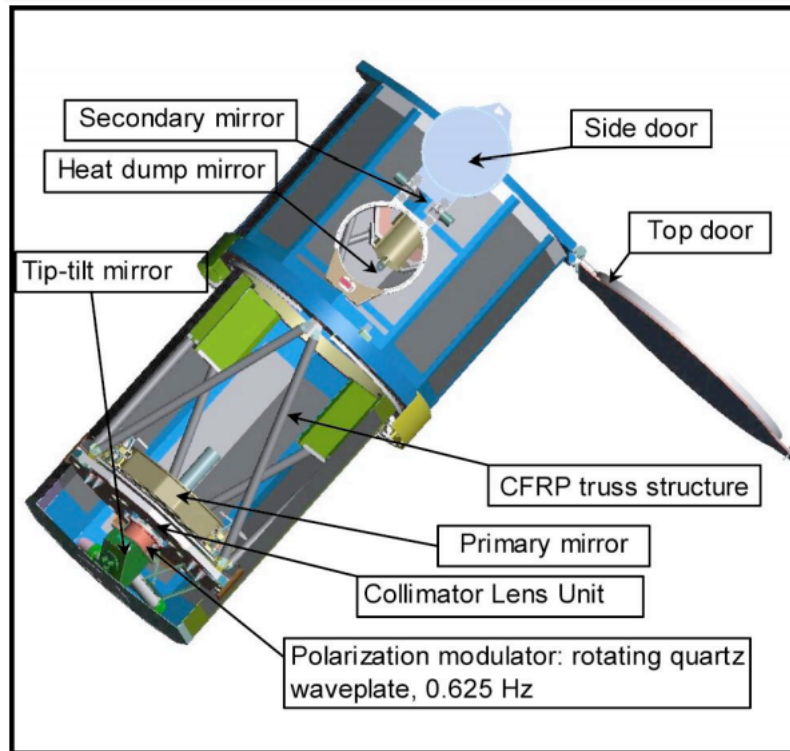


Figura 2-3.: Esquema del montaje OTA (*Optical Telescope Assembly*) del SOT. Espejo tip-tilt (Tip tilt mirror), espejo para reducir el calor (Heat dump mirror), espejo secundario (Secondary mirror), puerta lateral (Side door), puerta superior (Top door), estructura de armadura (CFRP truss structure), espejo primario (Primary mirror), unidad de lentes colimadoras (Collimator Lens Unit), Modulador de polarización: placa de cuarzo rotatoria (Polarization modulator: rotating quartz waveplate). Imagen tomada de Hurlburt et al. (2009).

El rastreador de correlación (CT) es una cámara CCD (Charge Coupled Devices) de alta velocidad que detecta las fluctuaciones de los elementos solares en el plano focal. La señal de la fluctuación es enviada al control de bucle cerrado del espejo tip-tilt (Kosugi et al., 2007).

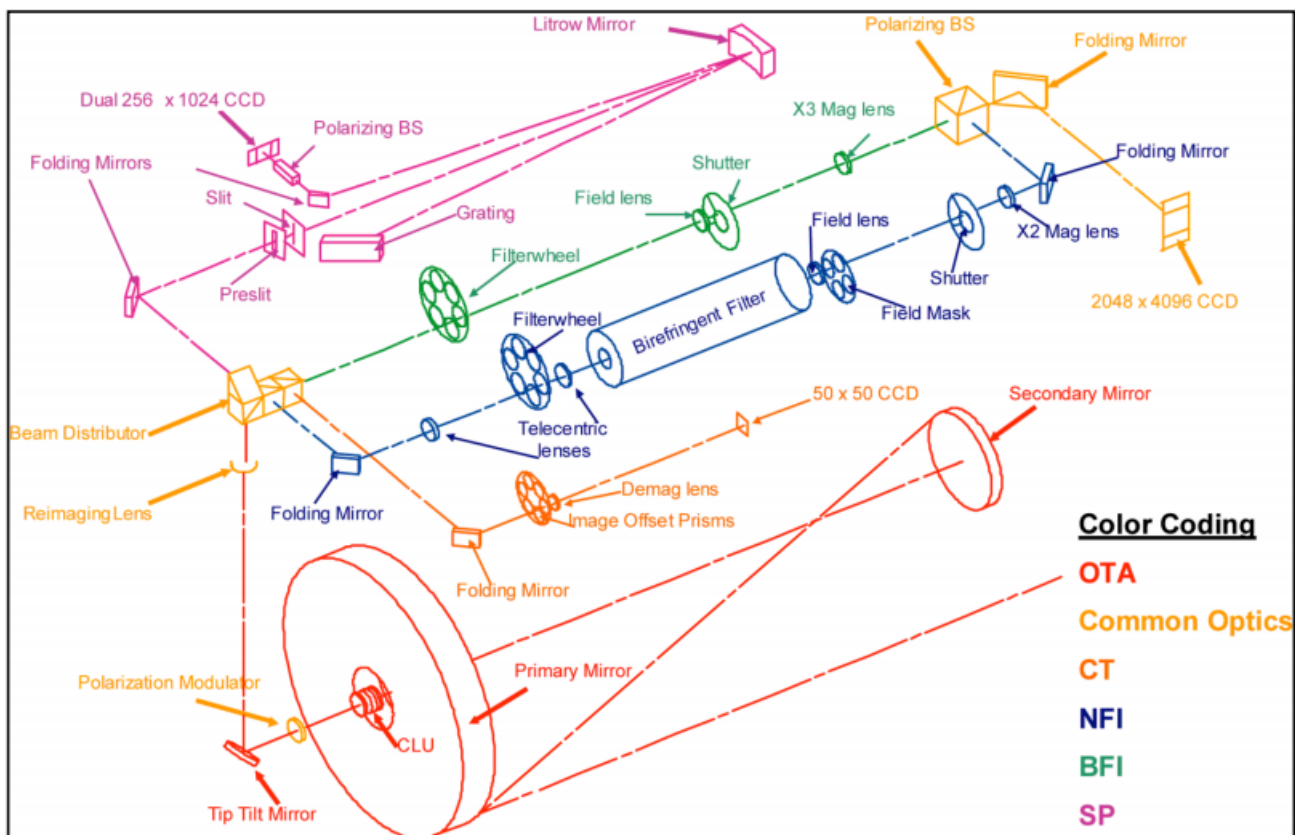


Figura 2-4.: Diseño del montaje FPP (*Focal Plane Package*) del SOT. Hurlburt et al. (2009).

2.3.2. GREGOR/HiFI

El telescopio GREGOR, ubicado en Tenerife, España es actualmente el más grande de Europa dedicado a realizar observaciones solares de alta resolución. Posee un diámetro de 1,5 m y un sistema de óptica adaptativa AO (*Adaptive Optics*), que es una técnica para corregir los defectos que causa la atmósfera en las imágenes (ver figura 2-5). Cuenta con cuatro instrumentos, el generador de imágenes de banda ancha BBI, el espectrógrafo en infrarrojo GRIS, el generador de imágenes de alta resolución HiFI y las cámaras de imagen de gran formato.

A continuación se describen algunos detalles del generador de imágenes de alta resolución HiFI, incorporado al telescopio GREGOR en el año 2016. Para más información sobre los demás instrumentos se remite al lector al trabajo de Kuckein et al. (2016). HiFI (*High-resolution Fast Imager*) reemplazó al canal de imagen azul BIC del telescopio GREGOR el cual usaba cámaras más lentas. Registra datos en el azul continuo en un rango de longitud

de onda de 3850 a 5300 Å. Este instrumento cuenta con tres filtros, Ca II H 3968 Å, en la banda G 4308 Å y en el azul continuo 4505 Å. Genera imágenes de 2560 x 2160 píxeles en un campo de visión FOV (Field Of View) de 64,8 x 54,6 arcseg². Posee una resolución espacial de 0,0286 arcseg/px y una resolución por difracción de 0,055 arcseg (Denker et al., 2018). Este dispositivo cuenta con un divisor de haz que permite la adquisición simultánea de imágenes en dos longitudes de onda diferentes (banda G y Ca) con dos cámaras y con el mismo tiempo de exposición. El sistema de adquisición de datos coloca las dos imágenes en el mismo archivo, por lo tanto al trabajar con estos datos se deben separar las imágenes antes de realizar el proceso de reducción (Kuckein et al., 2016).

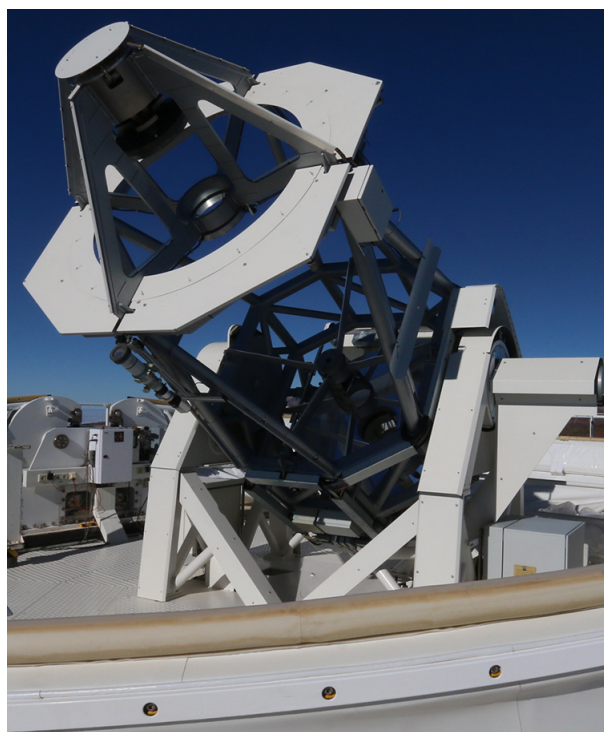


Figura 2-5.: Telescopio GREGOR en el observatorio del Teide en Tenerife, España. Cortesía Observatorio de Izaña.

3. Datos y Metodología

3.1. Datos

Para realizar la caracterización de la dinámica de los MBPs en la fotosfera solar se utilizaron dos conjuntos de datos en la banda G centrada en 4308 Å. El primer conjunto de datos es de marzo de 2007 del telescopio espacial Hinode: **conjunto de datos I** y el segundo conjunto de datos de julio de 2019 del telescopio GREGOR: **conjunto de datos II**. Los dos conjuntos presentan un campo de visión cercano al centro del disco solar, evitando efectos de proyección que causan la deformación de la imagen fotosférica al aproximarse al limbo solar.

El conjunto de datos I consta de 332 imágenes adquiridas con el satélite Hinode, en particular con el telescopio óptico solar SOT, con el filtro de banda ancha (BFI). Estos datos corresponden a observaciones solares realizadas el día 10 de marzo de 2007 (7:00 a 9:59 UT). Su resolución temporal es de 30 segundos y su resolución espacial es de 0,108 arcseg/px. El FOV (Field of View o campo de visión) es de 55,8 x 111,6 arcseg² como se aprecia en las figuras **3-1** y **3-2** (imagen rotada 90°). Estas observaciones se caracterizan por ser de alta resolución y por estar libres de los efectos adversos del *seeing*¹. Se descargaron de la página principal² de la institución a cargo del instrumento SOT ya que son de libre acceso.

Por otro lado, el conjunto de datos II consta de 769 imágenes del día 13 de julio de 2019 (7:38 a 08:48 UT) adquiridas con el instrumento HiFI del telescopio terrestre GREGOR. Se caracterizan por presentar una resolución temporal de 5 segundos, una resolución espacial de 0,0286 arcseg/px y un FOV de 32,4 x 26,0 arcseg² (ver figura **3-3**). A pesar de que son datos que poseen efectos de *seeing* cuentan con corrección por óptica adaptativa.

¹Defectos que causa la turbulencia atmosférica sobre la calidad de las imágenes.

²<https://sdac.virtualsolar.org/cgi/search?time=1&observable=1&instrument=1&version=current&build=1>

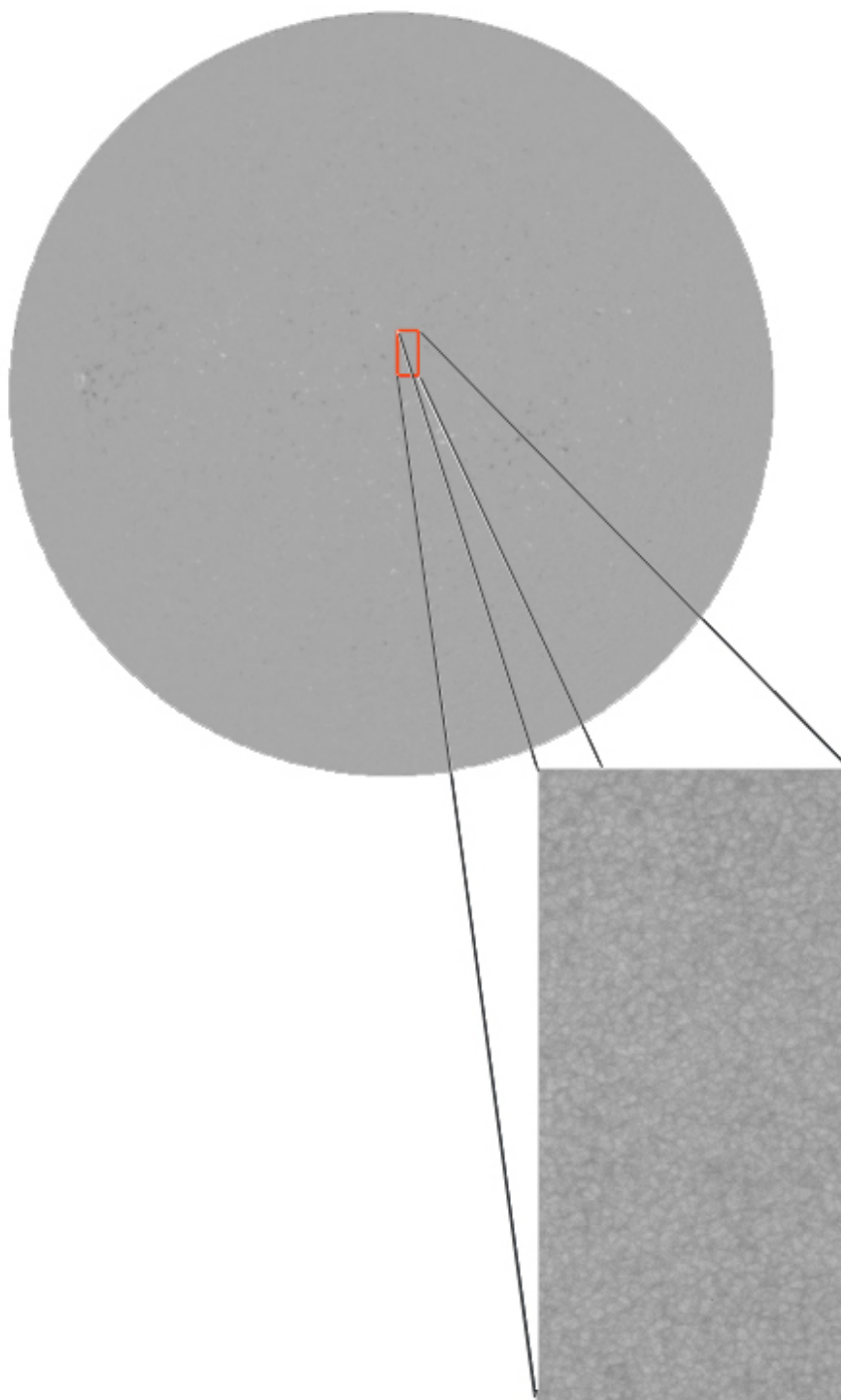


Figura 3-1.: Imagen del disco solar del día 10 de marzo de 2007 adquirida con el telescopio espacial SOHO/MDI junto con el campo de visión resaltado y ampliado. La ubicación del FOV desde el centro del Sol se encuentra en una posición de $x_{cen} = 41''$ y $y_{cen} = 104''$.

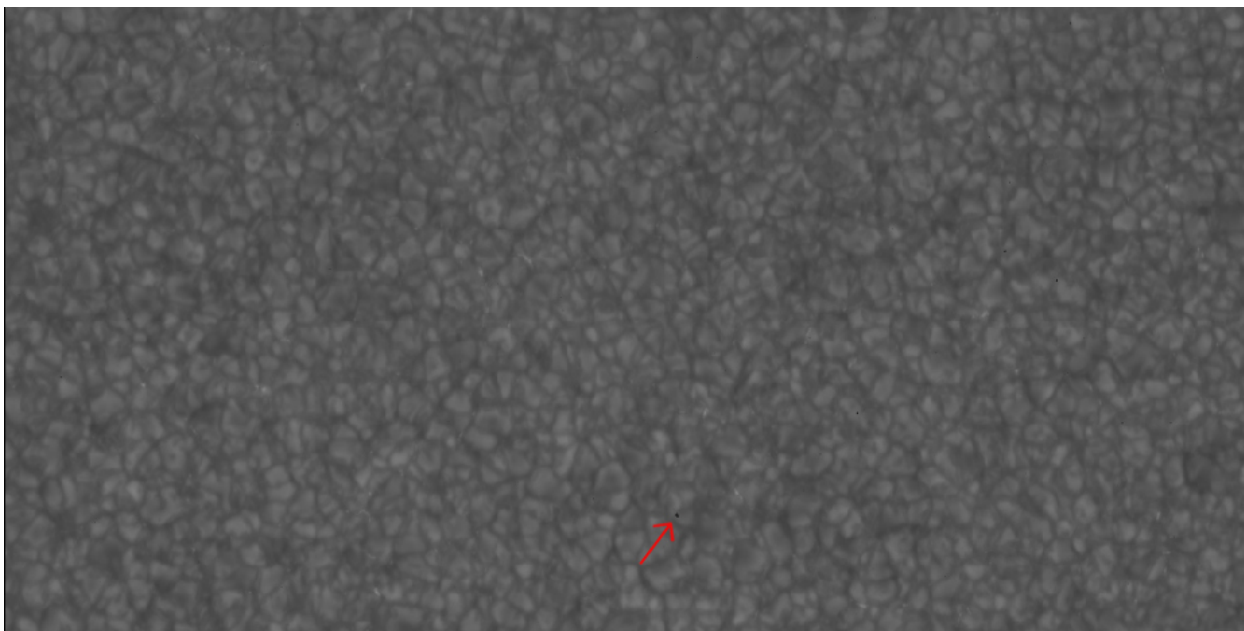


Figura 3-2.: Imagen del conjunto de datos I, de $111,6 \times 55,8 \text{ arcseg}^2$ (rotada 90°), en nivel cero de calibración. Se muestran varios píxeles falsos (puntos negros). La flecha roja destaca uno de ellos.

En este punto, es importante mencionar que la cadencia (resolución temporal) de ambos conjuntos de datos es adecuada para el presente estudio. Este parámetro es fundamental para investigar la dinámica de los pequeños elementos magnéticos, cuyo tiempo de vida es del orden de unos pocos minutos, ya que si los datos presentan una cadencia muy alta, por ejemplo de varias horas, se pierde la información en la evolución de los MBPs. Por el contrario, si la cadencia de los datos es demasiado baja (milisegundos) no hay diferencia entre una imagen y la siguiente, generando de esta manera una saturación de información que no permitiría analizar la evolución de los parámetros dinámicos de los MBPs.

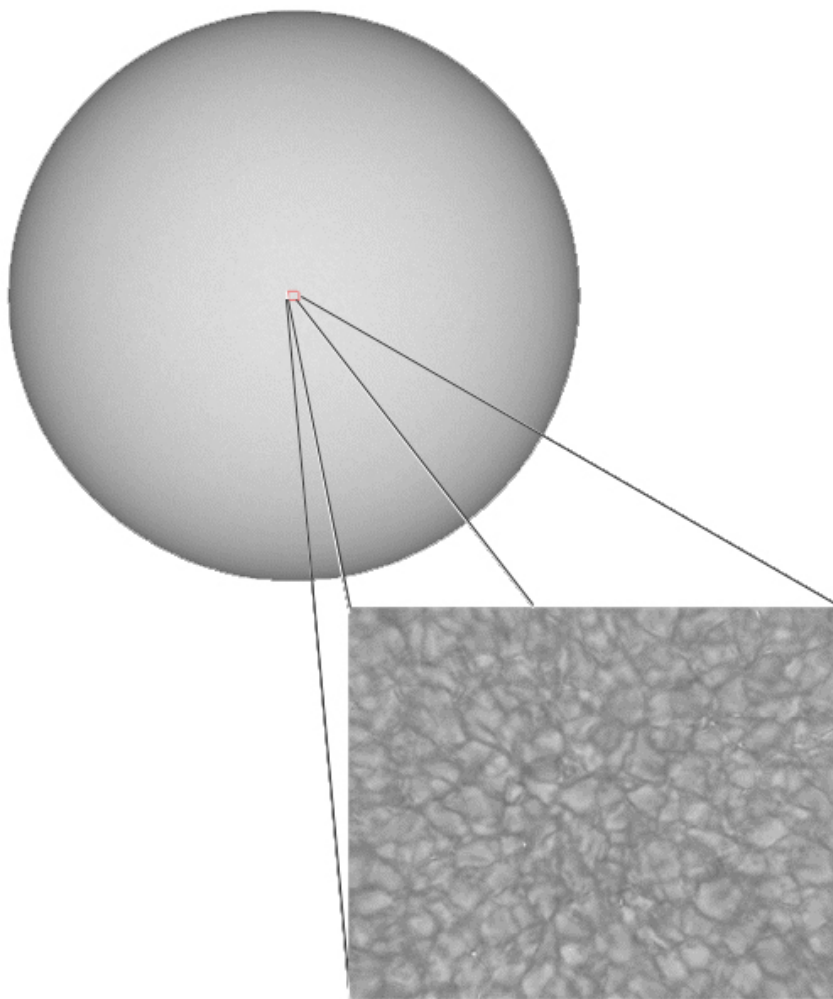


Figura 3-3.: Imagen del disco solar del día 13 de julio de 2019 adquirida con el telescopio SDO/HMI, resaltando la región de interés que se amplía para mostrar los detalles de la granulación fotosférica. El tamaño de la imagen es de $32,4 \times 26$ arcseg². La posición del FOV desde el centro del Sol es $x_{cen} = 0''$, $y_{cen} = 0''$.

3.1.1. Tratamiento preliminar de los datos

Una vez se tiene acceso a los datos se procede a la calibración de los mismos. Cabe resaltar que los dos conjuntos de datos se adquieren en diferentes niveles de calibración y, por ser de diferentes instrumentos, requieren técnicas de reducción distintas.

Los datos del conjunto I se adquieren en un nivel cero de calibración (ver figura 3-2), es decir, que no han sido corregidos de ningún error intrínseco. La reducción se realiza con la rutina de *SolarSoft* de nombre *fg_prep* de IDL (*Interactive Data Language*), la cual se caracteriza por realizar una reducción general de errores tales como campo plano, corriente oscura y errores de píxeles (píxeles falsos, como se muestra en la figura 3-2 causados por

polvo en los instrumentos) para fotogramas o filtergrams (fg).

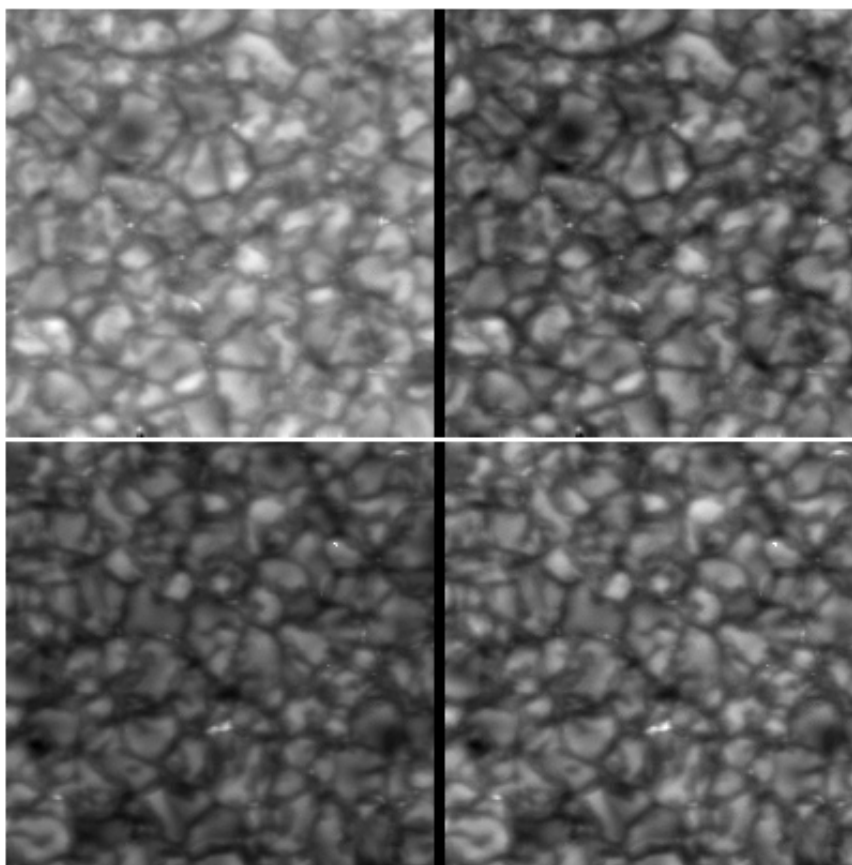


Figura 3-4.: Observaciones de la fotosfera en una zona de granulación solar. Izquierda: Dos imágenes del conjunto de datos I sin ajuste de intensidad. Derecha: Las mismas imágenes después de ajustar el rango de intensidad.

Por último, una vez realizado el proceso de calibración, se procede a evaluar el nivel de intensidad de las imágenes organizadas en un cubo de datos, encontrando que cada una tiene un nivel de intensidad diferente a las demás (ver figura 3-4). Por lo tanto, es necesario realizar un proceso de recalibración por intensidad que consiste en modificar el rango dinámico³ de todas las imágenes de tal manera que sea igual para todas. De la misma forma, se debe centrar la intensidad promedio de todas las imágenes a un mismo valor. Lo anterior se realiza en un porcentaje específico de píxeles de la imagen (5 % en este caso). De esta manera se garantiza que todas las imágenes tengan un rango de intensidad constante (ver figura 3-5).

³La diferencia entre el mayor valor de intensidad de la imagen y el menor.

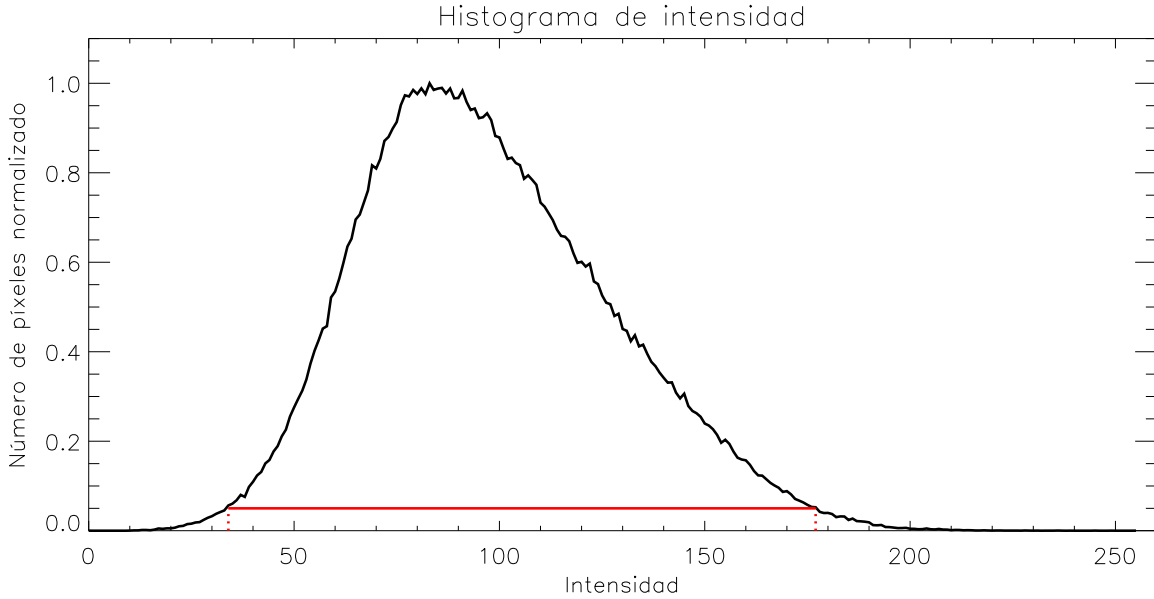


Figura 3-5.: Histograma de intensidad de la primera imagen del conjunto de datos I. Se puede apreciar que la diferencia entre la intensidad mayor y menor en el 5% del número de píxeles es de 143 (la línea roja representa el rango dinámico) y que el valor medio para la intensidad es de 97.

Para realizar esta recalibración por intensidad se hace uso de la primera imagen para calibrar la intensidad de las demás. El valor medio en la escala de intensidad tiene un valor de 128 (en una escala de 0 a 255). El rango dinámico en el 5% del número de píxeles es de 143. Todo lo anterior se realiza por medio de una rutina desarrollada en IDL que modifica el rango dinámico de todas las imágenes por medio de la ecuación 3-1:

$$I_{(1)} = I_{(1)} \times \left(\frac{I_{\text{máx}}(0) - I_{\text{mín}}(0)}{I_{\text{máx}}(1) - I_{\text{mín}}(1)} \right) \quad (3-1)$$

donde:

$I_{(0)}$ es la intensidad de la primera imagen.

$I_{(1)}$ es la intensidad de la imagen que se quiere reescalar.

Posterior a esto, la rutina debe ajustar la intensidad media de las imágenes al valor de la primera haciendo uso de la ecuación 3-2:

$$I_{(1)} = I_{(1)} - I_{\text{media}}(1) + I_{\text{media}}(0) \quad (3-2)$$

donde:

$I_{\text{media}(0)}$ es la intensidad media de la primera imagen.

$I_{\text{media}(1)}$ es la intensidad media de la imagen que se quiere reescalar.

Por su parte, para calibrar el conjunto de datos II se tuvo en cuenta que este, a diferencia del conjunto de datos I, ya ha pasado por un proceso de reducción y preparación para el usuario final, realizado con la herramienta *sTools* de IDL. Es decir, cuando se accede a estos datos ya están calibrados por corriente oscura, campo plano y errores en píxeles. La restauración de estos datos se lleva a cabo usando una rutina llamada “interferometría speckle”, y tras su aplicación, los datos corresponden a un nivel 2 de calibración (Kuckein et al., 2016). La reducción por interferometría speckle es una técnica que corrige las aberraciones causadas por la turbulencia atmosférica. Se aplica a datos que han pasado previamente por un sistema de óptica adaptativa que los corrige parcialmente. La técnica de reconstrucción aplicada tiene como objetivo alcanzar un valor cercano al límite de difracción del instrumento (Wöger et al., 2008). Posterior a este procedimiento, y antes de continuar con el proceso de calibración de datos, se deben separar las imágenes en las dos longitudes de onda que las cámaras CCD de HiFI guardan (banda G y Ca), proceso que se aplica con una subrutina en IDL. En este punto, se realiza el proceso de recalibración por intensidad ya mencionado. Al igual que con el conjunto de datos I, se realiza el proceso de recalibración en el 5% del número de píxeles. El histograma de intensidad a partir del cual se realiza este proceso se presenta en la figura 3-6.

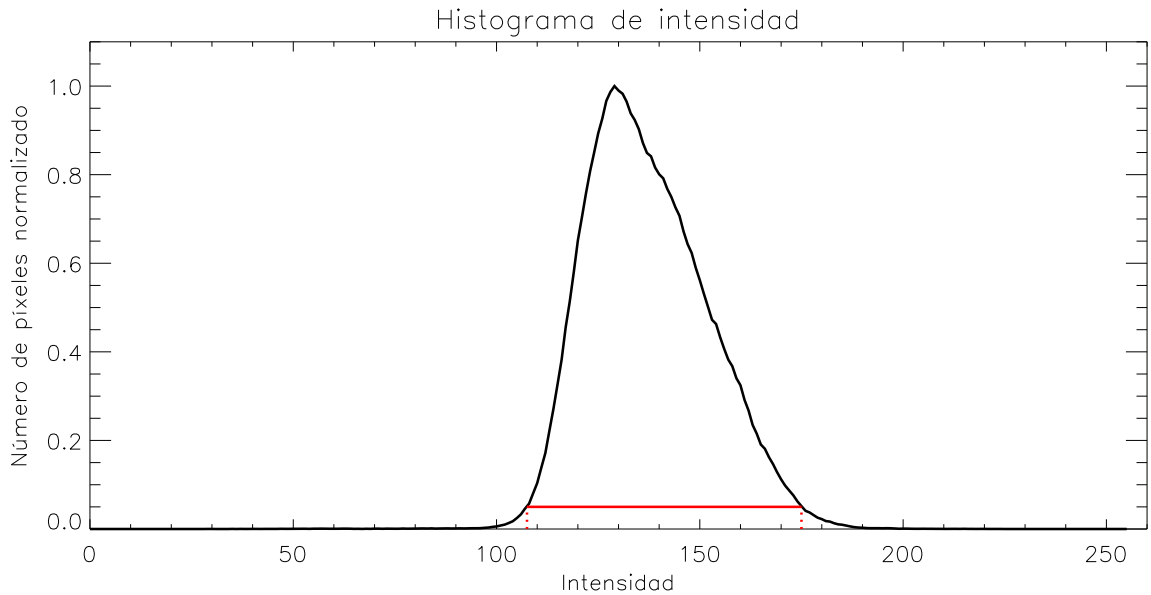


Figura 3-6.: Histograma de intensidad de la imagen número 1 del conjunto de datos II. Se puede apreciar que la diferencia entre la intensidad mayor y menor en el 5% del número de píxeles es de 68 (la línea roja representa el rango dinámico) y que la media de la distribución tiene un valor de 137.

Seguidamente, se realiza la corrección por alineamiento, desajuste y filtrado subsónico, para lo cual se usan las rutinas *aline*, *destre* y *bigsonic*, desarrolladas en IDL y modificadas para los datos en cuestión. La rutina de alineamiento corrige pequeños desplazamientos de una imagen respecto a otra en los ejes x e y . Para realizar este procedimiento, se toma la primera imagen (A) como referencia y se calcula el coeficiente de correlación lineal entre una subimagen de B y la imagen A. Posteriormente, haciendo uso de las propiedades de la transformada de Fourier se determina y contrarresta el desplazamiento de la imagen B respecto a la imagen A.

Por su parte la rutina para corrección de “desajuste” mejora la calidad de la imagen corrigiendo movimientos diferenciales en la imagen (pequeñas partes de la imagen se mueven unas respecto a otras). La rutina corrige esencialmente movimientos de la atmósfera que inducen desplazamientos sobre la imagen en escalas espaciales pequeñas. Por último, se realiza la corrección por filtrado subsónico que contrarresta los cambios en los brillos que son más rápidos que la velocidad del sonido, por medio de un espectro de potencias que realiza cambios en las frecuencias de la imagen. En este punto, las imágenes están completamente calibradas y dispuestas para realizar la identificación de los MBPs.

3.2. Metodología

Para analizar la dinámica de los MBPs se han utilizado diferentes métodos, por ejemplo, algoritmos semiautomáticos y automáticos de identificación de MBPs. El proceso que se aplica en los algoritmos semiautomáticos consiste en la detección manual o visual (el usuario identifica los MBPs con el cursor) para luego realizar su seguimiento de forma automática. Por el contrario, los algoritmos automáticos realizan tanto la identificación de los MBPs como el rastreo sin involucrar la interacción con el usuario. En particular, en el presente estudio se hace uso del proceso empleado por Utz et al. (2009b), en el que se utiliza un algoritmo automático de identificación.

El algoritmo consta de dos rutinas: segmentación e identificación. El proceso de segmentación consiste en un algoritmo de patrón de reconocimiento de las regiones que conforman a la imagen dependiendo de su intensidad. Es decir, el algoritmo separa y agrupa las zonas de la imagen que tienen igual intensidad (grupos de píxeles). Posteriormente, se aplica sobre las imágenes segmentadas el algoritmo de identificación que determina el gradiente de brillo de los segmentos que conforman a la imagen para seleccionar aquellos que se clasificarán como MBPs. Finalmente, se almacena esta información en archivos de datos separados para su posterior análisis. A continuación de describiré en detalle cada uno de los procesos mencionados.

3.2.1. Segmentación de las imágenes

El proceso de segmentación se utiliza en diversos campos de la ciencia (e.g. en la localización de tumores, en el reconocimiento de huellas o caras, etc). Este se fundamenta en un patrón de reconocimiento de elementos en una imagen con el fin de encontrar objetos o límites (bordes) de estos dentro de la misma. La idea básica es agrupar la imagen en diferentes porciones realizando cortes de intensidad o dividiéndola a partir de distintos niveles en el brillo, con el fin de determinar posteriormente el tamaño de cada elemento o parte en que ha sido separada.

En el caso particular de este estudio, se busca aislar los bordes de cada región que conforma la imagen de su parte interna (ver figura 3-7) y colocarle a cada uno de los píxeles una etiqueta de tal manera que los píxeles que poseen la misma etiqueta tienen igual intensidad. El algoritmo considera a los bordes como números impares y a la parte interior como números pares (ver figura 3-8). Lo anterior se hace con el fin de acceder a cada segmento o parte de la imagen por separado para su posterior análisis.

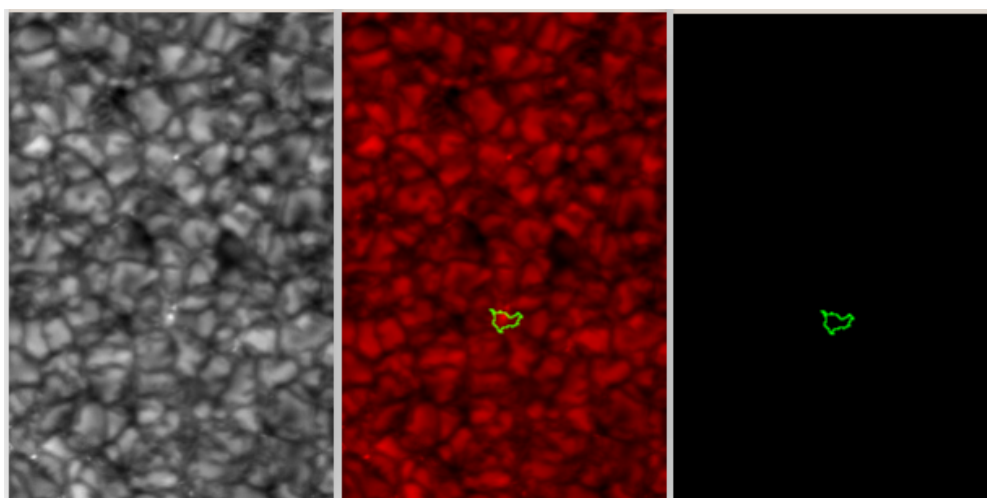


Figura 3-7.: De izquierda a derecha: sección de una imagen del conjunto de datos I (de $22 \times 32 \text{ arcseg}^2$), segmento más brillante de la imagen (contorno verde) y el segmento aislado.

El proceso de segmentación inicia identificando el píxel más brillante en la imagen y se etiqueta como el primero, luego se busca aquel píxel que tiene una intensidad levemente menor, y si está cerca al primero el algoritmo une a estos dos píxeles, de lo contrario simplemente el píxel en cuestión es etiquetado como el número dos (ver figura 3-7). Este proceso se repite varias veces y se empiezan a formar áreas crecientes que van llenando los espacios vacíos de la imagen, para finalmente obtener una imagen completamente segmentada como la de la parte derecha de la figura 3-9.

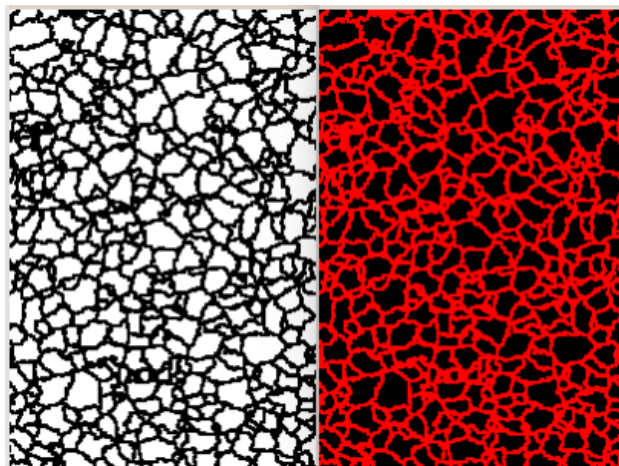


Figura 3-8.: Izquierda: Parte interior de cada segmento de una imagen del conjunto de datos I (de 22×32 arcseg²). Derecha: Bordes de cada segmento.

Este método recibe el nombre de “crecimiento de regiones”, las cuales se forman a partir de áreas *semillas*. Estas regiones crecen iterativamente al comparar todos los píxeles vecinos que no han sido asignados. El proceso termina cuando todos los píxeles tienen asignada una región.

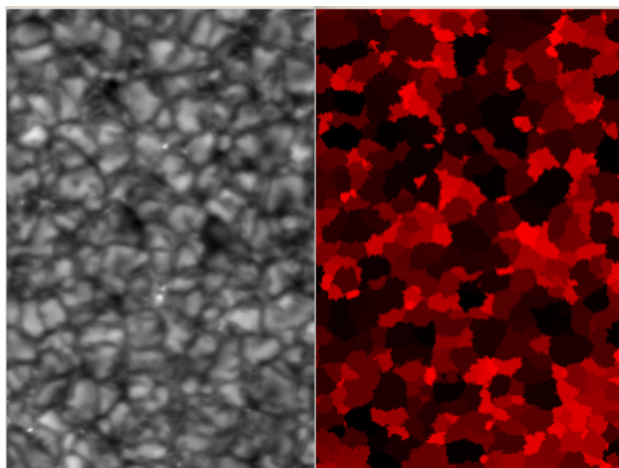


Figura 3-9.: Izquierda: Región de una imagen del conjunto de datos I (de 22×32 arcseg²). Derecha: La misma sección segmentada.

La rutina que segmenta la imagen se denomina *main_new* y fue desarrollada en IDL. Esta permite, por medio de una interfaz gráfica, presentada en la figura **3-10**, que el usuario configure varios parámetros de entrada, como por ejemplo la imagen que se quiere segmentar, los niveles de intensidad que se tendrán en cuenta (considerando que cada imagen tiene 255 niveles en la escala de grises) y la regla de segmentación.

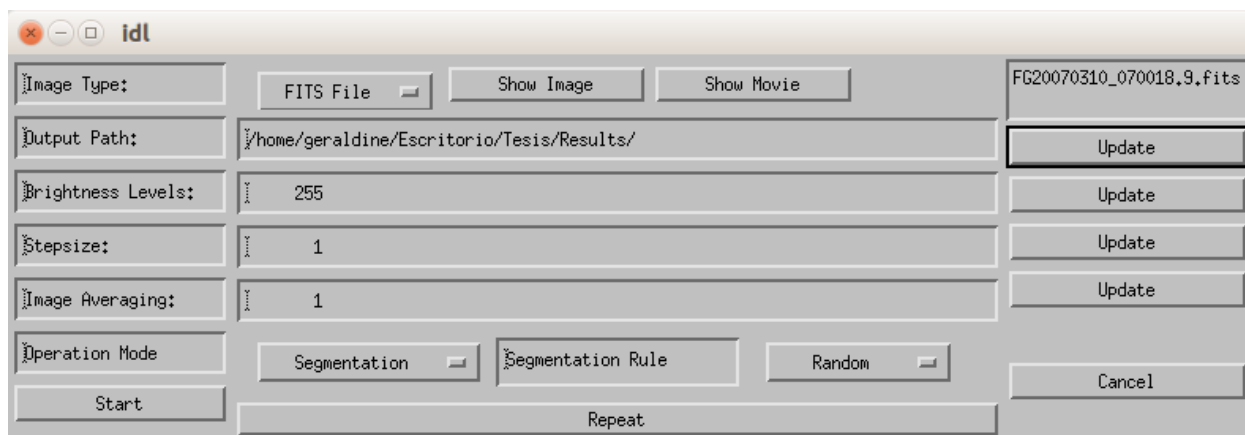


Figura 3-10.: Cuadro de diálogo para que el usuario configure los parámetros de entrada del proceso de segmentación.

El procedimiento permite elegir entre un total de cinco reglas o criterios de segmentación diferentes, como se muestra en la figura **3-11**. Esto se ejecuta cuando un píxel se encuentra en la mitad de dos segmentos y el algoritmo debe elegir a cuál segmento adicionarlo. Las opciones son *sorted*: que busca el primer segmento en sentido de las manecillas del reloj y lo une a este, *random*: une el píxel a uno de los dos segmentos aleatoriamente con una probabilidad del 50 % a un segmento y 50 % al otro, *equal distance*: une el píxel al segmento que posee el máximo de brillo más cercano, *open border*: sencillamente no agrega este píxel a ningún segmento y por último *brightness*: adiciona este píxel al segmento más brillante.

En el presente análisis se hace uso de la opción *random* porque visualmente permite definir mejor la forma de los segmentos, ver figura **3-11**. Por el contrario, las demás reglas de segmentación presentan varios inconvenientes. Por ejemplo *sorted* muestra segmentos con una forma preferentemente diagonal, *equal distance* y *open border* presentan segmentos con líneas rectas (que no son características de la imagen original) y *brightness* deja ver pequeños segmentos dentro de otros más grandes, generando así lo que se conoce con el nombre de sobresegmentación, que hace referencia a segmentos adicionales que posteriormente deben ser removidos.

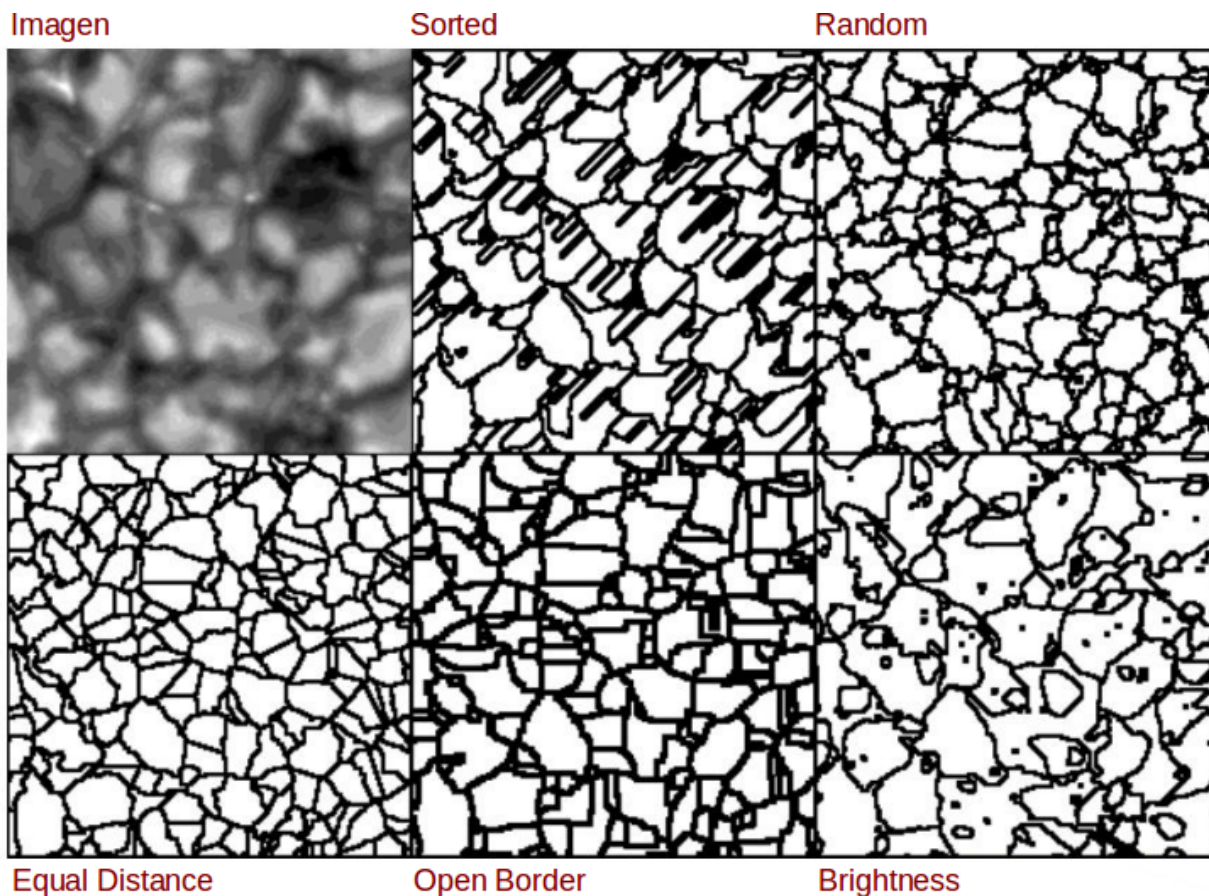


Figura 3-11.: Sección de una imagen del conjunto de datos I y los resultados del proceso de segmentación a partir de cada una de las cinco reglas. El lector se puede remitir al documento para más detalles.

3.2.2. Identificación de los Puntos Magnéticos Brillantes

Una vez se ha segmentado la imagen, (ver figura 3-9, derecha) se procede a la identificación de los MBPs. En este proceso se debe tener en cuenta que los MBPs no son tan fáciles de identificar debido a:

- i) Su tamaño pequeño: se necesita de alta resolución para poder detectarlos en las imágenes.
- ii) Existe ruido en el brillo de la imagen que puede ser confundido o identificado de forma errónea como MBPs: los centros y bordes de los gránulos también son pequeñas zonas brillantes.

Por lo tanto, para desarrollar un código que identifique estos diminutos puntos se debe tener presente que son de un tamaño minúsculo, son muy brillantes y se encuentran en la oscura red intergranular (gradiente de brillo alto).

En particular, Utz et al. (2009a) desarrolló un código para la identificación de los MBPs basado en el cálculo de su tamaño. Sin embargo, esto puede generar un problema porque el algoritmo puede identificar erróneamente pequeños gránulos como grandes MBPs, o grandes MBPs como pequeños gránulos. Por lo tanto él propone identificar estos elementos a partir de su gradiente de brillo, el cual es alto para estos elementos por ser muy brillantes y estar sobre un fondo oscuro (red intergranular).

Por ello, el algoritmo utilizado en el presente estudio identifica a los MBPs con base en el gradiente de brillo del segmento; si el valor del gradiente es mayor a uno previamente establecido en los parámetros de entrada de la interfaz gráfica (cuyos detalles se mostrarán más adelante) se selecciona ese segmento, ya que contiene a un MBP, de lo contrario, el segmento en cuestión será descartado ya que no alberga a un MBP. Al segmento que ha sido seleccionado como MBP se le coloca una señal (símbolo + en la figura **3-12**) sobre la imagen en la ubicación con las coordenadas correspondientes y se le asigna una etiqueta (número único que lo identifica) que más adelante será útil para realizar el seguimiento de los MBPs. La figura **3-12** muestra una imagen completa del conjunto de datos I (del día 10 de marzo de 2007 adquirida por el satélite Hinode) con un FOV de $55,8 \times 111,6$ arcseg², junto con varios MBPs detectados por el algoritmo.

Se puede ver en esta figura que los MBPs se caracterizan por estar ubicados en las regiones intergranulares y, a su vez, por agruparse en zonas circulares, que posiblemente representen patrones de mesogranulación teniendo en cuenta su escala espacial (~ 10 arcoseg de diámetro), como se evidencia por ejemplo en las coordenadas (33, 10) donde se encuentra el centro de una de estas zona circulares. Estas regiones podrían trazar la red magnética mejor conocida como *network* por su intenso campo magnético (varios MBPs). Por su parte los MBPs que no hacen parte de la circunferencia podrían evidenciar la red intra magnética o *intra-network*, ver por ejemplo el MBP de coordenadas (12, 5) el cual se encuentra en el centro de la región circular.

En la figura **3-12**, se puede observar que los MBPs tienen una presencia extendida sobre toda la superficie del Sol, lo cual representa una motivación más para el desarrollo del presente trabajo. Adicionalmente, otra de las principales ventajas de estudiar los MBPs es que estos existen tanto en los máximos del ciclo solar como en los periodos de mínima actividad, a diferencia por ejemplo de las regiones activas que aparecen en rangos de tiempo cortos respecto a la duración del ciclo solar.

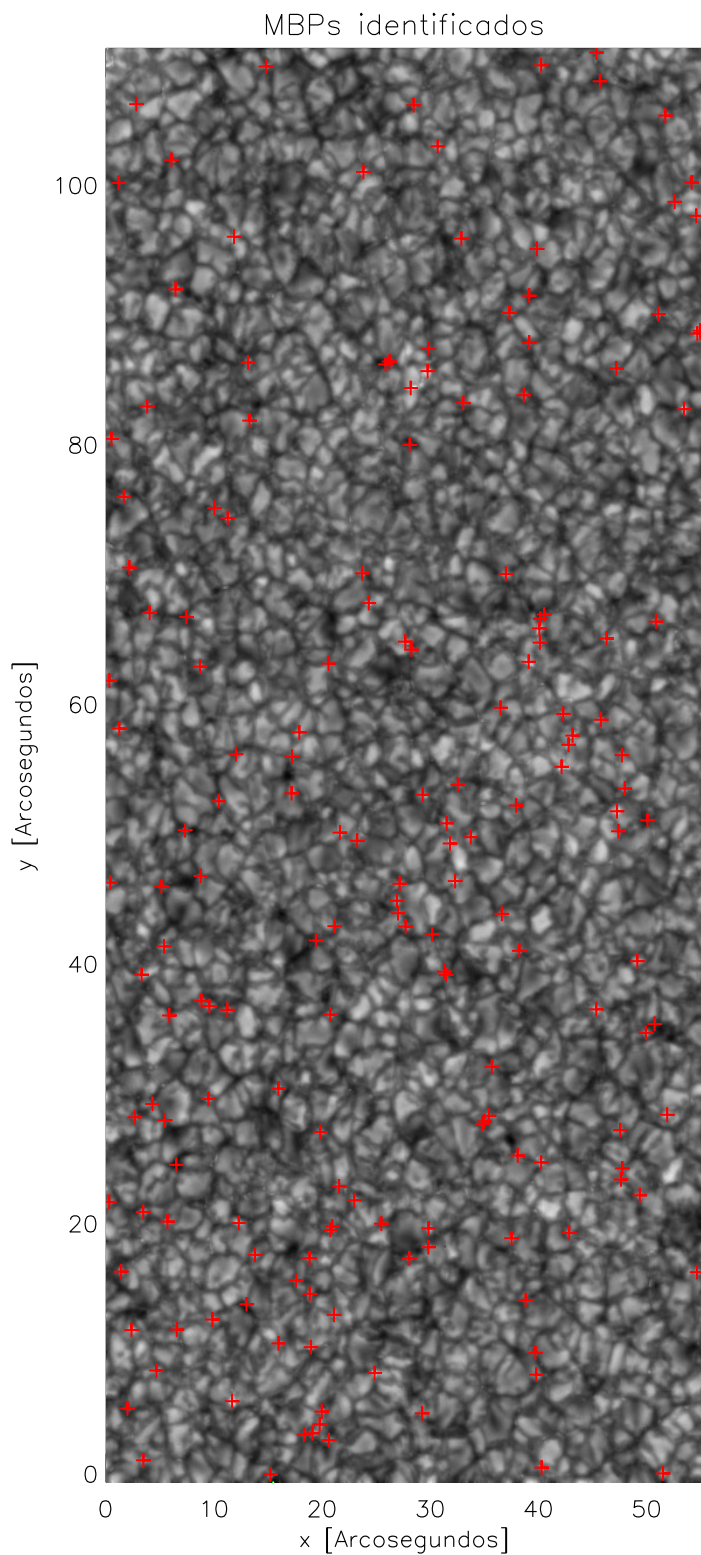


Figura 3-12.: Imagen completa del conjunto de datos I de $55,8 \times 111,6$ arcseg². En color rojo se muestran los MBPs identificados sobre esta.

Al igual que en la fase de segmentación, el algoritmo le permite al usuario configurar varios parámetros de entrada por medio de una interfaz gráfica de usuario o GUI (*Graphical User Interface*) mostrada en la figura 3-13. Estos parámetros son: la imagen sobre la cual se identificarán los MBPs, el rango de identificación para el gradiente de los MBPs (en píxeles), el rango de intensidad, el valor del contraste límite que diferencia gránulos de MBPs y si se quiere o no reducir el ruido que causan las identificaciones erróneas.

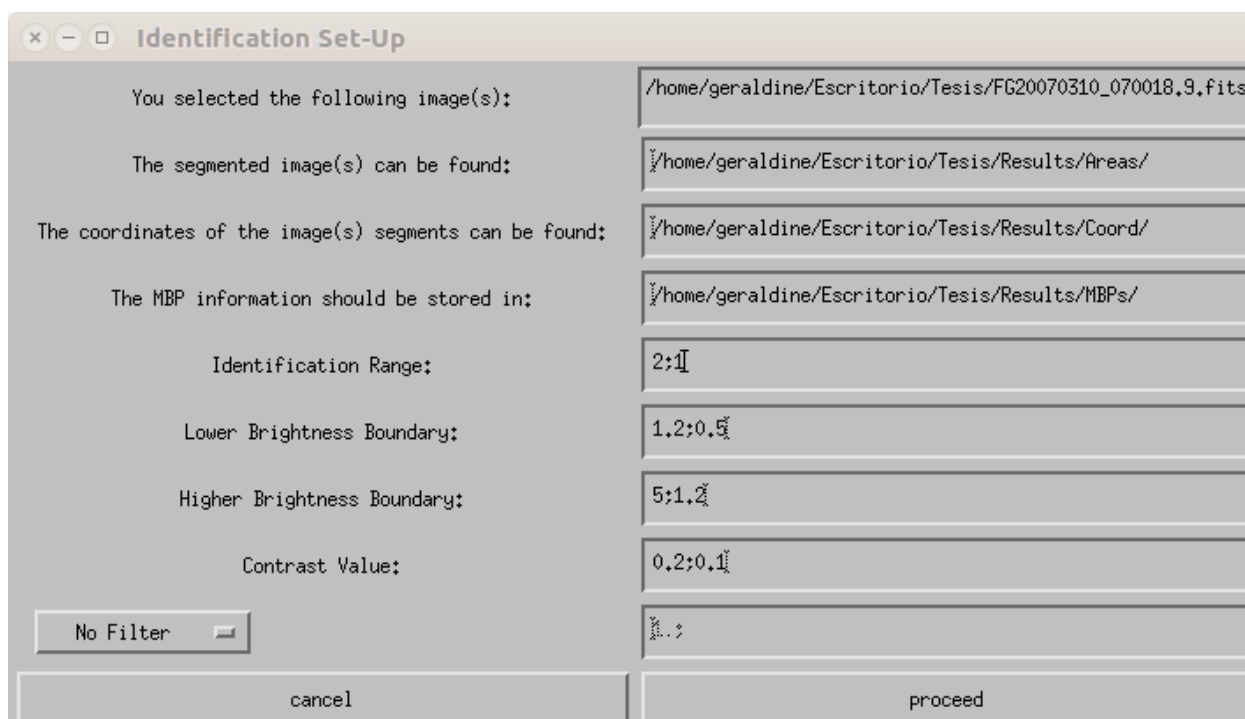


Figura 3-13.: Interfaz gráfica de usuario para configurar los parámetros de entrada del proceso de identificación.

El rango de identificación es un parámetro que establece un número específico de píxeles en el cual se calculará el gradiente de los MBPs, dado que se pueden encontrar MBPs pequeños con bajo gradiente de brillo o MBPs grandes con un alto gradiente de brillo. Para ello es necesario establecer dos dominios, que fueron fijados en el programa con valores de un píxel (MBPs pequeños y de brillo débil) y dos píxeles (MBPs grandes y brillantes) como radio de búsqueda.

Por otro lado, el valor del contraste es uno de los parámetros de entrada más importantes porque permite diferenciar MBPs de gránulos. Este último parámetro se determina previamente en el histograma de gradiente de la primera imagen, mostrado en la figura 3-14 como un ejemplo, encontrando un valor de 0,2 para el primer dominio y de 0,1 para el segundo,

en el caso del conjunto de datos I. Se debe tener especial cuidado en la selección de este parámetro ya que si se elige un valor más alto del ideal se perderán MBPs, y por el contrario si se elige con un valor menor se estarían incluyendo gránulos en la identificación, es decir que no existe un parámetro óptimo predeterminado. Todo lo anterior está contemplado dentro de los errores de las diferentes rutinas empleadas.

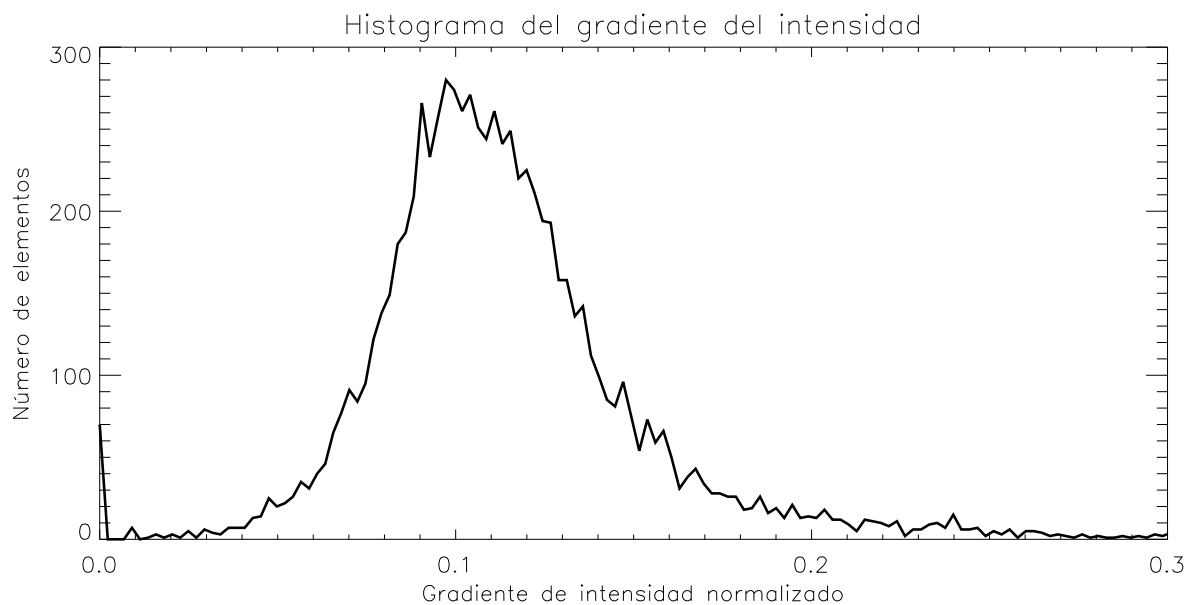


Figura 3-14.: Histograma del gradiente de intensidad, para las imágenes del conjunto de datos I. Esta representación permite establecer el límite entre gránulos y MBPs. Las estructuras con un bajo gradiente de brillo son gránulos (a la izquierda de 0,2) y las estructuras con alto gradiente de brillo son MBPs (a la derecha de 0,2).

Una vez se han identificado los MBPs se procede al cálculo de su tamaño en píxeles, las coordenadas de su centro de brillo, su máxima intensidad, su intensidad promedio y el número de MBPs por imagen. Toda esta información se almacena para su posterior análisis, que será tema del siguiente capítulo de este trabajo.

4. Resultados y análisis

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de la presente investigación es caracterizar la dinámica de Puntos Magnéticos Brillantes en la fotosfera solar, a continuación se realizará un análisis de los resultados encontrados, no sin antes hacer una descripción detallada del proceso llevado a cabo para determinar el tamaño, el diámetro y la velocidad de los MBPs. Cabe resaltar que el hecho de usar dos telescopios solares (satélite Hinode y telescopio en tierra GREGOR) permite realizar un estudio comparativo donde se pueda establecer cómo afecta la resolución espacial y temporal a los resultados.

4.1. Tamaño de Puntos Magnéticos Brillantes

Con el fin de determinar el tamaño de un MBP se cuentan solo los píxeles del segmento que tienen cierta intensidad, teniendo en cuenta que no todos los píxeles del segmento pertenecen al MBP. A simple vista no es claro cuántos píxeles del segmento pertenecen al MBP, ver figura 4-1.

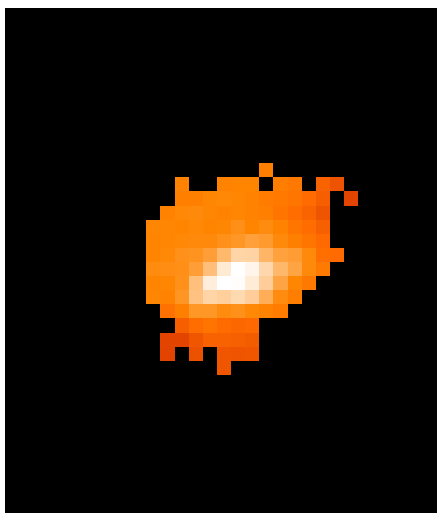


Figura 4-1.: Píxeles de un segmento. No todos los píxeles del segmento pertenecen al MBP. Se debe definir un porcentaje de intensidad a partir del cual se cuentan los píxeles para establecer el tamaño del MBP.

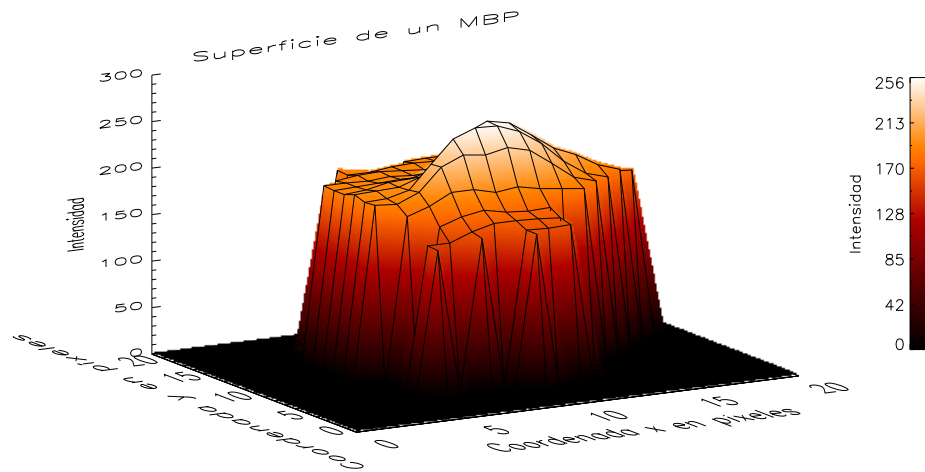


Figura 4-2.: Superficie del Punto Magnético Brillante de la figura 4-1. Se aprecian los píxeles que pertenecen al MBP y algunos de su alrededor. Es evidente que el MBP es más brillante que la red intergranular.

Por lo tanto se necesita una definición para establecer el tamaño de un MBP con el fin de determinar un porcentaje de brillo para establecer el número de píxeles que estarían incluidos y que, por tanto, hacen parte del MBP. En las figuras 4-2 y 4-3 se muestra una representación en tres dimensiones de un MBP, que evidencia la existencia de píxeles alrededor del MBP que pertenecen a la red intergranular.

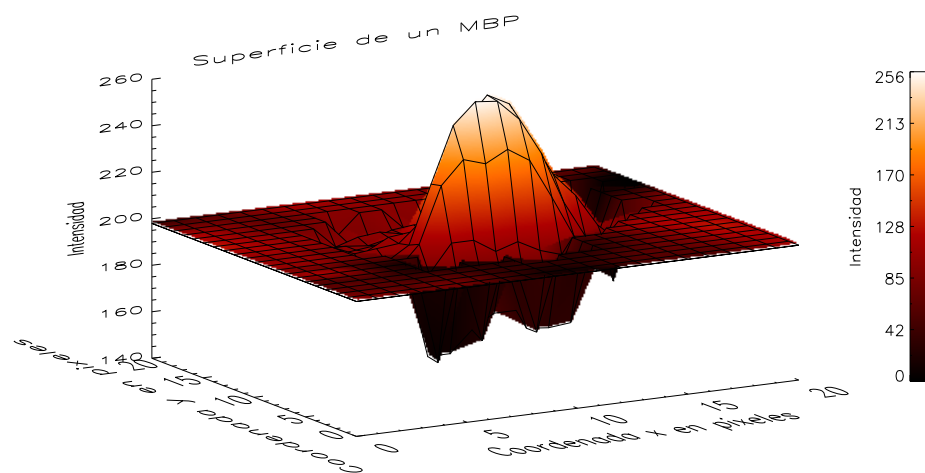


Figura 4-3.: Superficie del MBP de la figura 4-1. Se aprecia el nivel de intensidad de la estructura respecto a la intensidad original de la imagen. En la zona deprimida se puede notar el contraste entre el punto brillante y su alrededor en la red intergranular.

Conjunto de datos I

La definición que se establece se basa en encontrar la relación que existe entre el tamaño del MBP y el porcentaje de corte de intensidad. La figura 4-4 muestra tal relación. Entre más horizontal la línea más independiente será el tamaño de un MBP del porcentaje de corte. Esta estabilidad se puede notar en el rango de 70 % a 90 %. Por lo tanto se elige el valor medio 80 % como el valor representativo de este intervalo y con este valor se realiza el corte en el segmento para establecer el tamaño de los MBPs.

En la figura mencionada la línea roja representa la definición estándar para el tamaño de un MBP, tal definición es análoga a la definición del FWHM (Full Width at Half Maximum) en la cual se consideran todos los píxeles desde la máxima intensidad hasta el 50 % de la misma para determinar el tamaño de un MBP. La línea verde indica nuestra definición de tamaño (80 % de intensidad).

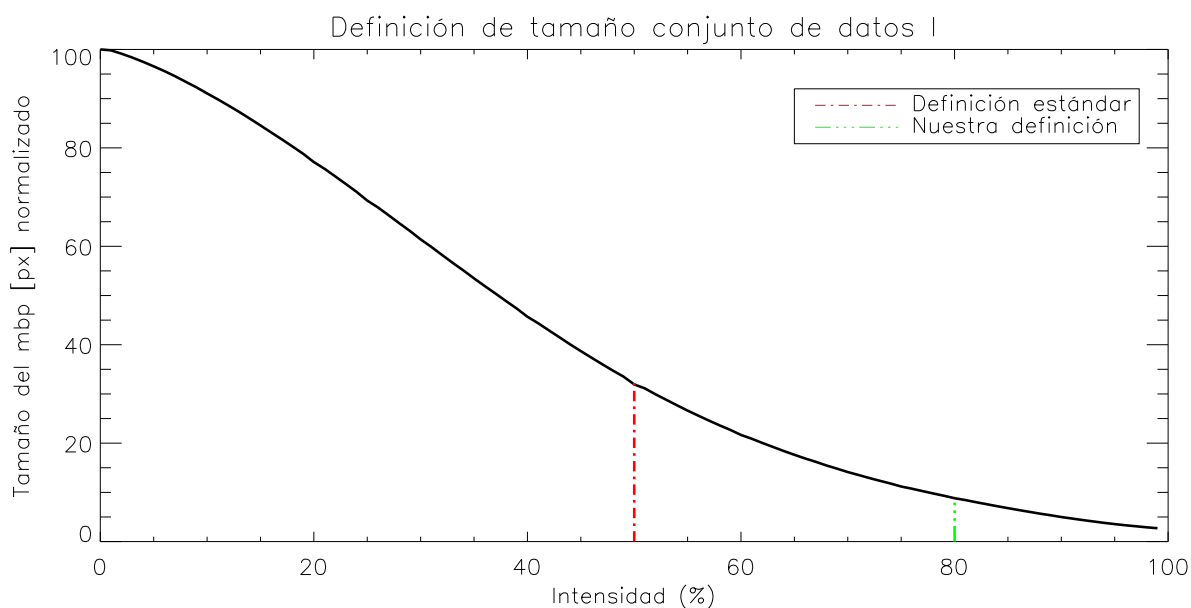


Figura 4-4.: Criterio para establecer el área de un MBP en píxeles. El concepto que subyace a este criterio se fundamenta en encontrar un rango de independencia entre el tamaño del MBP y el porcentaje de intensidad de corte.

Lo anterior es corroborado en la figura 4-5 que muestra la derivada del porcentaje de intensidad respecto al tamaño del MBP o la pendiente de la gráfica anterior. El valor más cercano al caso ideal (línea recta horizontal con pendiente 0) está de nuevo en el 80 %.

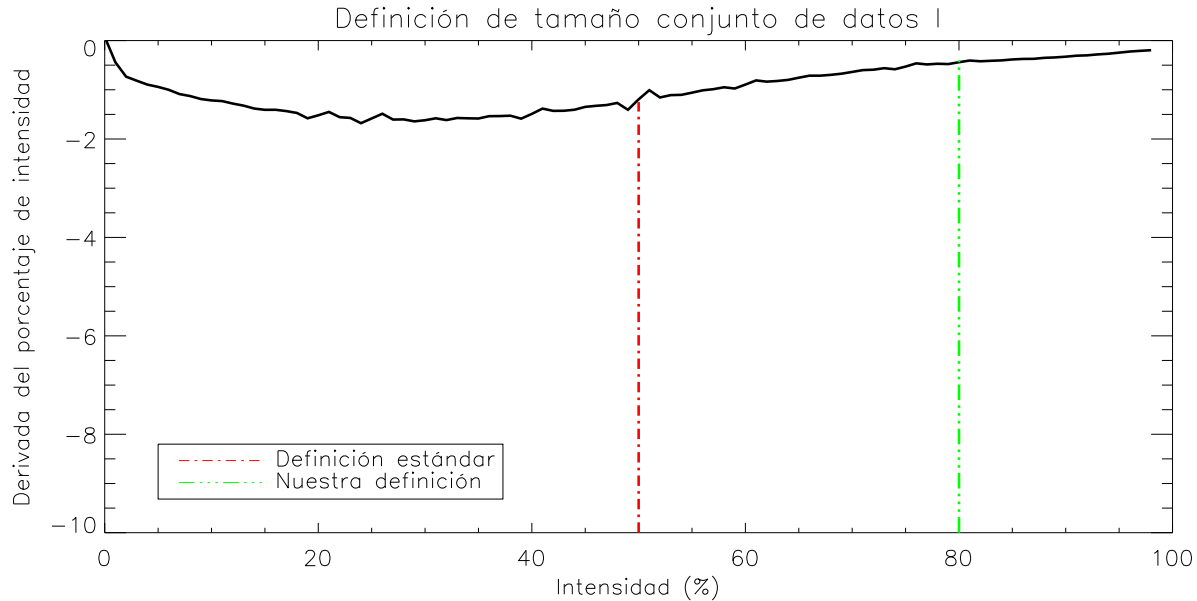


Figura 4-5.: Derivada del porcentaje de intensidad respecto al tamaño del MBP en píxeles. Esta figura muestra la pendiente de la gráfica anterior. Se puede notar que en el 80 % se presenta la menor pendiente.

Una vez se ha determinado el porcentaje de corte, el siguiente paso para establecer el tamaño de un MBP es determinar su área en píxeles con base en este porcentaje de intensidad del segmento que lo contiene. Como se mencionó anteriormente, se selecciona el 80 % de la diferencia entre la intensidad máxima y mínima y se adiciona la intensidad mínima del segmento:

$$\text{Área} = I_{\min} + [(I_{\max} - I_{\min}) \times 0,80] \quad (4-1)$$

Posterior a esto, se realiza la conversión de píxeles a arcosegundos cuadrados y luego a kilómetros cuadrados. Este valor es equivalente al área de un círculo, considerando a los MBPs con forma circular, lo cual se considera una buena aproximación para efectos de este análisis. Finalmente, conociendo el valor del área del MBP se calcula su diámetro.

En este punto se debe tener en cuenta el valor del diámetro del Sol en arcosegundos (el cual cambia en un 5 % aproximadamente dependiendo de la excentricidad de la órbita de la Tierra) para el día en que se tomaron los datos (10 de marzo de 2007). Para establecer el valor equivalente de 1 arcosegundo en kilómetros, se utiliza la opción **pb0r** de IDL. Se encuentra que para la fecha de la observación la equivalencia corresponde a 720 km, y se conoce la resolución espacial del instrumento (0,108"/px para el SOT). Una vez se conoce el área del círculo equivalente a un MBP en kilómetros cuadrados se calcula el diámetro de

dicho elemento. En el siguiente aparte se establece el cálculo correspondiente:

Diámetro de un MBP de 16 px^2 de área:

$$\begin{aligned}
 16 \text{ px}^2 \times 0,108''/\text{px} \times 0,108''/\text{px} \times 720 \text{ km} \times 720 \text{ km} &= 96745,9 \text{ km}^2 \\
 \pi r^2 &= 96745,9 \text{ km}^2 \\
 r &= 175,5 \text{ km} \\
 D &= 351 \text{ km}
 \end{aligned}$$

Con esta información se elabora el histograma de la distribución de áreas presentado en la figura 4-6 que muestra el número de elementos que tienen cierta área (en km^2) con un corte de intensidad de 80%. En la figura se revela una distribución bimodal con ajuste logarítmico normal en color rojo, y en color verde se destacan las dos componentes que la conforman.

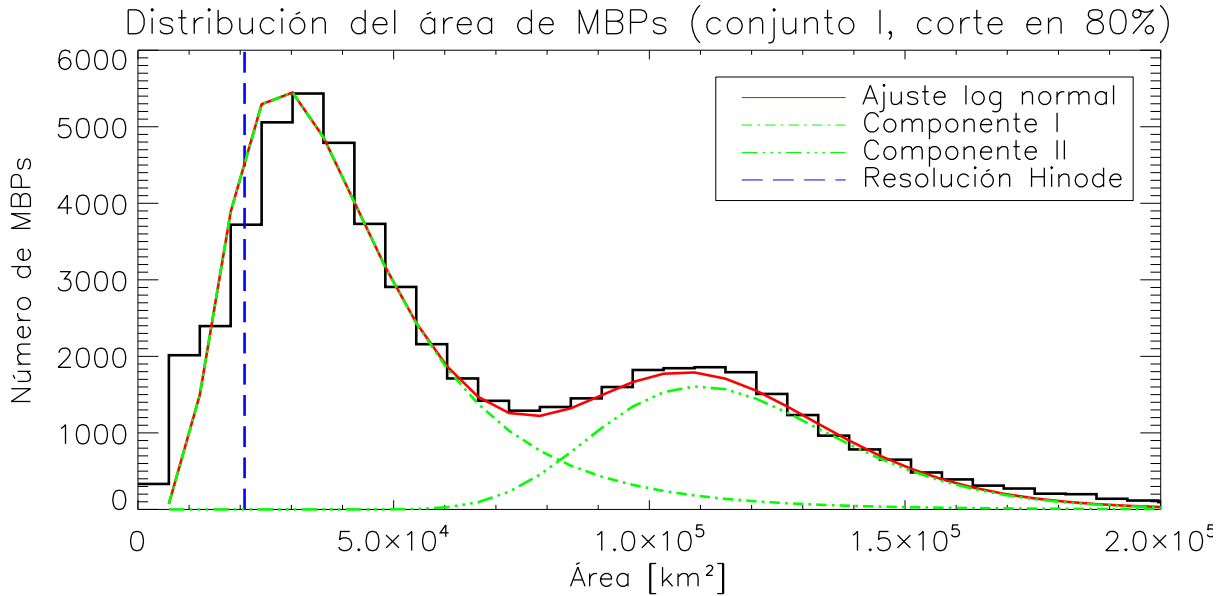


Figura 4-6.: Distribución del área de los MBPs (en km^2) con ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de la distribución bimodal (verde). La línea vertical (azul) indica la resolución espacial por difracción del instrumento SOT.

Los parámetros de ajuste de esta distribución logarítmica normal se muestran en la tabla 4-1. El valor medio de la primera componente de esta distribución bimodal es $\mu = 37000 \cdot | \div 1,7 \text{ km}^2$ y representa el 71% de la distribución total. Por otro lado, el valor medio de la segunda componente es $\mu = 115000 \cdot | \div 1,2 \text{ km}^2$ y representa el 29% de la totalidad de

Descripción	Valor medio (μ) [km ²]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	37000	1,7	71
Distribución log-normal componente II	115000	1,2	29

Tabla 4-1.: Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 80 %.

la distribución. Los resultados a la izquierda de la línea recta azul no son confiables porque están por debajo de la resolución espacial por difracción de Hinode (21000 km²). En la tabla 4-1 el factor representa el valor que multiplica y divide al valor medio, lo cual es propio de una distribución logarítmica normal. Por su parte el parámetro de peso indica la ponderación de cada una de las dos componentes de la distribución dentro del total.

En este punto es pertinente la pregunta: ¿Qué representa la segunda componente de esta distribución? ya que esta se sale del rango en el cual otros estudios han reportado valores para el área de los MBPs (entre 7000 y 70000 km² (Utz et al., 2009b)). Para dar respuesta a esta pregunta, se plantea que existen dos poblaciones de elementos diferentes. La primera población cuenta con un área que está en el rango de 22000 a 62000 km², representando una familia de MBPs (con mayor cantidad de elementos) y la segunda en el rango de 93000 - 141000 km² son considerados como una familia de pequeños gránulos en formación o segmentos de gránulos (con menor número de elementos), teniendo en cuenta que los gránulos tienen valores de área en el rango de 105000 a 2600000 km² (Kawaguchi, 1980).

Naturalmente, surge también la pregunta: ¿Los elementos que pertenecen a la sección de la distribución donde se sobreponen las dos componentes son MBPs o gránulos?. Aquí se evidencia la incertidumbre del código ya que este identifica elementos con base en su gradiente de brillo, pero no logra diferenciar MBPs de gránulos pequeños, en su lugar permite decir que a la derecha de 330 km (intersección de las dos líneas punteadas en color verde) es más probable que los elementos sean gránulos y a la izquierda es más probable que sean MBPs.

Continuando con el análisis de los resultados y con el fin de verificar la precisión en la definición de tamaño descrita anteriormente, se calcula la distribución de las áreas de los MBPs, pero esta vez usando la definición estándar, es decir, con corte en el 50 % de la intensidad del segmento que contiene al MBP, como se muestra en la figura 4-7. En esta figura, se presenta una distribución bimodal que también se ajusta a una curva logarítmica normal (en rojo) junto con las dos componentes que la conforman (en verde). En la tabla 4-2 se listan sus parámetros de ajuste.

El valor medio de la primera componente de esta distribución bimodal es $\mu = 231000 \cdot | \div$

1,9 km² y representa el 80 % de la distribución total. En cuanto al valor medio de la segunda distribución, este es $\mu = 494000 \cdot | \div 1,2 \text{ km}^2$, que corresponde al 20 % del total. Los resultados a la izquierda de la línea recta azul no son confiables porque están por debajo de la resolución espacial por difracción del telescopio Hinode (21000 km²).

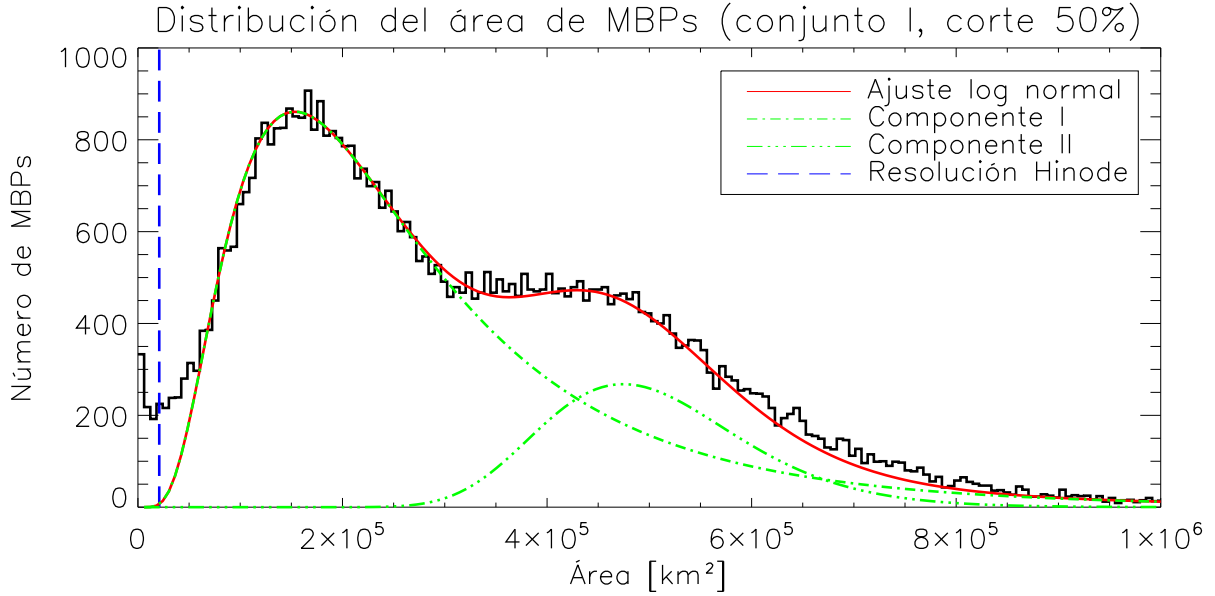


Figura 4-7.: Distribución del área de los MBPs (km²) con ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de la distribución bimodal (verde). La línea vertical indica la resolución espacial por difracción del SOT (azul).

Descripción	Valor medio (μ) [km ²]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	231000	1,9	80
Distribución log-normal componente II	494000	1,2	20

Tabla 4-2.: Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 50 %.

Sorprendentemente, la primera componente de esta distribución representa una población de gránulos (con mayor número de elementos) ya que su área se encuentra en el rango entre 120000 a 400000 km². También la segunda componente se interpreta como una familia de gránulos con área en el rango de 400000 a 600000 km², pero con menor número de elementos.

Finalmente, para concluir el análisis de los resultados relacionados con las áreas de los MBPs, se comparan las dos distribuciones con cada uno de los porcentajes de corte de intensidad (50 y 80 %). La primera de estas se construyó con base en la definición estándar y la segunda con base en nuestra definición. Se concluye que esta última presenta mayor exactitud porque presenta valores en el rango mencionado por otros autores (22000 a 62000 km², ver primera componente de la distribución de la figura 4-6) como lo explica (Utz et al., 2009b). Por su parte, los resultados con base en la definición estándar proporcionan tamaños para los MBPs muy grandes, del orden de 122000 a 500000 km² (ver la primera componente de la figura 4-7), los cuales, nuevamente, se alejan significativamente del rango mencionado por otros estudios.

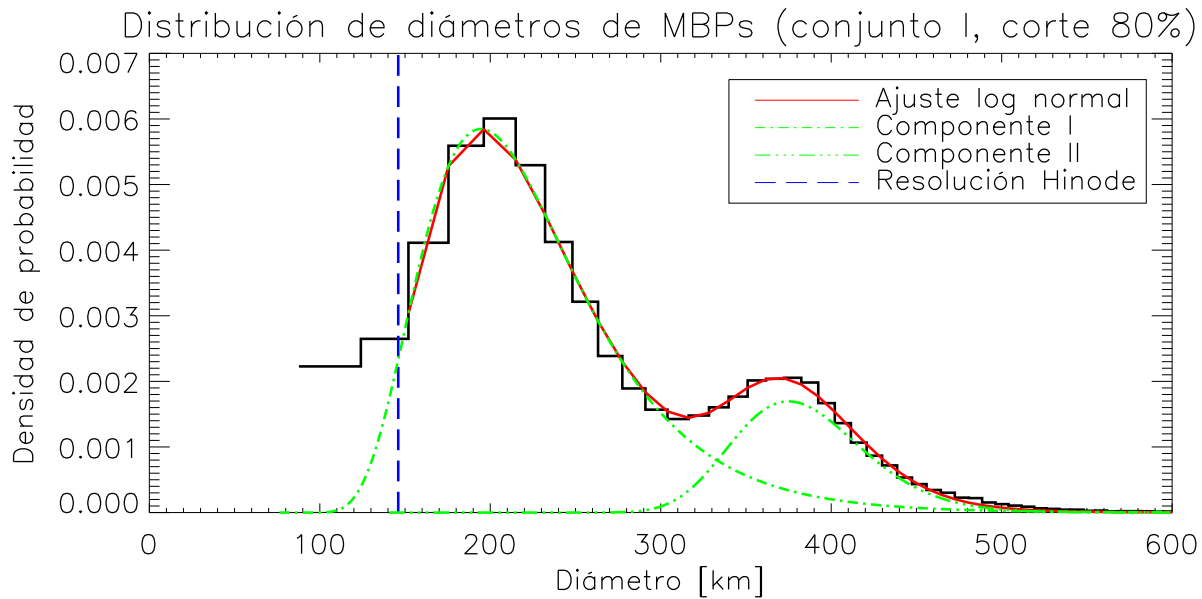


Figura 4-8.: Distribución de los diámetros de los MBPs en kilómetros con ajuste a una curva log normal (rojo) y sus componentes (verde). La recta vertical (azul) muestra el límite de la resolución óptica de Hinode.

La figura 4-8 muestra la distribución de los diámetros de los MBPs para un porcentaje de corte en el 80 % de intensidad. De nuevo, el histograma muestra una distribución bimodal con ajuste logarítmico normal (en rojo). Los resultados a la izquierda de la línea recta azul no son confiables porque están por debajo de la resolución espacial por difracción de Hinode (150 km). Las líneas punteadas (verde) representan las dos componentes que conforman la distribución.

Los parámetros de ajuste son presentados en la tabla 4-3. El valor medio de la primera componente de esta distribución bimodal es $\mu = 140 + 120 \cdot | \div 1,5$ km y representa el 84 %

de la totalidad de la misma y el de la segunda distribución es $\mu = 240 + 140 \cdot | \div 1,2$ km con un 16 %. Los valores medios mencionados constan de dos sumandos ya que generalmente una distribución logarítmica inicia en cero, sin embargo, la distribución presentada en la figura 4-8 no lo hace, por ende es necesario adicionar un parámetro que corrija su corrimiento.

Descripción	Valor medio (μ) [km]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	140 + 120	1,5	84
Distribución log-normal componente II	240 + 140	1,2	16

Tabla 4-3.: Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 80 %.

Lo anterior indica que, nuevamente, se encuentran dos poblaciones de elementos con diferentes diámetros, la primera de estas representa MBPs (en mayor número), teniendo en cuenta que el diámetro de estos elementos está en el rango de 170 a 370 km y se ajusta a los valores reportados en otros estudios (Utz et al., 2009b), los cuales reportan un rango entre 100 - 300 km. La segunda población cuenta con un rango en el diámetro de 310 a 450 km representando gránulos bebés o fragmentos de gránulos, con menor número de elementos, ya que se ajusta al rango encontrado por (Kawaguchi, 1980), el cual está entre 370 - 1800 km.

De igual forma, como se mencionó anteriormente, se comparan los dos resultados para los porcentajes 80 % y 50 %, pero esta vez para la distribución de los diámetros de los MBPs. En la figura 4-9 se muestra el resultado para el segundo porcentaje.

Los parámetros de ajuste de esta distribución bimodal se presentan en la tabla 4-4. El valor medio de la primera componente (81 % de la distribución) es $\mu = 300 + 210 \cdot | \div 1,7$ km y el de la segunda componente (19 % de la totalidad) es $\mu = 300 + 480 \cdot | \div 1,3$ km.

Descripción	Valor medio (μ) [km]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	300 + 210	1,7	81
Distribución log-normal componente II	300 + 480	1,3	19

Tabla 4-4.: Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos I con un porcentaje de corte de 50 %.

Sorprendentemente, la primera componente de esta distribución representa una población de gránulos (con mayor número de elementos) ya que su diámetro se encuentra en el rango entre

300 - 900 km. También la segunda componente se interpreta como una familia de gránulos con diámetro en el rango de 600 - 1000 km pero con menor número de elementos.

Lo anterior indica que al comparar los dos porcentajes de corte 50% y 80%, los resultados obtenidos con el segundo porcentaje (nuestra definición) de corte de intensidad son más precisos porque el diámetro de los MBPs se encuentra en el rango de 170 a 390 km (primera componente de la distribución de la figura 4-8) como lo sugieren los estudios descritos en Utz et al. (2009b) en los que se encontró un rango para el diámetro de los MBPs de 100 a 300 km. Adicionalmente, los resultados obtenidos con el porcentaje de corte en 50% son muy grandes para las dos componentes de la distribución (ver figura 4-9). Claramente estos resultados no se encuentran en el rango mencionado y representan dos poblaciones de gránulos.

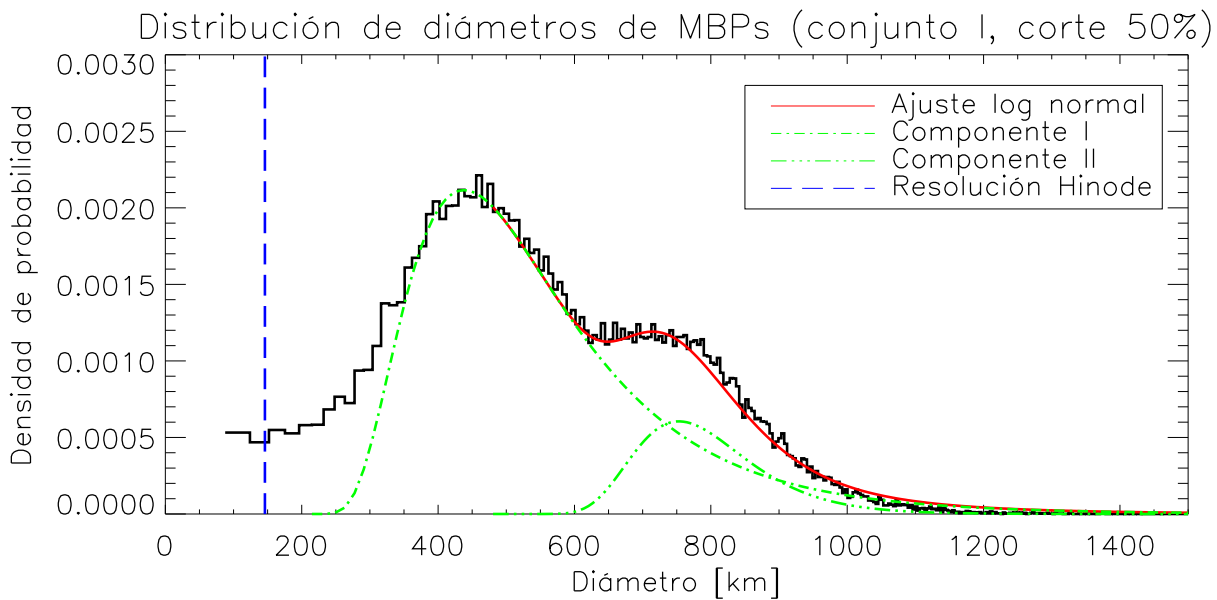


Figura 4-9.: Distribución de los diámetros de los MBPs (km) con ajuste a una curva log normal (rojo) y sus componentes (verde). La recta vertical (azul) muestra el límite de la resolución óptica del telescopio Hinode.

Es importante aclarar que inicialmente se realizó el ajuste de las distribuciones presentadas arriba con curvas Gaussianas. Se concluyó que de los dos ajustes realizados, normal y logarítmico normal, el más preciso es el segundo porque permite calcular valores, tanto de área como de diámetro por encima de cero, a diferencia del ajuste Gaussiano el cual permite calcular estos parámetros físicos menores a cero. Para esta tarea, se elaboraron varias rutinas en IDL que permitieron ajustar los datos a diferentes distribuciones.

Finalmente, es adecuado mencionar que la distribución logarítmica normal es propia de procesos naturales en los que lo importante es el crecimiento. Por ejemplo el crecimiento en el tamaño de las bacterias en una caja de Petri y la abundancia de peces (que corresponderían al crecimiento de MBPs en nuestro caso). Este tipo de ajuste se aplica a distribuciones que se caracterizan por tener un valor medio bajo con variaciones grandes y cuyos valores no pueden ser negativos (Limpert et al., 2001).

El ajuste logarítmico normal se realizó con base en las siguientes ecuaciones:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln(x)-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (4-2)$$

$$E(X) = e^{\mu+\sigma^2/2} \quad (4-3)$$

$$var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu+\sigma^2} \quad (4-4)$$

donde: σ es la desviación estándar y μ es la media. La esperanza $E(X)$ es la media de la distribución y la raíz cuadrada de la varianza $var(X)$ es la desviación estándar.

Las ecuaciones 4-3 y 4-4 están definidas para una distribución logarítmica normal de una componente. Al obtener en el presente estudio una distribución logarítmica normal de dos componentes, los valores de μ y σ representan el valor exponencial de los parámetros que ajustan la curva logarítmica normal a los resultados.

Conjunto de datos II

A continuación se realizará un análisis similar al anterior pero con el conjunto de datos número II. La identificación de los MBPs en este conjunto de datos se caracterizó por un rango de búsqueda, de cierto gradiente, de dos a tres píxeles. El gradiente límite que diferencia gránulos de MBPs se encontró en 0,07 para el primer dominio y en 0,04 para el segundo. Se identificaron MBPs principalmente en la red intergranular como se ve en la figura 4-10. En esta imagen se puede apreciar una correspondencia espacial entre los MBPs de la imagen y las cruces rojas que los identifican. Las regiones de grupos de MBPs como aquella ubicada en las coordenadas (28, 13) representan la denominada red magnética o *network* e indican zonas de fuerte campo magnético. Cabe mencionar que, a diferencia del conjunto de datos I, un porcentaje nulo de gránulos en formación se identificaron como MBPs.

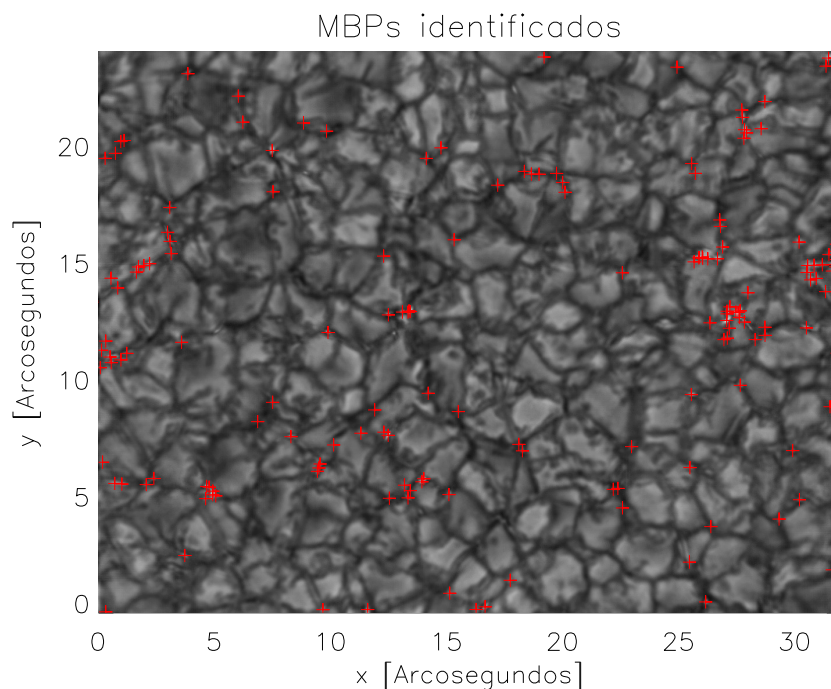


Figura 4-10.: Una imagen completa del conjunto de datos II y MBPs identificados sobre esta en color rojo.

Teniendo en cuenta el proceso descrito anteriormente para establecer el porcentaje de corte en la intensidad de un segmento con el fin de determinar el tamaño de un MBP se especificará este procedimiento para el conjunto de datos II. En primer lugar se determina la relación entre el tamaño del MBP y el porcentaje de intensidad en el cual se realiza el corte, como se muestra en la figura 4-11. Junto a ello, se establece la derivada de la relación anterior con el fin de determinar la pendiente más cercana a cero, y de esta manera seleccionar el porcentaje mencionado (figura 4-12). Se encuentra, de nuevo, que este valor está en el 80 %.

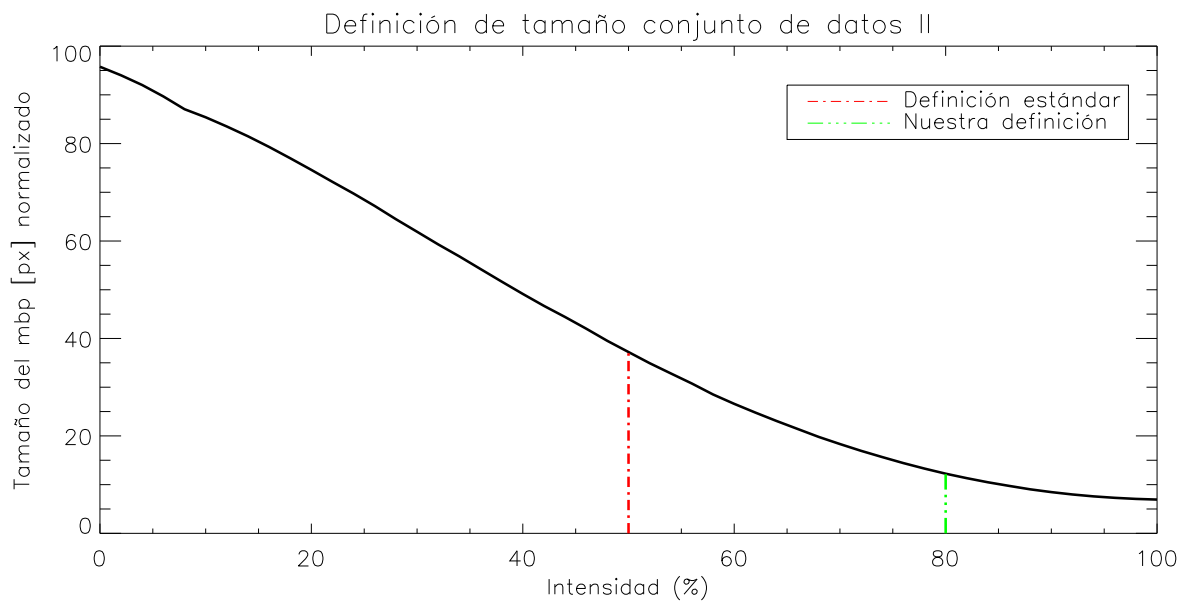


Figura 4-11.: Criterio para establecer el área de un MBP en píxeles. La línea vertical verde representa nuestra definición (80 %). La línea vertical roja representa la definición estándar para el tamaño de un MBP.

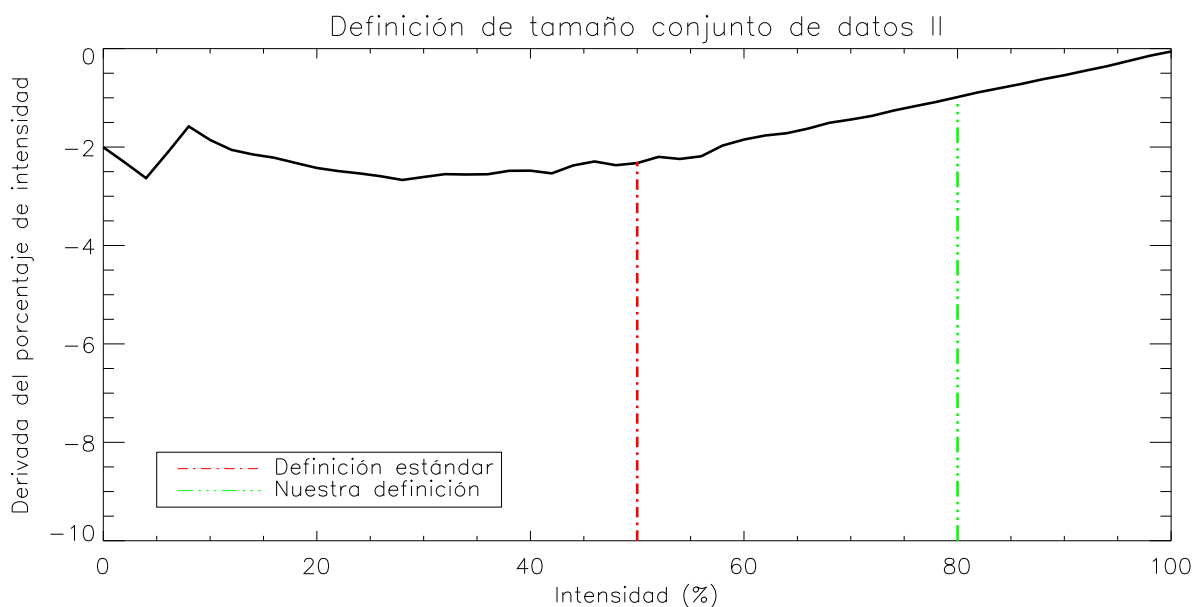


Figura 4-12.: Derivada del porcentaje de intensidad respecto al tamaño del segmento en píxeles. Esta figura muestra la pendiente de la figura 4-11. En el rango de 70 a 90 % la derivada es menor y con ello la pendiente de la recta de la figura 4-11 también es menor. Por lo tanto 80 % representa la menor pendiente.

Nuevamente se calcula el tamaño de los MBPs sabiendo que para el día 13 de julio de 2019, un valor de 1 arcosegundo tiene una equivalencia de 737 km, y conociendo que la resolución óptica del telescopio GREGOR es 0,0286 arcseg/px. Con esta información se calcula el área de los MBPs en píxeles y se transforma en unidades de km^2 . Finalmente, se elabora el histograma presentado en la figura 4-13, que se ajusta a una distribución logarítmica normal (en rojo) de dos componentes (en verde). La línea recta azul alrededor de 2000 km^2 representa la resolución espacial por difracción de GREGOR.

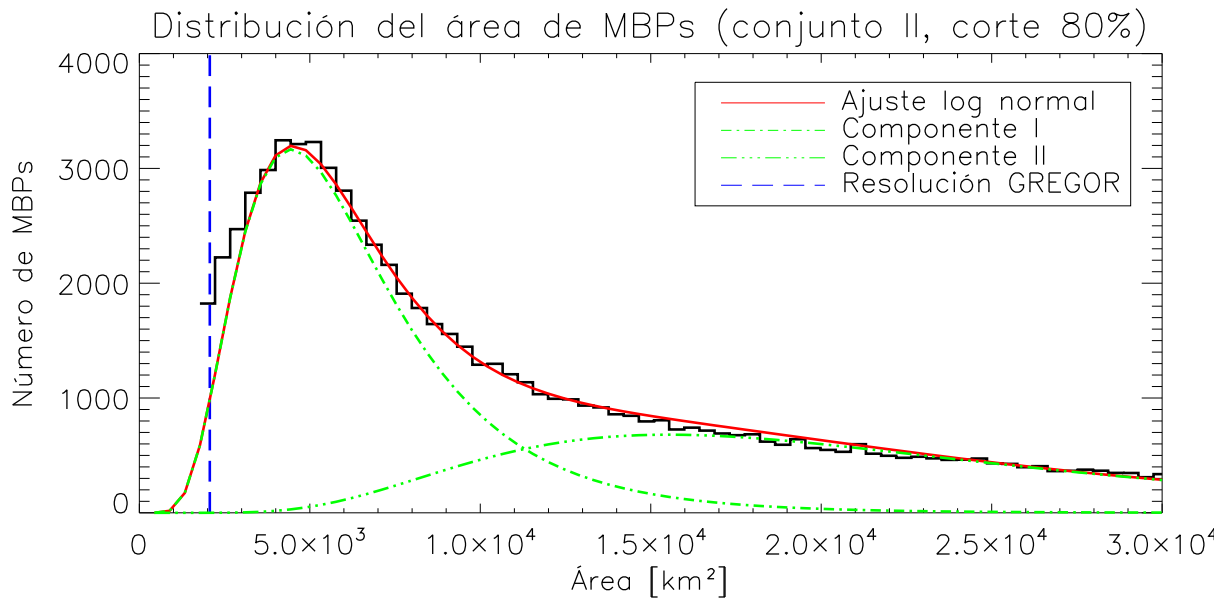


Figura 4-13.: Histograma de frecuencias del área de los MBPs (km^2) con la curva de ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de esta distribución (verde).

Dicha distribución tiene un valor medio $\mu = 5700 \cdot | \div 1,6 \text{ km}^2$ y representa el 57% de la distribución total para la primera componente. Por otro lado, la segunda componente se caracteriza por tener un valor medio de $\mu = 20000 \cdot | \div 1,6 \text{ km}^2$ y representa el 43% de la distribución. Lo anterior se resume en la tabla 4-5.

Las dos componentes de esta distribución bimodal se interpretan como sigue: dado que la primera componente se caracteriza por tener un valor de área en el rango de 2200 a 15000 km^2 , se considera como una población de MBPs pequeños o en formación, los cuales se encuentran en mayor número. Por otro lado, debido a que la segunda componente se encuentra en el rango de 7800 a 52000 km^2 , es considerada como una población madura de MBPs, con un número leve menor de elementos. Lo anterior teniendo en cuenta que el área de un MBP reportada en los estudios de Utz et al. (2009b) está en el rango de 7000 - 70000 km^2 .

Descripción	Valor medio (μ) [km ²]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	5700	1,6	57
Distribución log-normal componente II	20000	1,6	43

Tabla 4-5.: Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 80 %.

Similar al proceso aplicado al conjunto de datos I, se compara este resultado con la distribución del tamaño de los MBPs pero esta vez usando la definición estándar, la cual establece el porcentaje de corte en 50 %. Esta distribución también se ajusta a una curva logarítmica normal de dos componentes (figura 4-14) y cuenta con un valor medio $\mu = 5700 \cdot | \div 1,6$ km² para la primera componente, que es el 73 %, y de $\mu = 16000 \cdot | \div 1,6$ km² para la segunda, que corresponde al 27 % del total. Lo anterior se encuentra en la tabla 4-6. La línea recta azul alrededor de 2000 km² representa la resolución espacial por difracción del telescopio GREGOR.

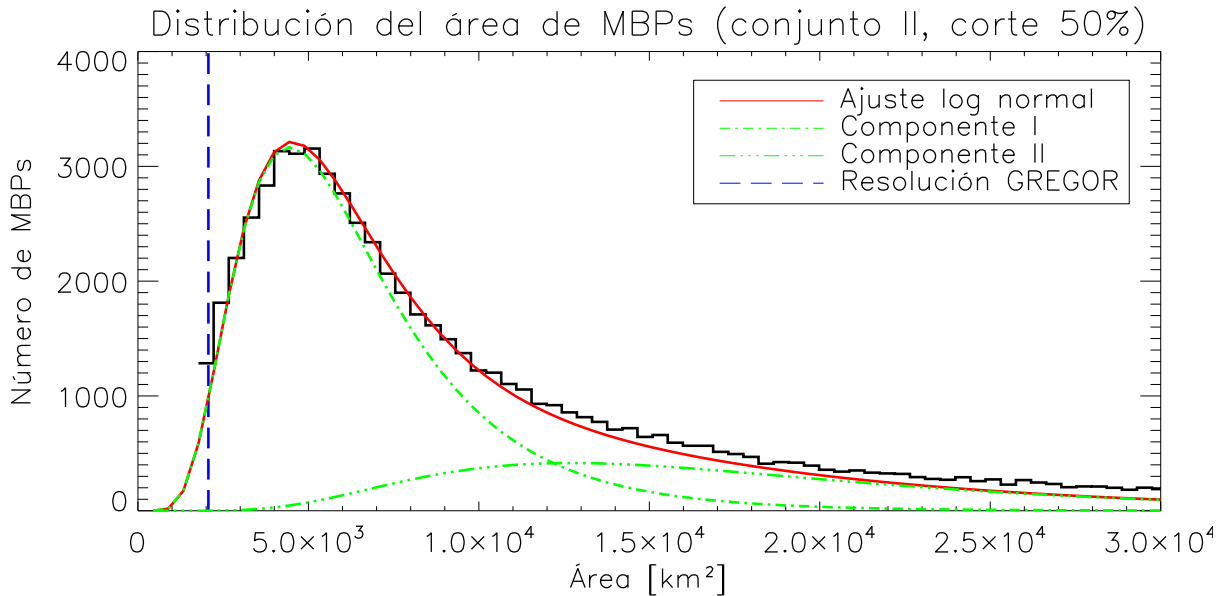


Figura 4-14.: Histograma de frecuencias del área de los MBPs (km²) con ajuste log normal (rojo) y las dos componentes de esta distribución (verde).

La primera componente de esta distribución representa una familia de MBPs bebés o en formación de área en el rango de 2200 - 15000 km² y con mayor número de elementos. En

Descripción	Valor medio (μ) [km ²]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	5700	1,6	73
Distribución log-normal componente II	16000	1,6	27

Tabla 4-6.: Parámetros de ajuste para el área del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 50 %.

cuanto a la segunda componente, esta también representa una familia de MBPs maduros con rango de 6300 a 40000 km² pero en menor cantidad de elementos. Los resultados anteriores se encuentran en el rango de otros estudios (Utz et al., 2009b), los cuales establecen valores entre 7000 y 70000 para el área de los MBPs.

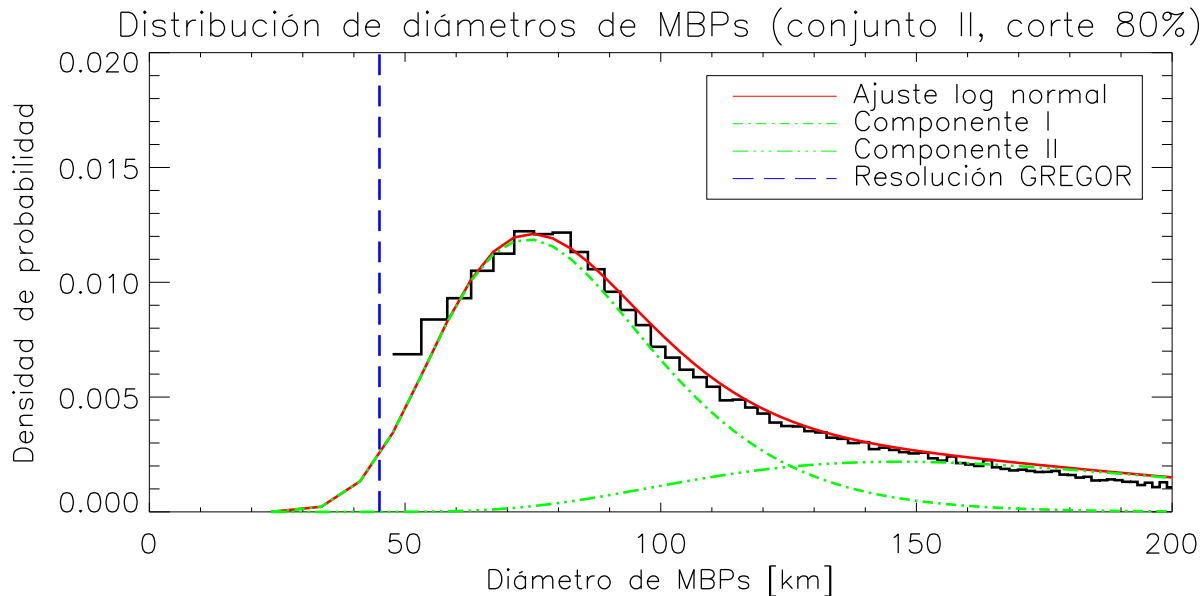


Figura 4-15.: Histograma del diámetro de los MBPs en km para el conjunto de datos II. Se aprecia en color rojo el ajuste a una curva logarítmica normal junto con sus dos componentes en verde.

En este punto se determina el diámetro de los MBPs en km y se elaboran los histogramas de distribución mostrados en las figuras 4-15 y 4-16 con ajuste logarítmico normal en color rojo y en color verde sus dos componentes. El primero de ellos, fue realizado para un porcentaje de corte de 80 % (usando nuestra definición) y cuenta con un valor medio $\mu = 80 \cdot | \div 1,3$ km para la primera componente que representa el 70 % de la totalidad de la distribución y $\mu = 150 \cdot | \div 1,5$ km para la segunda, la cual representa el 30 % de la distribución total,

ver tabla 4-7. La línea azul en 45 km representa la resolución espacial por difracción del telescopio GREGOR.

Descripción	Valor medio (μ) [km]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	79 + 1	1,3	70
Distribución log-normal componente II	130 + 20	1,5	30

Tabla 4-7.: Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 80 %.

Cada una de las componentes (en línea punteada verde) representa una población de pequeños MBPs. La primera de estas con un rango de diámetro de 50 a 140 km (con mayor número de elementos) y la segunda entre 70 a 340 km, con menor número.

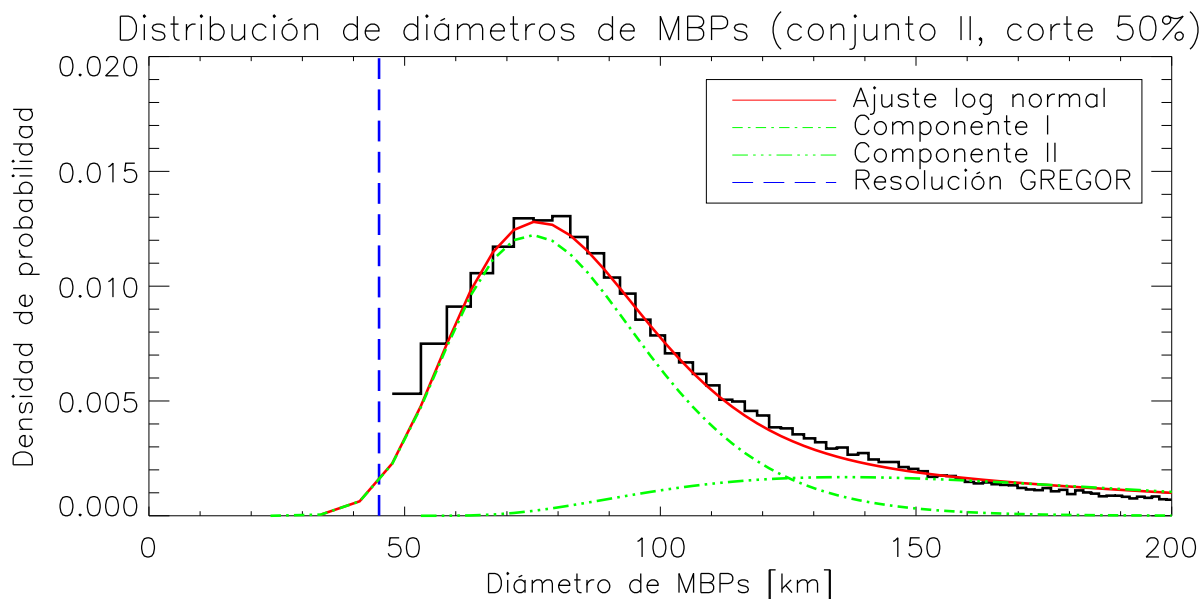


Figura 4-16.: Histograma del diámetro de los MBPs en km para el conjunto de datos II. Se aprecia en color rojo el ajuste a una curva logarítmica normal junto con sus dos componentes en verde.

Por otro lado, el histograma de la figura 4-16 (que fue elaborado para un porcentaje de corte de 50%) presenta un valor medio de $\mu = 80 \cdot | \div 1,3$ km para el 70% de la totalidad, es decir para la primera componente. Por su parte, la segunda componente cuenta con un

valor medio $\mu = 130 \cdot | \div 1,6$ km para el 30 % de la distribución (tabla 4-8). La línea recta azul en 45 km representa la resolución espacial por difracción de GREGOR.

Descripción	Valor medio (μ) [km]	Factor	Parámetro de peso [%]
Distribución log-normal componente I	75 + 5	1,3	70
Distribución log-normal componente II	105 + 25	1,6	30

Tabla 4-8.: Parámetros de ajuste para el diámetro del conjunto de datos II con un porcentaje de corte de 50 %.

Nuevamente, cada una de las componentes (en línea verde punteada) de esta última distribución representa una población de pequeños MBPs o en proceso de formación o desintegración. La primera de estas poblaciones, que cuenta con una cantidad mayor de elementos, se encuentra en un rango de diámetro promedio de 50 a 140 km. Por su parte, la segunda familia de MBPs, que se caracteriza por poseer un número menor de elementos, cuenta con un diámetro promedio entre 50 a 330 km.

No es sorprendente que para el conjunto de datos II se obtuvieran valores de diámetro menores a los encontrados usando el conjunto de datos I, debido a que la resolución del telescopio GREGOR es mayor que la del telescopio Hinode y, por ende, en sus observaciones se pueden identificar elementos más pequeños, los cuales se encuentran en un rango promedio de 50 - 140 km para los dos porcentajes de corte del presente estudio (50 % y 80 %) como se puede verificar en la primera componente de las figuras 4-15 y 4-16, representando una población de MBPs de menor tamaño.

Lo anterior representa un resultado sin precedentes ya que nunca antes se había estudiado el tamaño de los MBPs en alta resolución (0,0286 arcseg/px). Por consiguiente, este resultado no cuenta con un referente para su comparación y así poder establecer y decir si está en el rango establecido de otras investigaciones. Por el contrario, para la segunda componente de las figuras mencionadas se puede apreciar que se acerca más al rango de otros estudios, como los mencionados anteriormente, ya que estas figuras muestran un rango en el diámetro de los MBPs de 50 a 330 km. En este caso, dicha componente, de las dos distribuciones, representa una segunda población de MBPs de mayor tamaño.

Cabe mencionar que tanto las distribuciones de área como las de diámetro para este conjunto de datos presentaron unas barras en el histograma antes del límite de la resolución del telescopio GREGOR. Tales barras representan ruido, por lo cual fueron eliminadas del histograma al no tener un significado físico dada su ubicación a la izquierda de la línea recta

azul (ver el ejemplo de la figura 4-17).

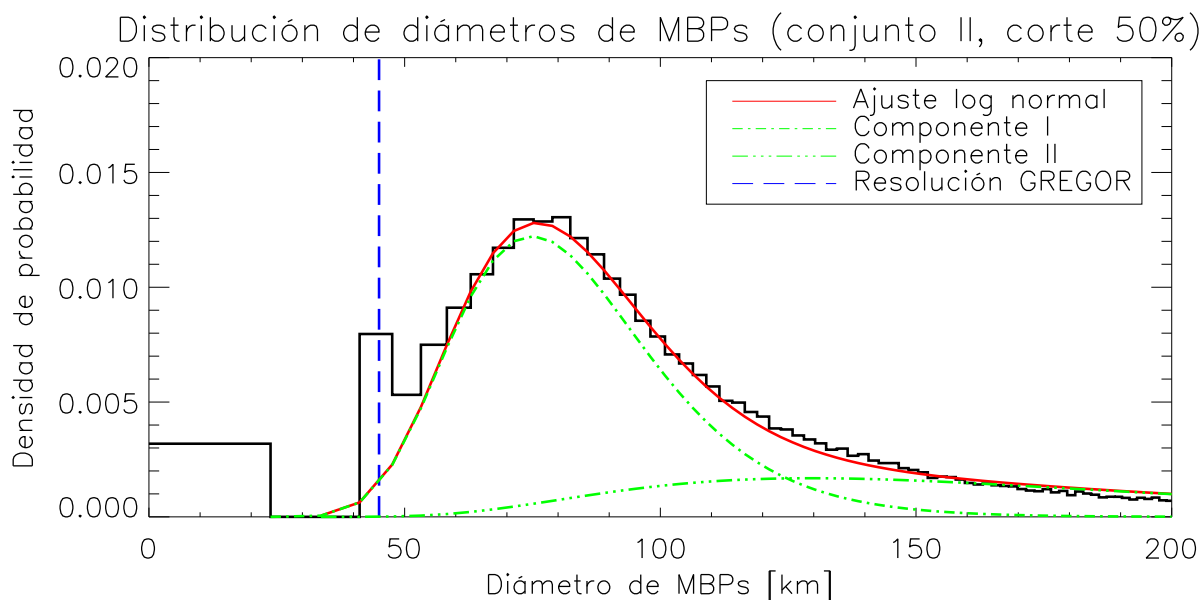


Figura 4-17.: Histograma del diámetro de los MBPs (en km) para el conjunto de datos II con corte en 50% de intensidad. Se aprecian dos barras a la izquierda de la línea vertical azul, la cual representa la resolución espacial por difracción del telescopio GREGOR.

Al igual que con el conjunto de datos I, se realizaron ajustes normal y logarítmico normal. El mejor de los dos ajustes realizados es el logarítmico normal ya que no ajusta valores por debajo de cero en área o diámetro.

Finalmente, es pertinente dar una explicación a la ausencia de una segunda distribución (pico encontrado en los resultados del conjunto de datos I), la cual representa una población de gránulos en formación en ese conjunto de datos. Por el contrario, para este conjunto de datos, a causa de la mejor resolución de GREGOR, no se encontraron los mencionados gránulos pequeños o fragmentos de gránulos.

4.2. Velocidad de Puntos Magnéticos Brillantes

Uno de los parámetros dinámicos que se busca establecer en la presente investigación es la velocidad de los MBPs, en términos de: ¿cómo es su distribución?, ¿es igual la distribución de la velocidad y de sus componentes x e y ? y finalmente ¿cuál es el valor promedio de la velocidad de un MBP? A continuación, se describirá el proceso del cálculo de la velocidad de los MBPs con el fin de dar respuesta a estas preguntas.

Conjunto de datos I

El primer paso para calcular la velocidad horizontal de un MBP es determinar la posición de su baricentro de brillo:

$$\vec{r}_b = \frac{\sum_i I_i \vec{r}_i}{\sum_i I_i} \quad (4-5)$$

donde, I_i es la intensidad del píxel i y \vec{r}_i la posición del píxel i .

Este cálculo se debe realizar para la coordenada x y para la coordenada y :

$$\vec{x}_b = \frac{\sum_i I_i \vec{x}_i}{\sum_i I_i} \quad (4-6)$$

$$\vec{y}_b = \frac{\sum_i I_i \vec{y}_i}{\sum_i I_i} \quad (4-7)$$

En seguida, se corrige en las imágenes del conjunto de datos I el movimiento del satélite (Hinode presenta pequeños movimientos en x y en y). Esto se realiza con la función *cross_corr* de IDL que utiliza una técnica de correlación cruzada para calcular las compensaciones entre una imagen y otra, las cuales posteriormente deben ser sustraídas. Posterior a esto, se calcula la distancia recorrida por el baricentro de brillo de cada MBP (conociendo su posición en x y en y en dos imágenes consecutivas) con la ecuación:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4-8)$$

Donde:

x_1 es la posición en x del MBP en la imagen 1, y x_2 su posición x en la imagen 2.

y_1 es la posición en y del MBP en la imagen 1, y y_2 su posición y en la imagen 2.

En este punto, se debe establecer el radio en el cual se va a realizar el seguimiento de los MBPs para luego calcular su velocidad. Es decir, se debe fijar una distancia máxima en la cual dos MBPs (en imágenes consecutivas) serán considerados el mismo elemento pero

desplazado cierto número de píxeles. Lo anterior se realiza analizando el histograma de velocidades de los MBPs y ajustando la distancia de tal manera que la distribución obtenga la mejor tendencia. De la literatura se sabe que la distribución de velocidades tiene un ajuste Rayleigh. Se encuentra que para una distancia máxima de 1 píxel el histograma que se obtiene está cortado en velocidades pequeñas. Por su parte, para dos píxeles se encuentra una distribución suave y finalmente para tres píxeles aparecen conexiones falsas entre MBPs (una cola al final del histograma).

Además, el histograma de velocidades muestra un máximo valor de 5 kms^{-1} , que en 30 segundos (resolución temporal) es equivalente a un desplazamiento máximo de 150 km o aproximadamente 2 píxeles. Por lo tanto, se establece que si un MBP está dentro de una distancia igual o menor a 2 píxeles respecto a otro MBP, estos dos son el mismo elemento en dos imágenes diferentes.

El siguiente paso es medir la velocidad en la dirección x y en la dirección y , para luego calcular la velocidad efectiva con la ecuación:

$$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2} \quad (4-9)$$

Finalmente, con esta información se elabora el histograma de frecuencias de la velocidad de los MBPs para el conjunto de datos I. Este es presentado en la figura **4-18** junto con un ajuste a una función Rayleigh (en rojo) y sus dos componentes (en verde). El valor de la velocidad media para la primera componente, que representa el 49 % de la distribución total, es $\mu = 2,3 \text{ kms}^{-1}$. La segunda componente cuenta con un valor medio $\mu = 1,1 \text{ kms}^{-1}$ y representa el 51 % de la distribución total. El parámetro de ajuste μ es mostrado en la tabla **4-9**.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Rayleigh componente I	2,3	49
Distribución Rayleigh componente II	1,1	51

Tabla 4-9.: Parámetro de ajuste μ para la velocidad del conjunto de datos I.

Cada una de las dos componentes en color verde de la figura **4-18** representa una población de MBPs que se caracterizan por poseer diferentes rangos de velocidad. La primera componente de esta distribución se caracteriza por tener una velocidad cuyo rango está en 0 a 5 kms^{-1} , y sus MBPs forman parte de un grupo levemente menos numeroso de elementos. Por su parte, la segunda componente indica que hay una población de MBPs cuya velocidad está

en el rango de 0 a 2 kms^{-1} , pero son mayores en número. Se considera que el primer grupo de MBPs, debido a sus mayores valores de velocidad, podría tener un campo magnético débil que permite el movimiento rápido de esta población. Por su parte, el segundo grupo posiblemente tiene un campo más fuerte que inhibe que sus MBPs se muevan más rápidamente.

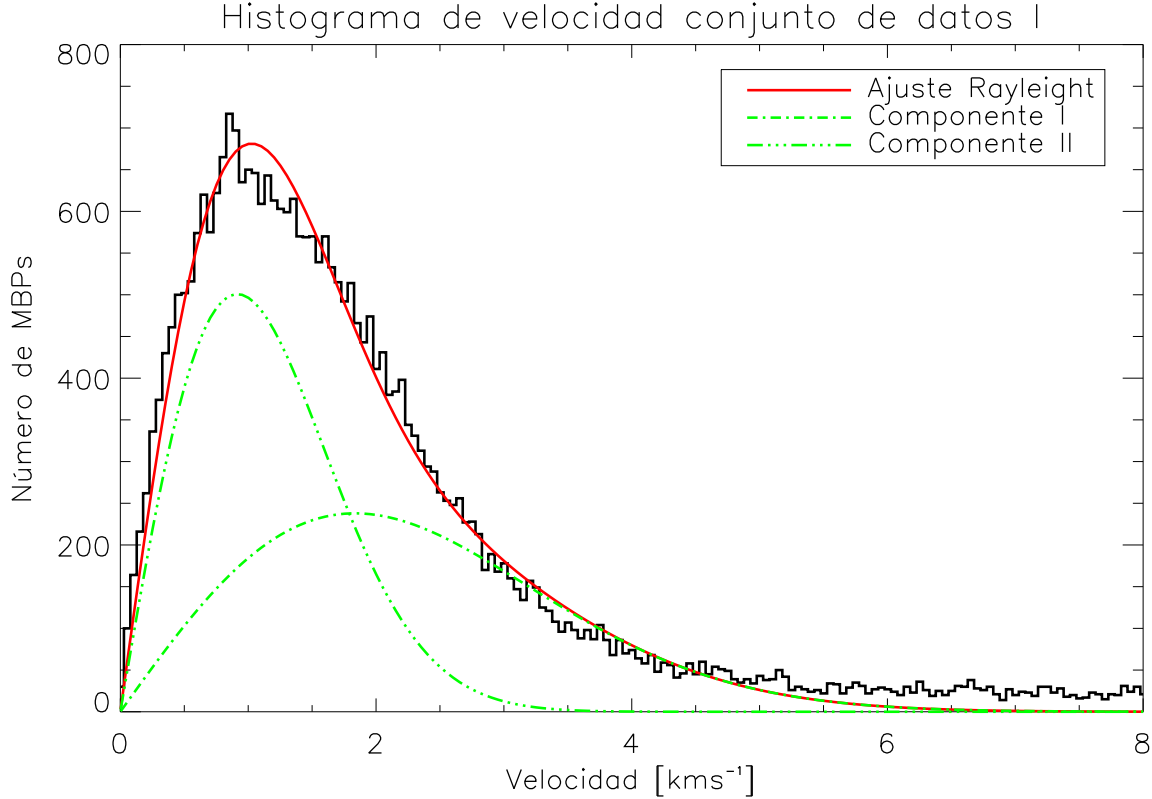


Figura 4-18.: Distribución de la velocidad de los MBPs junto con un ajuste Rayleigh (en rojo) y sus dos componentes (en verde).

Los resultados de la velocidad de los MBPs hasta aquí presentados (ver tabla 4-9) concuerdan con los valores promedio encontrados por otros estudios, que establecen valores entre 1 - 2 kms^{-1} para una resolución espacial de 0,108 arcseg/px (Utz et al., 2009b), 0,890 kms^{-1} para una resolución espacial de 0,071 arcseg/px (Nisenson et al., 2003) y 1,1 kms^{-1} para una resolución espacial de 0,17 arcseg/px (Möstl et al., 2006).

Esta distribución sigue el ajuste Rayleigh:

$$f(x, \sigma) = \frac{x e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)}}{\sigma^2} \quad (4-10)$$

Por su parte, el valor medio de esta distribución y la varianza son:

$$E(X) = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (4-11)$$

$$\text{var}(X) = \sqrt{\frac{4 - \pi}{2}} \sigma^2 \quad (4-12)$$

A diferencia de la velocidad, sus componentes muestran una distribución Gaussiana. Las figuras 4-19 y 4-20 muestran el histograma de frecuencias de la velocidad x e y de los MBPs, respectivamente, con ajuste a una curva normal en color rojo y sus dos componentes en color verde. Se ubicó una línea recta azul en el valor de velocidad igual a cero para mayor claridad.

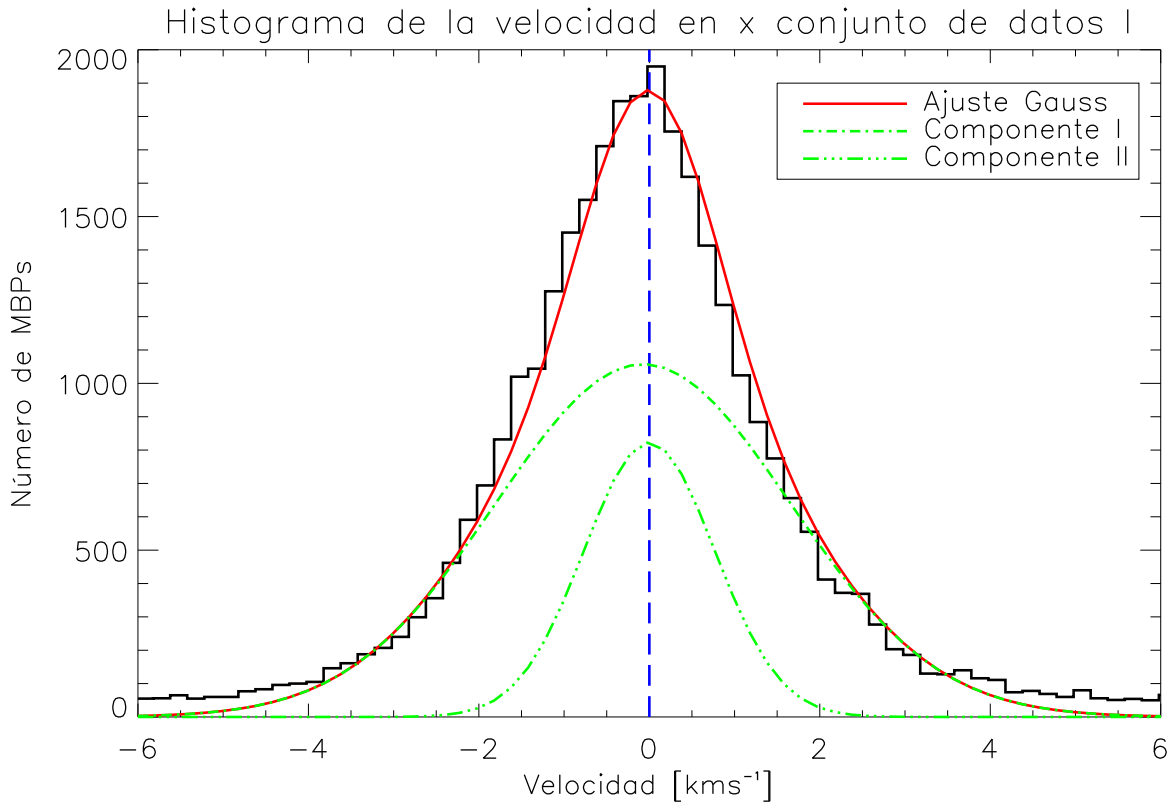


Figura 4-19.: Distribución de la velocidad en x con ajuste Gaussiano en color rojo y en color verde sus dos componentes. La línea recta vertical se ubicó en una velocidad igual a cero.

Los valores medios de la velocidad en x son $\mu = -0,063 \pm 1,7 \text{ kms}^{-1}$ para su primera componente, la cual representa el 76% de la totalidad y $\mu = -0,00007 \pm 0,7 \text{ kms}^{-1}$ para la segunda componente que representa el 24% de la distribución total. Esta información se

resume en la tabla 4-10.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Gauss componente I	-0,063	1,7	76
Distribución Gauss componente II	-0,00007	0,7	24

Tabla 4-10.: Parámetros de ajuste σ y μ para la componente x de la velocidad del conjunto de datos I.

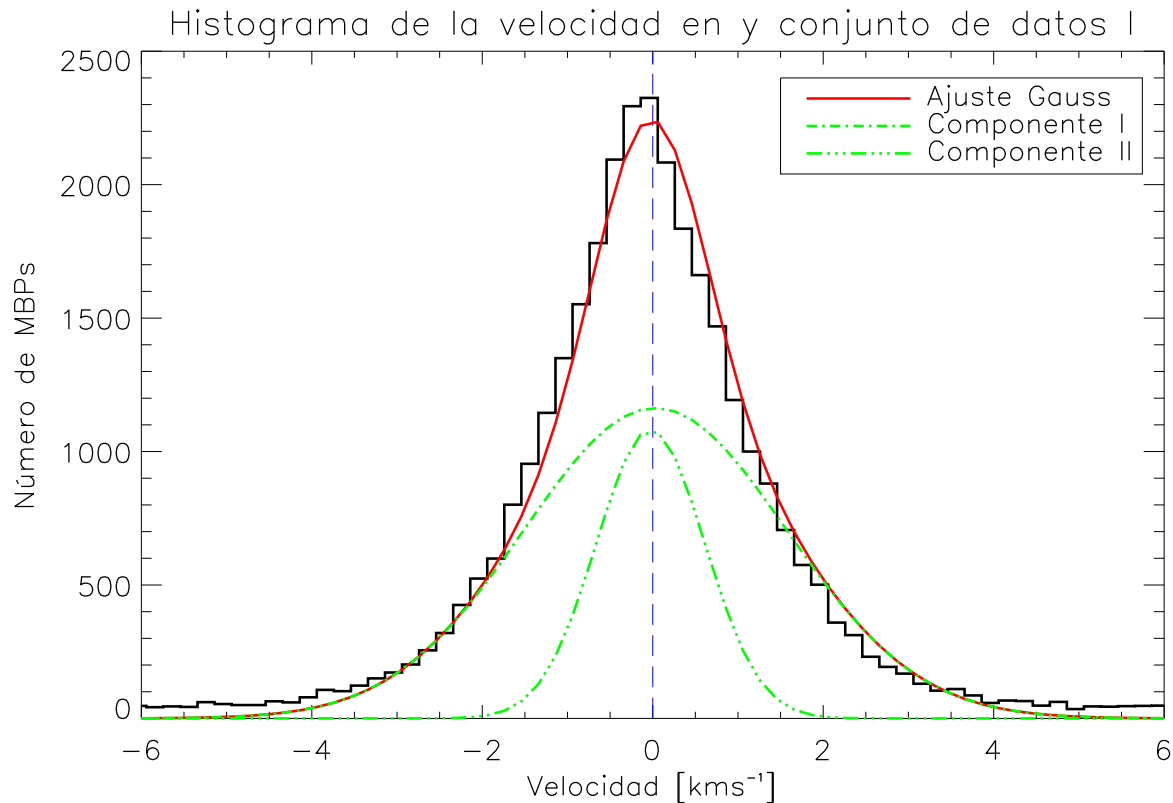


Figura 4-20.: Distribución de la velocidad en y con ajuste Gaussiano (rojo) y sus dos componentes (verde). La línea punteada vertical se ubicó como referencia en un valor de velocidad igual a cero.

Nuevamente, las dos componentes de esta distribución indican que existen dos poblaciones de MBPs que se caracterizan por poseer diferentes rangos de velocidad en la componente x . La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs, los cuales poseen una velocidad en x cuyo rango está en -5 a 5 kms⁻¹ y son más numerosos. Por su

parte, la segunda componente indica que hay una población de MBPs cuya velocidad en x está en el rango de -2 a 2 kms^{-1} pero son menores en número.

Por su parte, para la velocidad y , el valor medio es $\mu = 0,024 \pm 1,5 \text{ kms}^{-1}$ para su primera componente (73% de la totalidad) y $\mu = -0,024 \pm 0,6 \text{ kms}^{-1}$ para su segunda componente (27% de la distribución total), estos datos son presentados en la tabla 4-11. En las figuras 4-19 y 4-20 se puede ver que tanto la velocidad en x como la velocidad en y presentan el mismo patrón de distribución para sus dos componentes.

Descripción	Media (μ) [kms^{-1}]	Desviación estándar (σ) [kms^{-1}]	Parámetro de peso [%]
Distribución Gauss componente I	0,024	1,5	73
Distribución Gauss componente II	-0,024	0,6	27

Tabla 4-11.: Parámetros de ajuste σ y μ para la componente y de la velocidad del conjunto de datos I.

De nuevo, las dos componentes de esta distribución indican que existen dos poblaciones de MBPs que se caracterizan por poseer diferentes rangos de velocidad en la componente y . La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs, los cuales poseen una velocidad en y cuyo rango está en -5 a 5 kms^{-1} y son mayores en número. Por su parte, la segunda componente indica que hay una población de MBPs cuya velocidad en y está en el rango de -2 a 2 kms^{-1} pero son menores en cantidad.

En resumen los MBPs presentan velocidades horizontales y verticales (en el plano del disco solar), es decir, estos elementos tuvieron en promedio una componente de velocidad y/o otra a lo largo de su vida. Además, se puede decir que los MBPs se mueven hacia adelante y hacia atrás o que unos van a la derecha y que otros van a la izquierda. Como se puede observar en las figuras 4-19 y 4-20 en el valor cero de velocidad se encuentra un número considerable de MBPs, esto indica que ciertos MBPs no tienen movimiento en una u otra dirección.

Lo anterior indica que los MBPs poseen una trayectoria aleatoria y un movimiento similar al movimiento browniano (ver sección 4,5) en el cual las componentes de la velocidad son de naturaleza Gaussiana. Teóricamente si las componentes de la velocidad son normales, la velocidad es de tipo Rayleigh, de acuerdo con:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4-13)$$

Donde x y y son distribuciones normales (las componentes de la velocidad).

El ajuste Gaussiano presentado en los últimos resultados sigue la distribución:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4-14)$$

Donde μ es el valor medio de esta distribución y σ es la desviación estándar.

Con el ánimo de constatar lo mencionado en el análisis de los últimos resultados, en la figura **4-21** se muestra la dispersión de velocidades tanto en x como en y , en la cual se evidencia una concentración destacada en el centro de la gráfica. En esta figura, se aprecian las dos componentes ya mencionadas tanto para la velocidad en x como para la velocidad en y . La primera componente para la velocidad x muestra cierto número de elementos alrededor del rango -2 a 2 kms^{-1} y también muestra un mayor número de elementos en los valores en el rango entre -5 kms^{-1} y 5 kms^{-1} .

De la misma manera, la velocidad en y muestra una primera componente o población de MBPs (en menor cantidad) cuyo rango de velocidad está en -2 a 2 kms^{-1} y una segunda población de MBPs, de mayor cantidad, con velocidades en el rango de -5 kms^{-1} a 5 kms^{-1} .

Por su parte, la figura **4-22** muestra la misma información, pero esta vez en tres dimensiones permitiendo ver el número de elementos con cierto valor de velocidad (V_x, V_y). Se puede ver que alrededor de 50 MBPs tienen velocidades en el rango aproximado de -2 a 2 kms^{-1} tanto en la componente x como y .

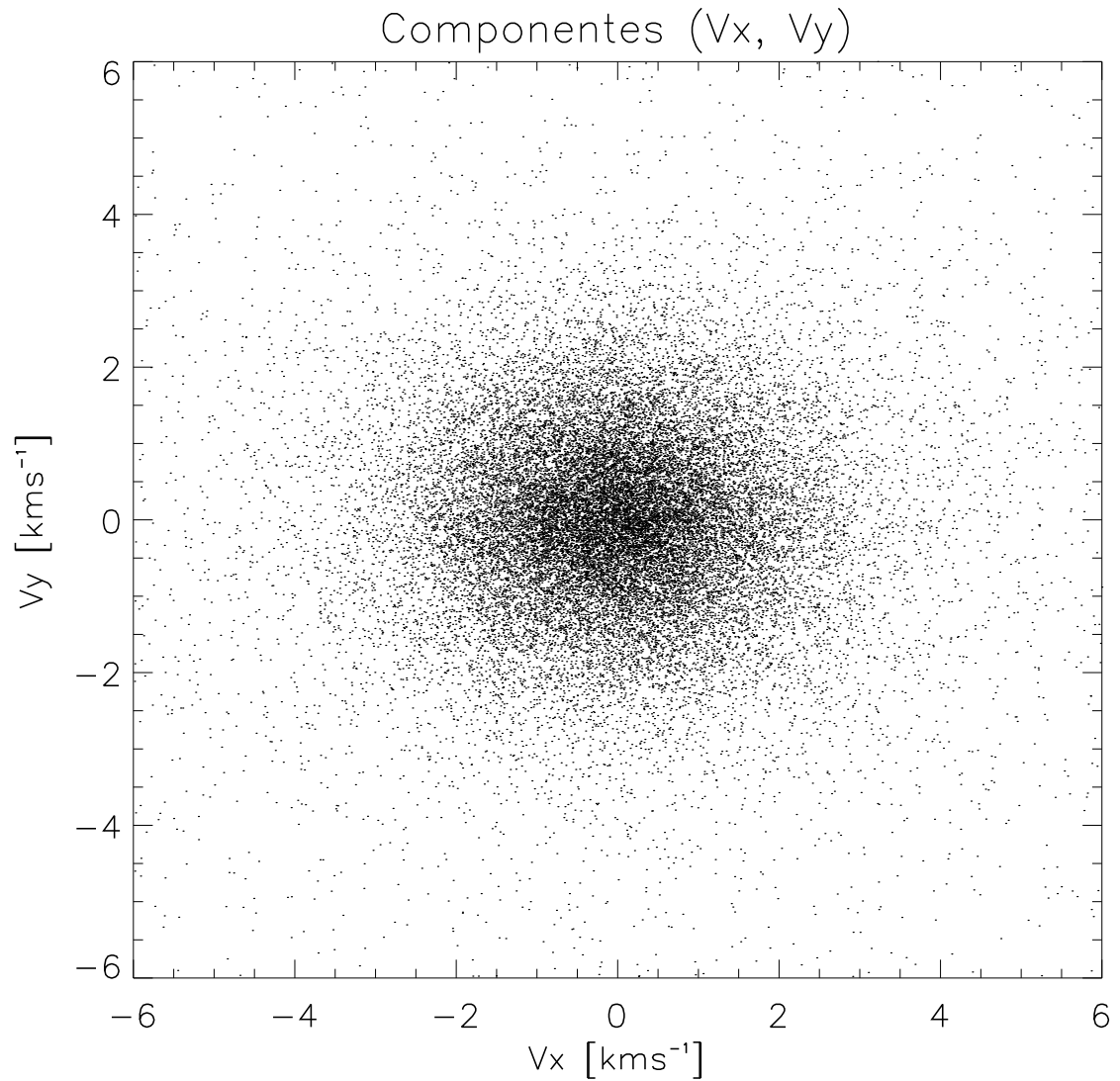


Figura 4-21.: Gráfica de dispersión de la velocidad en x e y . Se puede ver que el rango en el cual está el mayor número de MBPs es -5 a 5 kms^{-1} en la componente x y también de -5 a 5 kms^{-1} en la componente y .

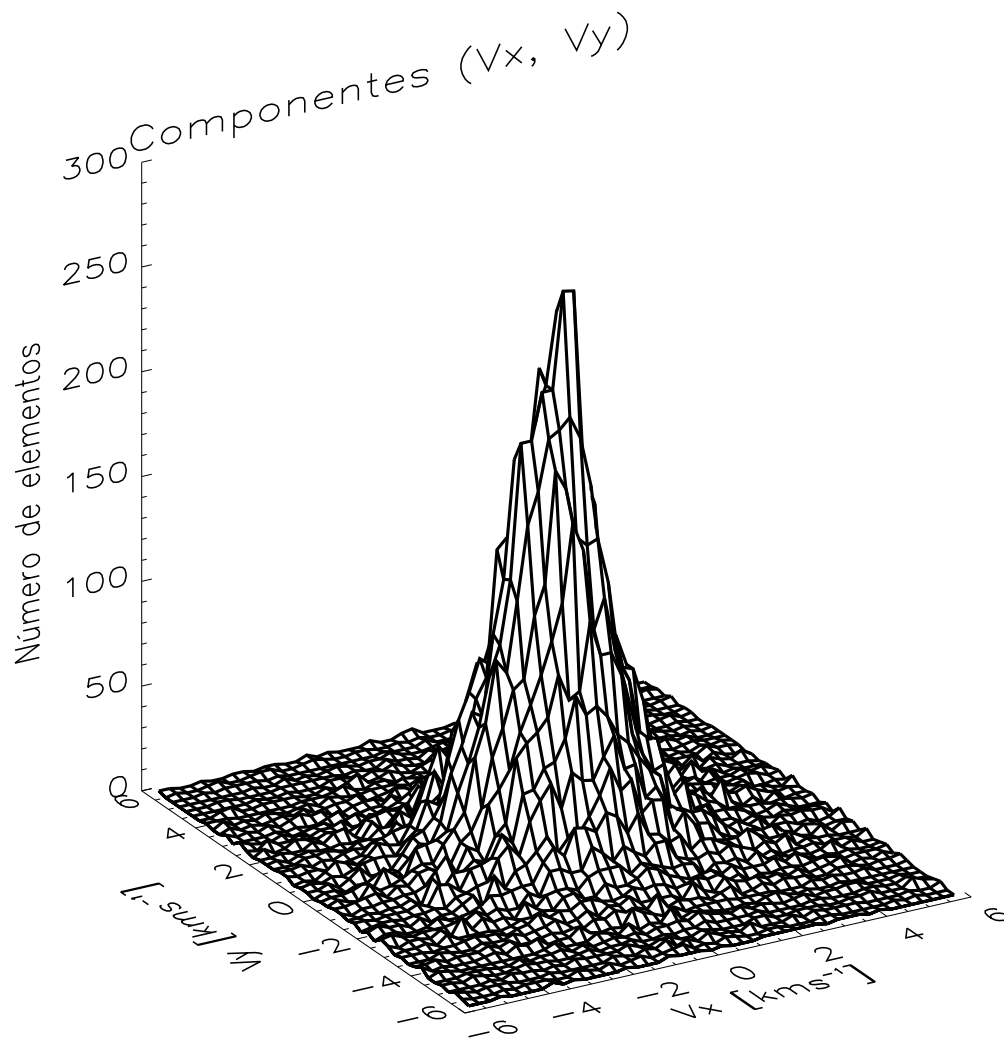


Figura 4-22.: Distribución de velocidades (ver figura 4-21) en tres dimensiones incluyendo el número de elementos para cada valor de velocidad (V_x, V_y). Se puede ver que alrededor de 50 MBPs tienen velocidades en el rango aproximado de -2 a 2 kms^{-1} tanto en la componente x como y .

Conjunto de datos II

En lo que sigue se realizará un análisis, similar al anterior, pero para el conjunto de datos II. El radio de búsqueda de MBPs se estableció en 13 píxeles siguiendo el mismo criterio mencionado para el conjunto de datos I y con el fin de ampliar el histograma de velocidad, y establecer los valores de velocidad con valor mínimo de MBPs. Paralelamente, se determinó la posición de los centros de brillo de los MBPs y se realizó su rastreo para establecer su

velocidad conociendo la distancia que recorrieron en un tiempo igual a la cadencia de las imágenes (5 segundos).

Una vez se conocen las velocidades de los MBPs se elabora el histograma de frecuencias presentado en la figura 4-23, que sigue una distribución Rayleigh (línea roja), en color verde se muestran sus dos componentes. El valor medio encontrado para la primera componente de la distribución (67% de la totalidad) es $\mu = 7,5 \text{ kms}^{-1}$ y para la segunda componente (33% de la totalidad) es $\mu = 1,9 \text{ kms}^{-1}$ (ver tabla 4-12). No es sorprendente que para este conjunto de datos se obtengan valores mayores de velocidad, ya que se espera que a mayor resolución del telescopio las velocidades medidas sean mayores.

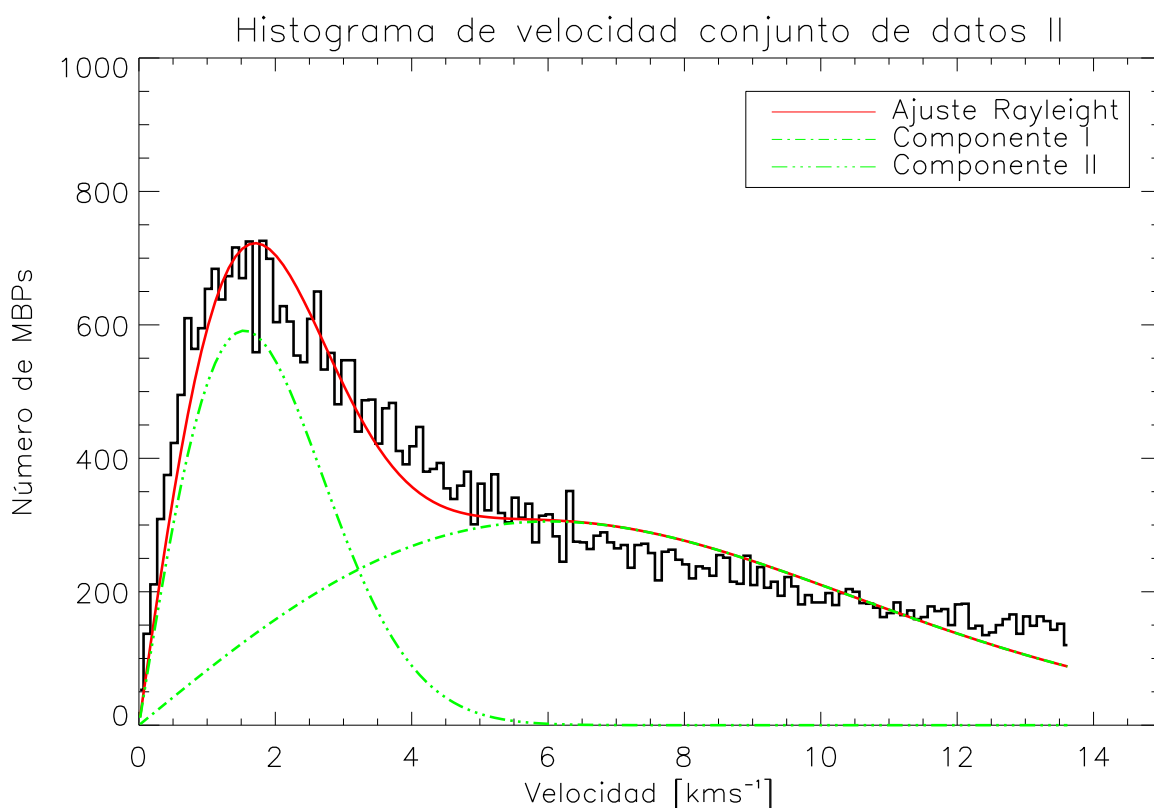


Figura 4-23.: Distribución de dos componentes de la velocidad con ajuste Rayleigh (rojo) y las dos componentes de la distribución (verde).

Como se ha visto en los resultados anteriores, esta distribución también presenta dos componentes, cada una de las cuales representa dos poblaciones de MBPs. La primera de estas representa un población de MBPs cuya velocidad se encuentra en el rango de 0 a 12 kms^{-1} los cuales son más numerosos. De igual manera, la componente número dos representa una

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Rayleigh componente I	7,5	67
Distribución Rayleigh componente II	1,9	33

Tabla 4-12.: Parámetro de ajuste μ para la velocidad del conjunto de datos II.

población de MBPs con una velocidad en el rango de 0 a 4 kms⁻¹. Se sugiere que el primer grupo de MBPs posee un campo magnético débil por su velocidad mayor, a diferencia del segundo grupo que podrían tener un campo más fuerte.

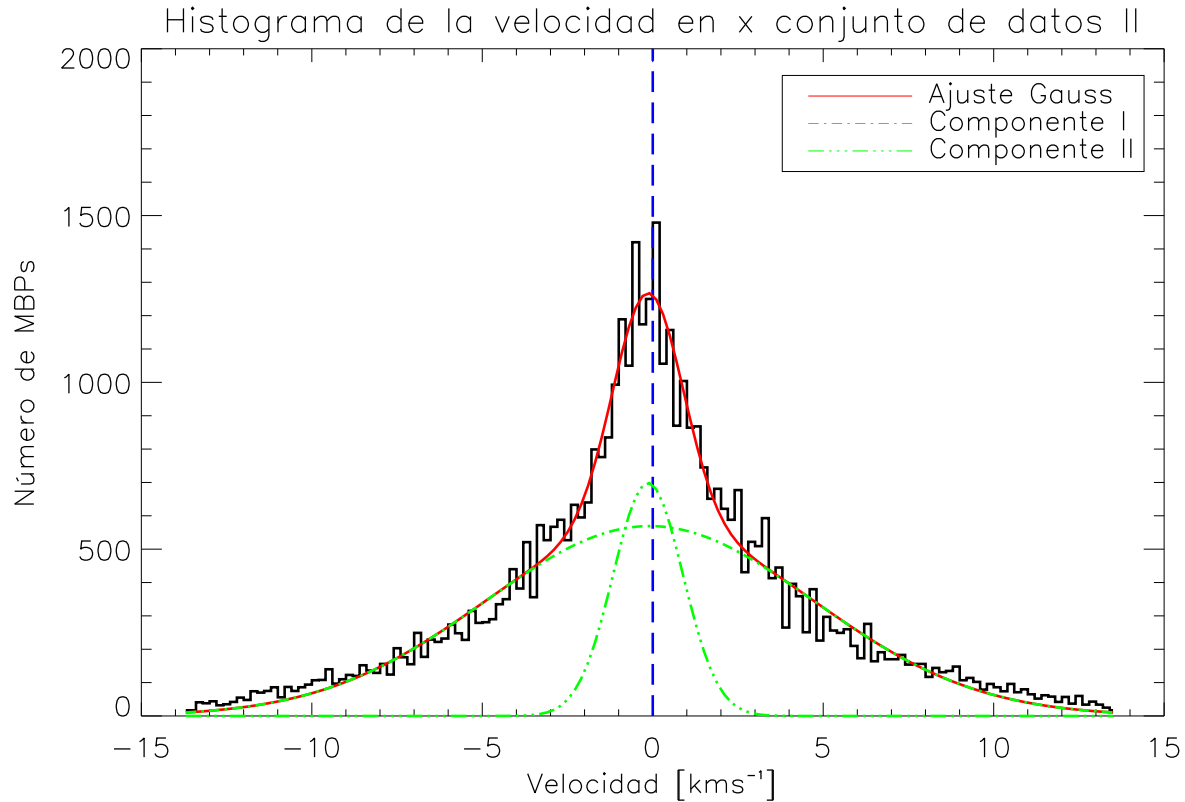


Figura 4-24.: Distribución de la velocidad en x con ajuste Gauss (rojo) y sus dos componentes (verde).

De manera similar al conjunto de datos I, el conjunto de datos II presenta para las componentes de la velocidad x e y ajustes a una distribución Gaussiana, como se muestra en las figuras 4-24 y 4-25 respectivamente, junto con sus dos componentes en color verde. Para el caso de la velocidad en x el valor medio encontrado es $\mu = -0,009 \pm 4,8$ kms⁻¹ para la

componente número uno con un 80 % de la distribución total. Por su parte, la componente número dos presenta un valor medio $\mu = -0,14 \pm 1 \text{ kms}^{-1}$ con una contribución del 20 % de la totalidad (ver tabla **4-13**).

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución normal componente I	-0,009	4,8	80
Distribución normal componente II	-0,14	1	20

Tabla 4-13.: Parámetros de ajuste σ y μ para la componente x de la velocidad del conjunto de datos II.

La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs cuya componente x de la velocidad se encuentra en el rango de -14 a 14 kms⁻¹ y se caracterizan por ser mucho más numerosos. En cuanto a la segunda, de igual manera, representa una población de MBPs cuyo rango de velocidad x está entre -3 y 3 kms⁻¹ y se caracterizan por ser menores en cantidad.

Análogamente, la componente y de la velocidad presenta una distribución con ajuste Gaussiano en color rojo (ver figura **4-25**) con valor medio para su primera componente $\mu = -0,08 \pm 5,7 \text{ kms}^{-1}$ para el 63 % de la distribución y $\mu = -0,03 \pm 1,4 \text{ kms}^{-1}$ para la segunda componente con el 37 % de la distribución total. Lo anterior se muestra en la tabla **4-14**.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución normal componente I	-0,08	5,7	63
Distribución normal componente II	-0,03	1,4	37

Tabla 4-14.: Parámetros de ajuste σ y μ para la componente y de la velocidad del conjunto de datos II.

La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs cuya componente y de la velocidad se encuentra en el rango de -14 a 14 kms⁻¹ y se caracterizan por ser más numerosos. En cuanto a la segunda, de igual manera, representa una población de MBPs cuyo rango de velocidad y está entre -3 y 3 kms⁻¹ y se caracterizan por ser mucho menores en cantidad. Lo anterior indica que la velocidad en x como la velocidad en y presentan patrones de distribución para sus dos componentes muy similares, como se evidencia en las figuras **4-24** y **4-25**.

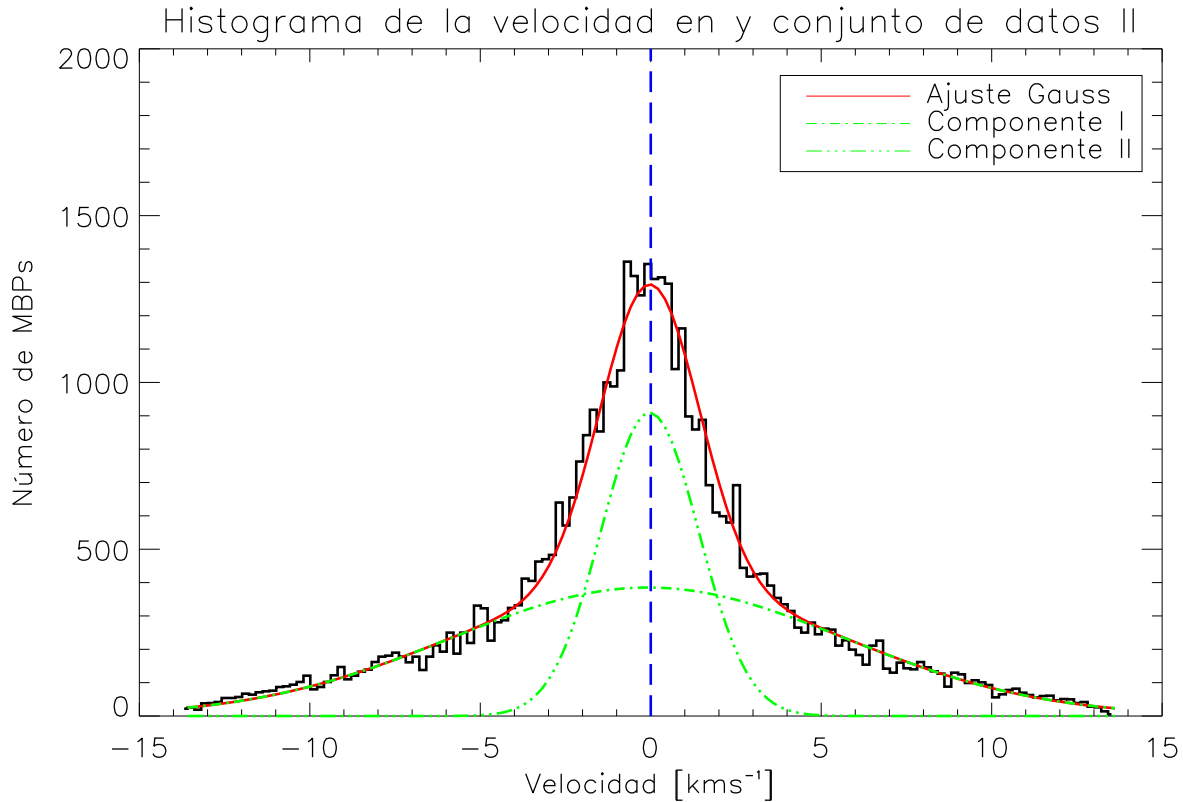


Figura 4-25.: Distribución de la velocidad en y con ajuste Gauss (rojo) y sus dos componentes (verde).

Finalmente, se presenta en las figuras 4-26 y 4-27 la gráfica de dispersión de las dos componentes x y y junto con su representación en tres dimensiones respectivamente. La primera permite visualizar los rangos de velocidad mencionados. Por ejemplo, para la componente x se puede ver cierto número de elementos en el rango de -3 a 3 kms⁻¹ y otra población un poco menos numerosa de MBPs cuyo rango de velocidad x está entre -6 y 6 kms⁻¹.

De otro lado, en cuanto a la componente y se observa un grupo de MBPs no muy numeroso con rangos de velocidad de -6 kms⁻¹ a 6 kms⁻¹, y otro grupo de MBPs con rango de velocidad de -3 y 3 kms⁻¹ muy numerosos. La figura (4-27) permite visualizar el número de elementos que poseen cierto valor de velocidad (V_x , V_y). Se puede ver que alrededor de 50 MBPs tienen una velocidad de -1 a 2 kms⁻¹ en la componente x .

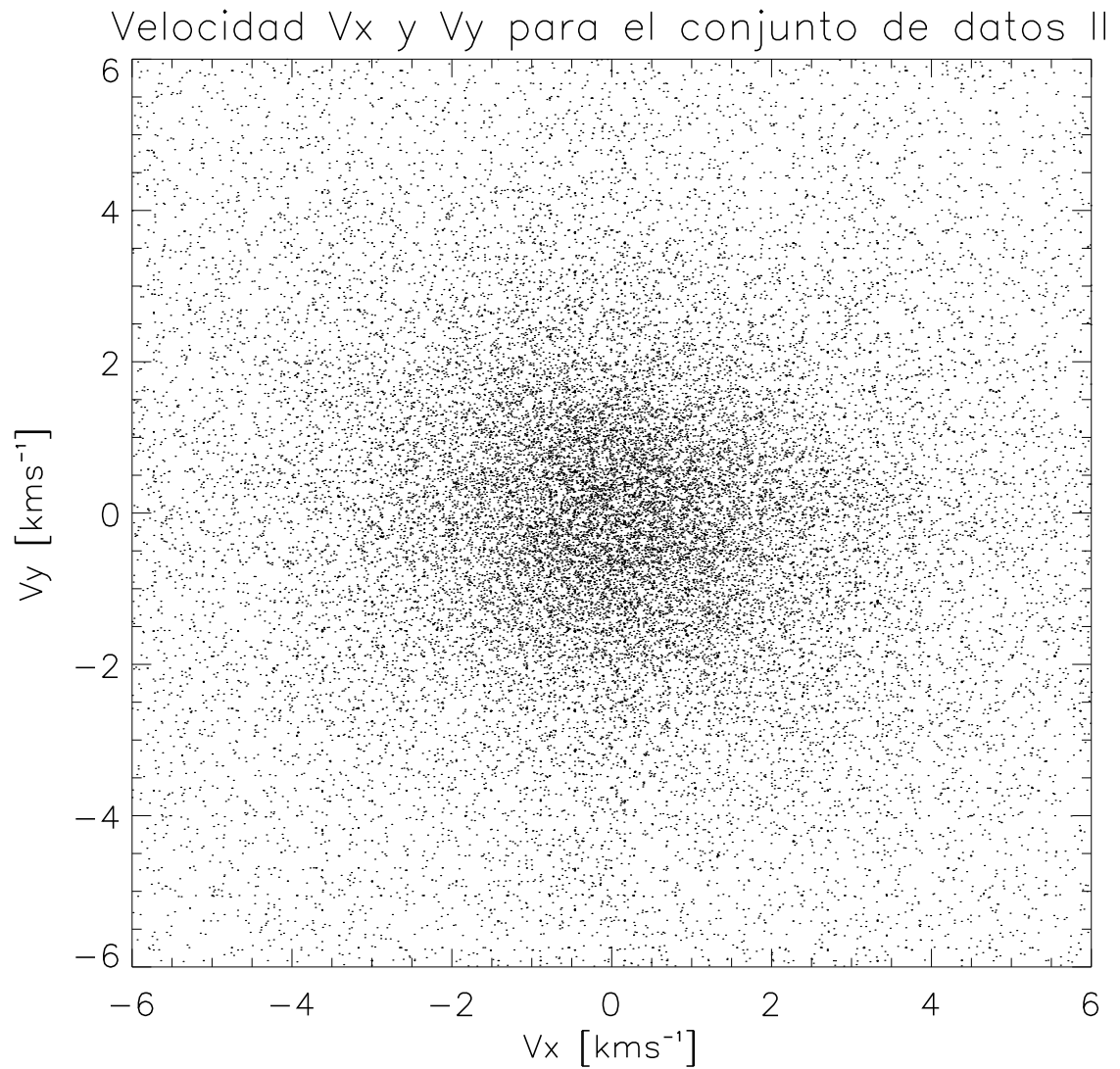


Figura 4-26.: Gráfica de dispersión de la velocidad (V_x, V_y). Se puede ver que el rango en el cual está el mayor número de MBPs es aproximadamente -3 a 3 kms^{-1} tanto en la componente x como y .

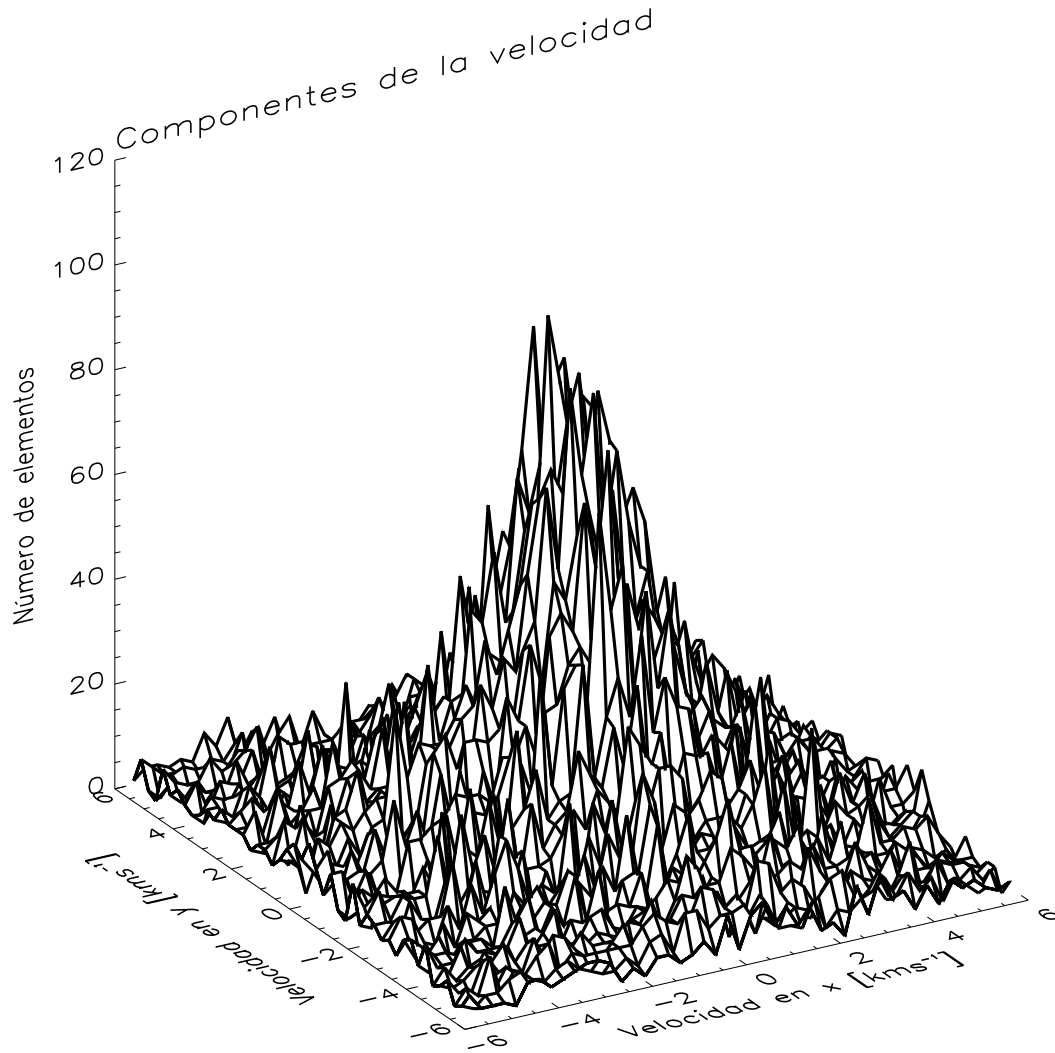


Figura 4-27.: Imagen 4-26 en tres dimensiones. Se puede ver que alrededor de 50 MBPs tienen velocidades en el rango de -1 a 2 kms^{-1} en la componente x .

Es importante mencionar que la velocidad medida de los MBPs está influenciada por el instrumento utilizado, debido a que al calcular la trayectoria entre dos coordenadas de un mismo elemento, esta depende del tamaño del píxel utilizado o la resolución espacial, es decir, a mejor resolución, aumenta la precisión en la velocidad medida. Por lo tanto la velocidad estimada en el caso del telescopio GREGOR es más precisa que la estimada para el satélite Hinode dada la resolución espacial más alta para el primero.

En la siguiente sección, se realizará una breve descripción de la evolución de diferentes parámetros dinámicos de algunos MBPs, tales como la variación de su intensidad (curvas de

luz) y la variación de su diámetro en el tiempo junto con la forma que sigue su trayectoria.

4.3. Curvas de luz de los Puntos Magnéticos Brillantes

A continuación se presenta en la figura 4-28 la variación en el tiempo de la intensidad de brillo de seis MBPs a lo largo de ocho imágenes consecutivas. Los valores de intensidad están normalizados al valor medio de la intensidad del Sol en calma (todo el FOV). Como se puede ver en la figura, el brillo muestra un comportamiento oscilatorio en un rango entre aproximadamente un 10% por encima y por debajo del valor medio establecido (intensidad=1). Durante la mayor parte de su tiempo de vida los MBPs alcanzan valores de intensidad por encima del valor medio establecido. Una posible explicación a estas variaciones tiene en cuenta la unión (coalescencia) y separación (fragmentación) de los MBPs, como lo afirma Liu et al. (2018), estableciendo que el brillo de un MBP aumenta cuando este se une a otros MBPs vecinos y disminuye cuando un MBP laminal (alargado) sufre la división en MBPs más pequeños.

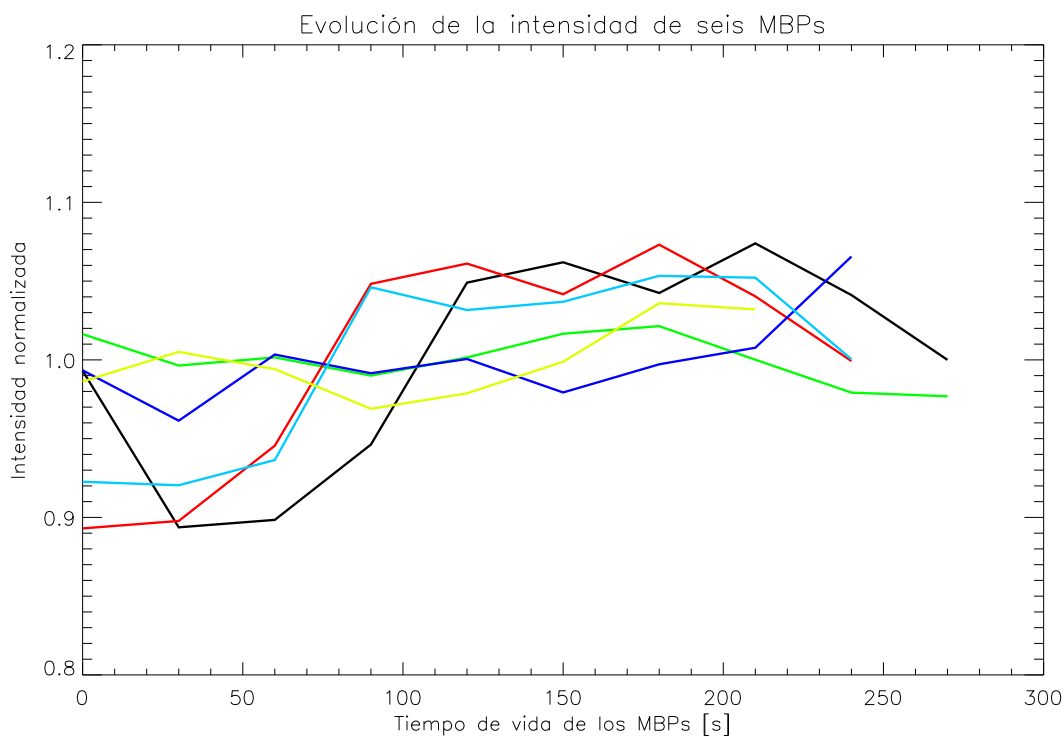


Figura 4-28.: Curva de luz de seis MBPs (diferentes colores para cada uno) del conjunto de datos I con valores de intensidad normalizados al valor medio del Sol en calma. El tiempo de vida medio de estos elementos magnéticos corresponde a una secuencia de ocho imágenes.

4.4. Evolución del tamaño de los Puntos Magnéticos Brillantes

De la misma manera, el diámetro de un MBP muestra un comportamiento oscilatorio (ver figura 4-29) que eventualmente, puede estar relacionado con las variaciones en su brillo. Una posible explicación a este comportamiento se relaciona con el hecho de que a lo largo de la vida del MBP existen variaciones en el flujo magnético que pueden generar las ya mencionadas fragmentaciones o uniones de MBPs, y que serían responsables de generar cambios en el tamaño de los mismos; dos MBPs se pueden unir para formar uno más grande, o un MBP se puede separar en dos cuyos tamaños sean más pequeños. Cabe resaltar que este trabajo no se centra en la física de la unión y fragmentación de MBPs, ya que estos comportamientos complejos, que deben ser estudiados en detalle, están fuera de los objetivos planteados y alcance de este trabajo.

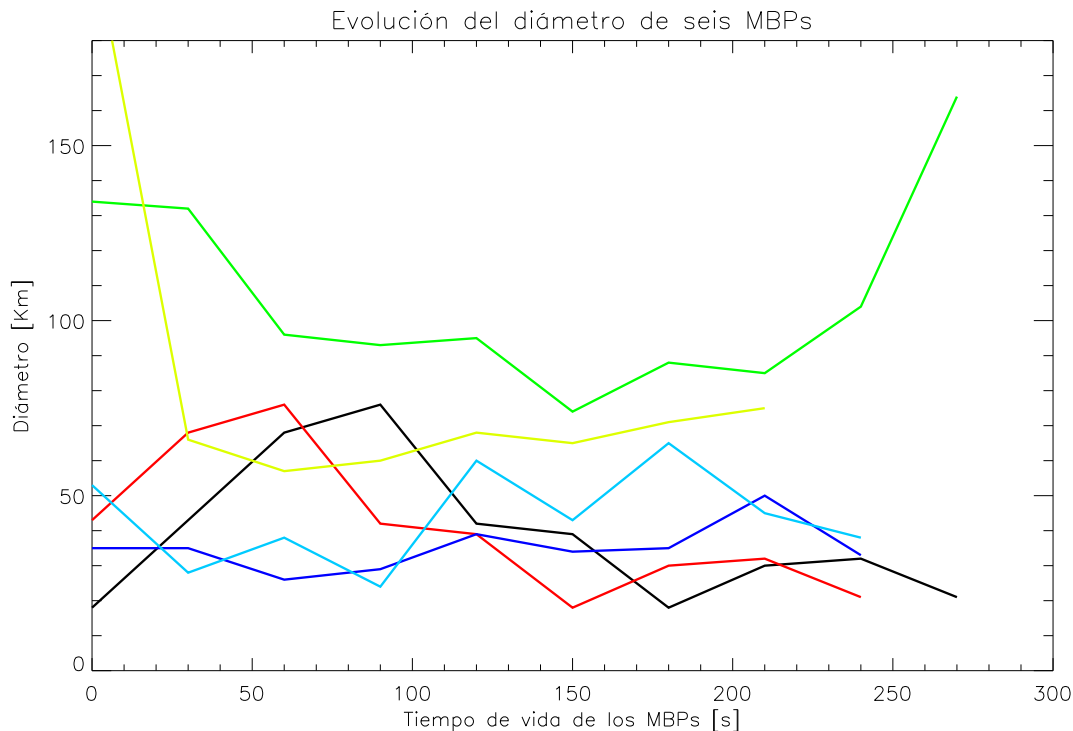


Figura 4-29.: Evolución del tamaño de seis MBPs (diferentes colores para cada uno) del conjunto de datos I.

De aquí, se puede concluir que la vida de un MBP es muy dinámica, ya que no se observa una estabilidad ni en su brillo ni en su diámetro. Lo anterior se puede explicar por causa de las variaciones en flujo del campo magnético, a lo largo del tiempo de vida del MBP, provocadas por la dinámica solar.

4.5. Trayectoria de los Puntos Magnéticos Brillantes

Finalmente, en la figura 4-30 se presenta el camino seguido por cuatro MBPs, el cual evidencia que estos elementos magnéticos tienen un movimiento complejo de ida y vuelta con desplazamientos en las direcciones x y y , evidenciando un comportamiento aleatorio análogo al movimiento browniano. El símbolo * en la figura señala el punto de partida del MBP.

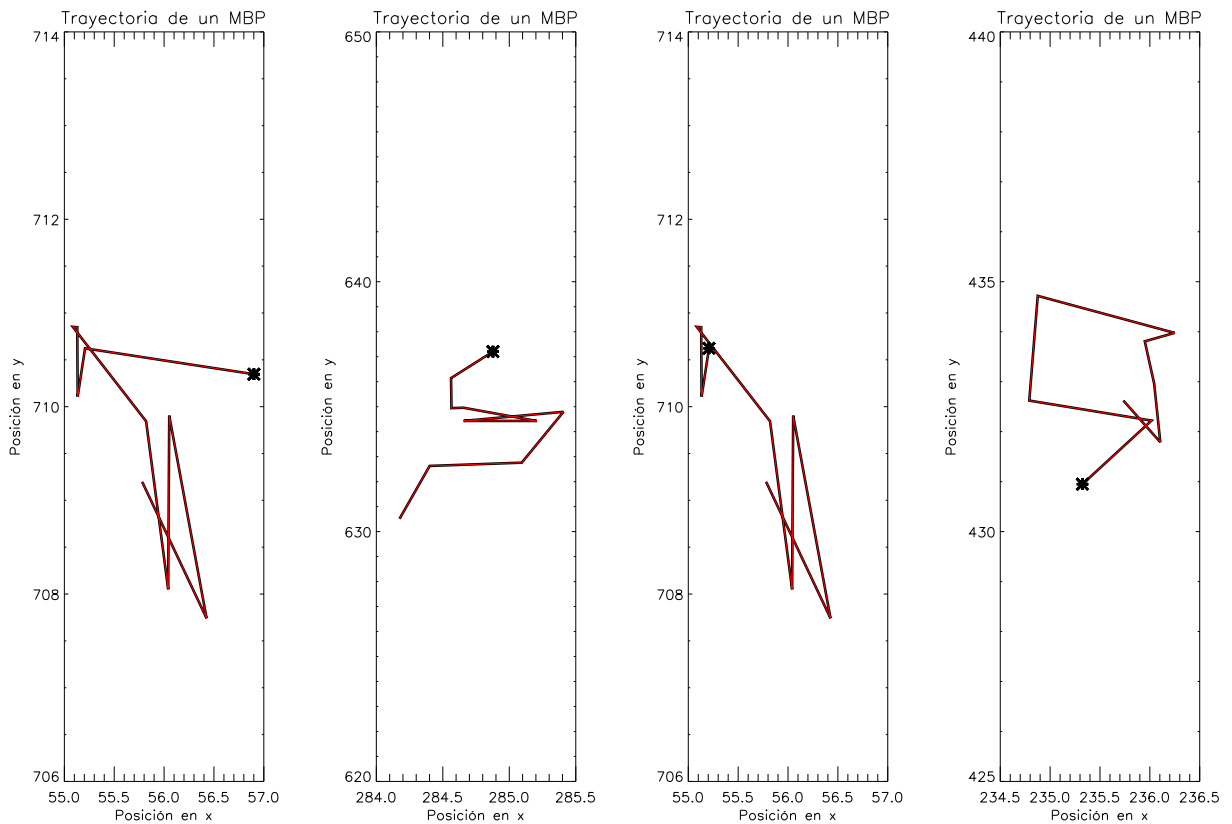


Figura 4-30.: Camino seguido por cuatro MBPs del conjunto de datos I. El símbolo * señala el punto de partida del MBP.

5. Conclusiones y discusión

En la presente investigación se realizó el estudio de la dinámica de MBPs sobre la fotosfera solar de dos zonas cercanas al centro del disco del Sol, utilizando observaciones de un telescopio solar en tierra y otro espacial, específicamente empleando los instrumentos HiFI/GREGOR y SOT/Hinode, respectivamente. Se encontraron valores para el tamaño, diámetro y velocidad de los MBPs sin precedentes, como consecuencia directa de la excelente resolución espacial de las observaciones. Los resultados de la caracterización de parámetros físicos de los MPBs se corresponden con otros encontrados en investigaciones previas.

Los hallazgos más importantes de la presente investigación están relacionados con la distribución para el tamaño, el diámetro y la velocidad de los MBPs. Los resultados obtenidos con los dos conjuntos de datos observacionales muestran, tanto para el área como para el diámetro, una distribución logarítmica normal de dos componentes, cada una de las cuales representa una población de estructuras solares. Por su parte, los resultados de velocidad dan cuenta de una distribución Rayleigh, también de dos componentes, que representan dos poblaciones de MBPs.

Para el conjunto de datos I (SOT/Hinode) se encontró, en los resultados de área y diámetro, una población de MBPs y otra de pequeños gránulos. Por su parte, en los resultados de velocidad se encontraron dos poblaciones de MBPs. De manera similar, para el conjunto de datos II (HiFI/GREGOR) se encontraron dos poblaciones de MBPs tanto para los resultados de área y diámetro como para los de velocidad.

Para el primer conjunto de datos, cuya resolución espacial es de $0,108''/\text{px}$, se encontró un área promedio de $37000 \cdot | \div 1,7 \text{ km}^2$ para los MBPs y de $115000 \cdot | \div 1,2 \text{ km}^2$ para los gránulos. Los valores encontrados para el diámetro promedio fueron de $260 \cdot | \div 1,5 \text{ km}$ para los MBPs, y para la población de gránulos $380 \cdot | \div 1,2 \text{ km}$. Por su parte la velocidad horizontal media se estableció en $1,1 - 2,3 \text{ kms}^{-1}$ para cada una de las poblaciones de MBPs.

De otro lado, para el segundo conjunto de datos, con resolución espacial de $0,0286''/\text{px}$, se encontraron dos poblaciones de MBPs cuyas áreas promedios fueron de $4400 \cdot | \div 1,7 \text{ km}^2$ y $15000 \cdot | \div 1,7 \text{ km}^2$ respectivamente, para el diámetro un valor medio de $67 \cdot | \div 1,2 \text{ km}$ para el primer grupo de MBPs y de $99 \cdot | \div 1,5 \text{ km}$ para el segundo, y una velocidad promedio de $1,9 \text{ kms}^{-1}$ y $7,5 \text{ kms}^{-1}$ para cada una de las poblaciones respectivamente.

Estos parámetros dinámicos encontrados para los MBPs se ajustan a estudios previos que profundizan en su caracterización. Específicamente, los valores reportados en la literatura para el área de los MBPs es $7000 - 70000 \text{ km}^2$ y para su diámetro $100 - 300 \text{ km}$ (Utz et al., 2009b). Por su parte, la literatura reporta valores de área para gránulos de 105000 a 2600000 km^2 y de diámetro entre $365 - 1825 \text{ km}$ (Kawaguchi, 1980). En relación a la velocidad horizontal de los MBPs, los estudios de Utz et al. (2009b), Nisenson et al. (2003), Möstl et al. (2006) establecen un rango de $0,890$ a 2 kms^{-1} . Según estos valores reportados en la literatura, los resultados de este trabajo en cuanto al área, el diámetro y la velocidad, se encuentran en los rangos establecidos.

En cuando a los resultados para el conjunto de datos II, es evidente que se encontraron valores de área y diámetro menores a los provenientes del análisis sobre el conjunto de datos I. Este hecho se explica teniendo en cuenta que la resolución de GREGOR es mayor a la de Hinode y, por ende, se logra identificar elementos más pequeños. Este es un resultado sin precedentes ya que nunca antes se había estudiado el tamaño y el diámetro de los MBPs con esta resolución ($0,0286 \text{ ''/px}$). En conclusión, el tamaño de los MBPs depende del instrumento; en el caso de las estructuras más pequeñas, de difícil detección, depende de la resolución espacial del telescopio.

De igual manera, la velocidad medida de los MBPs está influenciada por el instrumento utilizado para la observación, ya que al calcular la trayectoria, entre dos coordenadas de un mismo elemento, esta depende del tamaño del píxel utilizado o la resolución espacial, es decir, a mejor resolución, la velocidad medida es más precisa. Por lo tanto, se puede concluir que la velocidad estimada en el caso del telescopio GREGOR es más precisa que la estimada para el satélite Hinode como consecuencia del valor de resolución más alto del primero.

Adicionalmente, se concluye que la distribución de áreas está influenciada por la definición de tamaño o el criterio empleado (porcentaje de intensidad de corte). Se encontró, para los dos conjuntos, que el mejor porcentaje de corte está en el 80% , porque el tamaño del MBP así calculado es menos dependiente del porcentaje de corte, a diferencia de la definición estándar (50%). Además para el conjunto de datos I, los valores obtenidos para el área y diámetro de MBPs para un porcentaje de corte de 50% son tan grandes, que no representan una población de MBPs sino de pequeños gránulos.

Otro resultado importante del presente estudio es que se encuentra una distribución logarítmica normal bimodal para el tamaño y el área de los MBPs (utilizando datos del satélite Hinode). Este tipo de distribución se encontró previamente, pero en estudios de campo magnético desarrollados por Utz et al. (2013). Cada una de las componentes de la distribución bimodal representa dos poblaciones de elementos: la primera componente representa

una familia de MBPs y la segunda una de pequeños gránulos en formación (los cuales el código no logra diferenciar).

Un resultado no menos importante es que en el conjunto de datos I se identificaron de manera errónea gránulos como MBPs. Esto depende tanto de la resolución espacial del instrumento empleado como de la incertidumbre del algoritmo utilizado. Es por esto, que para el conjunto de datos II no se identificaron MBPs de forma incorrecta debido al significativo aumento en resolución espacial.

Finalmente, merece la pena resaltar que varios de los resultados reportados en este trabajo en cuanto a las propiedades físicas de los MBPs, no hicieron parte de los objetivos originales en la propuesta de investigación, y son nuevos aportes. Dentro de estas nuevas contribuciones a la propuesta inicial se destacan los análisis de las curvas de luz, variaciones de tamaño y trayectorias de los MBPs junto con la exploración en dos zonas del Sol en calma que se incluyeron en el análisis (inicialmente se planteó estudiar una sola, como lo indica el título del trabajo). Esto representa un estudio adicional que le da valor agregado a la propuesta de investigación aprobada en un comienzo.

5.1. Trabajo futuro

Para trabajos futuros es pertinente ampliar el presente estudio con el fin de determinar la distribución del tiempo de vida de los MBPs usando los datos aquí presentados. Sumado a esto, calcular la distribución del campo magnético de estos pequeños puntos magnéticos brillantes y correlacionar espacialmente magnetogramas con los fotogramas aquí empleados, para evidenciar que los MBPs fueron identificados correctamente y no son ruido (pequeños abrillantamientos) de la imagen. Del mismo modo, es conveniente ampliar el presente estudio con el fin de obtener mejores resultados con telescopios de más alta resolución como el telescopio recientemente instalado DKIST de 4 m ubicado en Hawaii (Estados Unidos) con un límite de resolución de unos 20 kilómetros.

Otro aspecto que se puede investigar a futuro reside en el hecho de identificar dónde se ubican los MBPs que pertenecen a una u otra componente en los resultados de la velocidad de los dos conjuntos de datos. Una posible explicación es que los MBPs de menor velocidad albergan campos magnéticos más fuertes y podrían estar ubicados en el *network* (red magnética) conociendo que un valor intenso de campo magnético inhibe el movimiento de estos elementos; el campo magnético los mantiene unidos. Por su parte los MBPs de mayor velocidad podrían estar ubicados en regiones *internetwork* donde el campo magnético es más débil dejándolos con mayor libertad de movimiento.

Paralelamente, en trabajos futuros se puede verificar o corroborar la explicación dada a las dos poblaciones de elementos (MBPs y gránulos) encontradas en las distribuciones de áreas y diámetros para el conjunto de datos I. Para comprobar la hipótesis de que la primera componente es una población de MBPs y la segunda de gránulos se debe realizar un proceso en el cual se visualice sobre la imagen los elementos cuyo diámetro sea menor a 330 km (que es el punto de corte de las dos componentes de la figura **4-8**), se espera que únicamente MBPs sean identificados. En el otro caso, se visualizan los elementos cuyo diámetro sea mayor a 330 km y se espera que sean identificados gránulos pequeños solamente sobre las imágenes.

Bibliografía

- Babcock, H. (1961). The topology of the sun's magnetic field and the 22-year cycle. *The Astrophysical Journal*, 133:572.
- Beck, C., Mikurda, K., Bellot Rubio, L., Schlichenmaier, R., and Sütterlin, P. (2007). Magnetic properties of g-band bright points. In *Modern solar facilities-advanced solar science*, page 165.
- Berger, T. (1998). Measurements of solar magnetic element motion from high-resolution filtergrams. *The Astrophysical Journal*, 495:973.
- Berger, T. et al. (1996). On the dynamics of small-scale solar magnetic elements. *The Astrophysical Journal*, 463:365.
- Blanco, J., Cabello, I., Vargas, S., Balmaceda, L., and Domingo, V. (2017). Observing time proposal form 2017 for sst at the observatorio del roque de los muchachos la palma, spain.
- Chaplin, W. J. (2006). *Music of the Sun*.
- Choudhuri, A. R., Auffret, H., and Priest, E. R. (1993). Implications of rapid footpoint motions of photospheric flux tubes for coronal heating. *Solar physics*, 143(1):49–68.
- De Pontieu, B., Martínez-Sykora, J., and Chintzoglou, G. (2017). What causes the high apparent speeds in chromospheric and transition region spicules on the sun? *The Astrophysical Journal Letters*, 849(1):L7.
- Del Moro, D., Berrilli, F., Duvall, T., and Kosovichev, A. (2004). Dynamics and structure of supergranulation. *Solar Physics*, 221(1):23–32.
- Denker, C., Kuckein, C., Verma, M., Manrique, S. J. G., Diercke, A., Enke, H., Klar, J., Balthasar, H., Louis, R. E., and Dineva, E. (2018). High-cadence imaging and imaging spectroscopy at the gregor solar telescope—a collaborative research environment for high-resolution solar physics. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236(1):5.
- Dikpati, M. and Gilman, P. A. (2008). Global solar dynamo models: Simulations and predictions. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 29(1-2):29–39.

- Domingo, V., Ermolli, I., Fox, P., Fröhlich, C., Haberreiter, M., Krivova, N., Kopp, G., Schmutz, W., Solanki, S., Spruit, H., et al. (2009). Solar surface magnetism and irradiance on time scales from days to the 11-year cycle. *Space Science Reviews*, 145(3-4):337–380.
- Dunn, R. B. and Zirker, J. B. (1973). The solar filigree. *Solar Physics*, 33(2):281–304.
- Gibson, E. G. (1973). The quiet sun.
- Hurlburt, N., Slater, G., Tarbell, T., Berger, T., and Katsukawa, Y. (2009). Hinode solar optical telescope data analysis guide. *Version*, 3:58.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., and Donner, K. J. (2016). *Fundamental astronomy*. Springer.
- Kawaguchi, I. (1980). Morphological study of the solar granulation. *Solar Physics*, 65(2):207–220.
- Keller, C. (1992). Resolution of magnetic flux tubes on the sun. *Nature*, 359(6393):307.
- Kitchatinov, L. (2014). The solar dynamo: Inferences from observations and modeling. *Geomagnetism and Aeronomy*, 54(7):867–876.
- Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., Shimizu, T., Sone, Y., Tachikawa, S., Hashimoto, T., Minesugi, K., Ohnishi, A., Yamada, T., et al. (2007). The hinode (solar-b) mission: an overview. In *The Hinode Mission*, pages 5–19. Springer.
- Kuckein, C., Denker, C., Verma, M., Balthasar, H., Manrique, S. G., Louis, R., and Diercke, A. (2016). stools—a data reduction pipeline for the gregor fabry-pérot interferometer and the high-resolution fast imager at the gregor solar telescope. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(S327):20–24.
- Limpert, E., Stahel, W. A., and Abbt, M. (2001). Log-normal distributions across the sciences: keys and clues: on the charms of statistics, and how mechanical models resembling gambling machines offer a link to a handy way to characterize log-normal distributions, which can provide deeper insight into variability and probability—normal or log-normal: that is the question. *BioScience*, 51(5):341–352.
- Liu, Y., Xiang, Y., Erdelyi, R., Liu, Z., Li, D., Ning, Z., Bi, Y., Wu, N., and Lin, J. (2018). Studies of isolated and non-isolated photospheric bright points in an active region observed by the new vacuum solar telescope. *The Astrophysical Journal*, 856(1):17.
- Martin, S., Bilimoria, R., Tracadas, P. W., Rutten, R., and Schrijver, C. (1994). Solar surface magnetism. *RJ Rutten and CJ*.
- Mehlretter, J. (1974). Observations of photospheric faculae at the center of the solar disk. *Solar Physics*, 38(1):43–57.

- Möstl, C., Hanslmeier, A., Sobotka, M., Puschmann, K., and Muthsam, H. (2006). Dynamics of magnetic bright points in an active region. *Solar Physics*, 237(1):13–23.
- Muller, R., Roudier, T., Vigneau, J., and Auffret, H. (1994). The proper motion of network bright points and the heating of the solar corona. *Astronomy and Astrophysics*, 283:232–240.
- Nisenson, P., Van Ballegooijen, A., De Wijn, A., and Sütterlin, P. (2003). Motions of isolated g-band bright points in the solar photosphere. *The Astrophysical Journal*, 587(1):458.
- Petrie, G. (2012). Evolution of active and polar photospheric magnetic fields during the rise of cycle 24 compared to previous cycles. *Solar Physics*, 281(2):577–598.
- Petrie, G. J. (2015). Solar magnetism in the polar regions. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1):5.
- Sánchez, J., Márquez, I., Bonet, J., Cerdeña, I. D., and Muller, R. (2004). Bright points in the internetwork quiet sun. *The Astrophysical Journal Letters*, 609(2):L91.
- Solanki, S. K., Inhester, B., and Schüssler, M. (2006). The solar magnetic field. *Reports on Progress in Physics*, 69(3):563.
- Steiner, O., Bruls, J., and Hauschildt, P. (2001). Why are g-band bright points bright? In *Advanced Solar Polarimetry—Theory, Observation, and Instrumentation*, volume 236, page 453.
- Stix, M. (2012). *The sun: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- Sweet, P. (1969). Mechanisms of solar flares. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 7(1):149–176.
- Tobias, S. (2002). The solar dynamo. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1801):2741–2756.
- Tsuneta, S., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Nagata, S., Otsubo, M., Shimizu, T., Suematsu, Y., Nakagiri, M., Noguchi, M., Tarbell, T., et al. (2008). The solar optical telescope for the hinode mission: an overview. *Solar Physics*, 249(2):167–196.
- Twidell, J. and Weir, T. (2006). Renewable energy resources. by taylor and francis. *Newyork, USA*.
- Utz, D. (2007). Dynamics of magnetic bright points in the solar photosphere. Master’s thesis, University of Graz.

- Utz, D., del Toro Iniesta, J., Rubio, L. B., Jurčák, J., Pillet, V. M., Solanki, S., and Schmidt, W. (2014). The formation and disintegration of magnetic bright points observed by sunrise/imax. *The Astrophysical Journal*, 796(2):79.
- Utz, D., Hanslmeier, A., Möstl, C., Muller, R., Veronig, A., and Muthsam, H. (2009a). The size distribution of magnetic bright points derived from hinode/sot observations. *Astronomy and Astrophysics*, 498(1):289–293.
- Utz, D., Hanslmeier, A., Muller, R., Veronig, A., Rybák, J., and Muthsam, H. (2009b). Dynamics of isolated magnetic bright points derived from hinode/sot g-band observations. *Astronomy and Astrophysics*, 511:A39.
- Utz, D. t., Jurčák, J., Hanslmeier, A., Muller, R., Veronig, A., and Kühner, O. (2013). Magnetic field strength distribution of magnetic bright points inferred from filtergrams and spectro-polarimetric data. *Astronomy & Astrophysics*, 554:A65.
- Wiegmann, T., Thalmann, J. K., and Solanki, S. K. (2014). The magnetic field in the solar atmosphere. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 22(1):78.
- Wiehr, E., Bovelet, B., and Hirzberger, J. (2004). Brightness and size of small-scale solar magnetic flux concentrations. *Astronomy and Astrophysics*, 422(3):L63–L66.
- Wöger, F., Von der Lühe, O., and Reardon, K. (2008). Speckle interferometry with adaptive optics corrected solar data. *Astronomy and Astrophysics*, 488(1):375–381.

A. Anexos

A continuación se muestran algunos de los códigos desarrollados en IDL y empleados en el presente estudio.

```
1 tvlct,[255,0,255,0,0],[255,255,0,0,0],[255,0,0,255,0],1
2 device,decomposed=0
3
4 btn_s=1
5 seg_thresh=0.5
6
7 mbp_paths=file_search('Hifi_2019/Orig_images/Images_cut/Results/MBPs/', '*.dat')
8 areas_paths=file_search('Hifi_2019/Orig_images/Images_cut/Results/Areas/', '*.dat')
9 image_paths=file_search('Hifi_2019/Orig_images/Images_cut/', '*.fits')
10 images=fltarr(1280,961,n_elements(image_paths))
11
12 sizes_all=0
13
14 for i=0, n_elements(areas_paths)-1 do begin
15     restore, areas_paths[i],/verb
16     restore, mbp_paths[i],/verb
17     image=readfits(image_paths[i],header)
18     images(*,*,i)=image
19
20     sizes=0
21
22     for j=0, n_elements(mbp_struct.area_id)-1 do begin
23         mbp=mbp_struct.area_id(j)
24         mbp_int=((areas eq mbp) or (areas eq (mbp+1)))*image
25         int_diff=max(mbp_int)-min(mbp_int)
26         threshold_int=min(mbp_int)+seg_thresh*int_diff
27         mbp_int=mbp_int*(mbp_int gt threshold_int)
28         index=where(mbp_int gt 0)
29         sizes=[sizes,n_elements(index)]
30     endfor
31
32 sizes_all=[sizes_all,sizes]
33 endfor
34
35 numbers=histogram(sizes_all,locations=x_size,bin_size=bin_s)
36 x_diameters=findgen(n_elements(x_size)*2)
37
38 x_diameters(0:*:2)=x_size
```

Figura A-1.: Código para determinar el área de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50%.

```
39 x_diameters(1:*:2)=x_size+bin_s
40
41 numbers_diameters=findgen(n_elements(numbers)*2)
42 numbers_diameters(0:*:2)=numbers
43 numbers_diameters(1:*:2)=numbers
44 x_diff=x_diameters(1:*:2)-x_diameters(0:*:2)
45
46 x_diameters=x_diameters*339.48
47
48 file='../Imagenes_tesis/area_gregor_50_kilometros.eps'
49 set_plot,'ps'
50 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=24,ysize=12
51
```

Figura A-2.: Código para determinar el área de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50%.


```

52 plot,x_diameters(8:*),numbers_diameters(8:*), title='Distribuci'+string(243b)+'n del ' +string(225b)+'rea de MBPs para el conjunto de datos
    II con corte en 50 %', xtitle=string(225b)+'rea [km'+string(178b)+']', ytitle='N' +string(250b)+ 'nero de MBPs', xrange=[0,30000], yrange=
    [0,4000],/xst,/yst, charsize=1.2, charthick=1.2, thick=5
53
54 param=[16000000,0.5,8.4,7500000,0.5,9.7]
55 weights=x_diameters*0+1
56 y=numbers_diameters
57 x=x_diameters
58 yfit_log = CURVEFIT(x, y, weights, param, FUNCTION_NAME='my_log_norm_2',/noderiv,itmax=10000)
59 my_log_norm_area,x,param(0:2),ytest_1
60 my_log_norm_area,x,param(3:5),ytest_2
61 oplot,[1643,1643],[0,12000],linestyle=5, color=4, thick=5
62 oplot,x,yfit_log, color=3, thick=5
63 oplot, x, ytest_1, linestyle=3, color=2, thick=5
64 oplot, x, ytest_2, linestyle=4, color=2, thick=5
65
66 items = ['Ajuste log normal', 'Componente I', 'Componente II', 'Resoluci'+string(243b)+'n HiFi']
67 legend, items, /fill, pos=[20500,3750], COLOR=[3,2,2,4], linestyle=[0,3,4,5]
68
69 device,/close
70 set_plot,'x'
71
72 mean1=exp(param(2))
73 print,mean1
74
75 factor1=exp(param(1))
76 print,factor1
77
78 mean2=exp(param(5))
79 print,mean2
80
81 factor2=exp(param(4))
82 print,factor2
83
84 print,param(0)/(param(0)+param(3))*100
85
86 end

```

Figura A-3.: Código para determinar el área de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %.

```

1 tvlct,[255,0,255,0,0],[255,255,0,0,0],[255,0,0,255,0],1
2 device,decomposed=0
3
4 bin_s=1
5 seg_thresh=0.5
6
7 mbp_paths=file_search('HiFi_2019/Orig_images/Images_cut/Results/MBPs/','*.dat')
8 areas_paths=file_search('HiFi_2019/Orig_images/Images_cut/Results/Areas/','*.dat')
9 image_paths=file_search('HiFi_2019/Orig_images/Images_cut','*.fits')
10 images=fltarr(1280,961,n_elements(image_paths))
11
12 sizes_all=0
13
14 for i=0, n_elements(areas_paths)-1 do begin
15     restore, areas_paths[i],/verb
16     restore, mbp_paths[i],/verb
17     image=readfits(image_paths[i],header)
18     images(*,*,i)=image
19
20     sizes=0
21
22     for j=0, n_elements(mbp_struct.area_id)-1 do begin
23         mbp=mbp_struct.area_id(j)
24         mbp_int=((areas eq mbp) or (areas eq (mbp+1)))*image
25         int_diff=max(mbp_int)-min(mbp_int)
26         threshold_int=min(mbp_int)+seg_thresh*int_diff
27         mbp_int=mbp_int*(mbp_int gt threshold_int)
28         index=where(mbp_int gt 0)
29         sizes=[sizes,n_elements(index)]
30     endfor
31
32 sizes_all=[sizes_all,sizes]
33 endfor
34
35 sizes=sizes(1:*)
36
37 numbers=histogram(sizes_all,locations=x_tamano,binsize=bin_s)
38 x_diameters=findgen(n_elements(x_tamano)*2)

```

Figura A-4.: Código para determinar el diámetro de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50 %.

```

39
40 x_diameters(0:*:2)=x_tamano
41 x_diameters(1:*:2)=x_tamano+btn_s
42
43 numbers_diameters=findgen(n_elements(numbers)*2)
44 numbers_diameters(0:*:2)=numbers
45 numbers_diameters(1:*:2)=numbers
46
47 x_diameters=sqrt(4*x_diameters*(737*0.025)^2./!pi)
48
49 x_diff=x_diameters(1:*:2)-x_diameters(0:*:2)
50
51 numbers_diameters(0:*:2)=numbers_diameters(0:*:2)/total(x_diff*numbers_diameters(0:*:2))
52 numbers_diameters(1:*:2)=numbers_diameters(1:*:2)/total(x_diff*numbers_diameters(1:*:2))
53
54 file='./Imagenes_testis/diametro_gregor_50_ejemplo.eps'
55 set_plot,'ps'
56 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=24,ysize=12
57
58 plot,x_diameters,numbers_diameters, title='Distribuci'+string(243b)+'n de di'+string(225b)+'metros de MBPs para el conjunto de datos II
corte en 50%', xtitle='Di'+string(225b)+'metro de MBPs [km]', ytitle='Densidad de probabilidad', xrange=[0,200], yrange=[0,0.02],/xst,/yst,
charsize=1.2, charthick=1.2, thick=5
59
60 param=[0.48,0.27,4.13,5,0.35,0.5,4.3,25]
61 weights=x_diameters*0+1
62 y=numbers_diameters
63 x=x_diameters
64 yfit_log = CURVEFIT(x, y, weights, param, FUNCTION_NAME='my_log_norm_2_x',/noderiv,itmax=10000)
65 my_log_norm_diametro,x,param(0:3),ytest_1
66 my_log_norm_diametro,x,param(4:7),ytest_2
67 oplot,[40,40],[0,0.1],linestyle=5, color=4, thick=5
68 oplot,x,yfit_log, color=3, thick=5
69 oplot, x, ytest_1, linestyle=3, color=2, thick=5
70 oplot, x(6:*), ytest_2, linestyle=4, color=2, thick=5
71
72 items = ['Ajuste log normal','Componente I','Componente II', 'Resoluci'+string(243b)+'n HiFi']
73 legend, items, /fill, pos=[132,0.019], COLOR=[3,2,2,4], linestyle=[0,3,4,5], charsize=1.2, charthick=1.2

```

Figura A-5.: Código para determinar el diámetro de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50%.

```

74
75 device,/close
76 set_plot,'x'
77
78 media1=exp(param(2))
79 print,media1
80
81 factor1=exp(param(1))
82 print,factor1
83
84 media2=exp(param(6))
85 print,media2
86
87 factor2=exp(param(5))
88 print,factor2
89
90 print,param(0)/(param(0)+param(4))*100
91
92 end

```

Figura A-6.: Código para determinar el diámetro de los MBPs del conjunto de datos II con corte de intensidad en 50%.

```

1 tvlct,[255,0,255,0,0],[255,255,0,0,0],[255,0,0,255,0],1
2 device,decomposed=0
3
4 seg_thresh=0.8
5 max_dist=6
6 table_connections=' '
7 table_connections_reverse=' '
8 cadence=32
9 pix_to_dist=0.108*720*1e3
10 other_para=findgen(5)*0 -1
11
12 mbp_paths=file_search('SOT_2007/Imag_Calib/Results/Reescaladas/Results/MBPs/', '*.dat')
13 areas_paths=file_search('SOT_2007/Imag_Calib/Results/Reescaladas/Results/Areas/', '*.dat')

```

Figura A-7.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```

14 image_paths=file_search('SOT_2007/Imag_Calib/Results/Reescaladas','*.fits')
15
16 images=fltarr(512,1024,n_elements(image_paths))
17
18 off_all=findgen(2)*0 -1
19 off_accumulated=findgen(2)*0
20 bary_all_image=findgen(2)*0
21
22 for i=0, n_elements(areas_paths)-1 do begin
23     restore, areas_paths[i], /verb
24     restore, mbp_paths[i],/verb
25     image=readfits(image_paths[i],header)
26     images(*,*,i)=image
27
28     bary_all=findgen(2)*0 -1
29     other_all=findgen(5)*0 -1
30     for j=0, n_elements(mbp_struct.area_id)-1 do begin
31         mbp=mbp_struct.area_id(j)
32         mbp_int=((areas eq mbp) or (areas eq (mbp+1)))*image
33         int_diff=max(mbp_int)-min(mbp_int)
34         threshold_int=min(mbp_int)+seg_thresh*int_diff
35         mbp_int=mbp_int*(mbp_int gt threshold_int)
36         index=where(mbp_int gt 0)
37         intensity_median=median(mbp_int(index))
38         intensity_mean=mean(mbp_int(index))
39         intensity_max=max(mbp_int(index))
40         intensity_min=min(mbp_int(index))
41         sizes=n_elements(index)
42         size_im=size(image)
43         x_pos=index mod size_im(1)
44         y_pos=index / size_im(1)
45         bary_pos=findgen(2)
46         bary_pos(0)=total(x_pos*mbp_int(index))/total(mbp_int(index))
47         bary_pos(1)=total(y_pos*mbp_int(index))/total(mbp_int(index))
48         bary_all=[[bary_all],[bary_pos]]
49         other_all=[[other_all],[intensity_median,intensity_mean,intensity_max,intensity_min,sizes]]
50     endfor

```

Figura A-8.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```

51
52 if i eq 0 then begin
53     bary_all_image=[[bary_all_image],[bary_all]]
54     off_all=[[off_all],[bary_all]]
55     other_para=[[other_para],[other_all]]
56     continue
57 endif
58 off=cross_corr(images(*,*,i-1),images(*,*,i),10)
59
60 off_x=off(0)
61 off_y=off(1)
62
63 if i eq 1 then off_accumulated=off else off_accumulated=off_accumulated+off
64
65 off_pos=bary_all*0
66 off_pos(0,1:*)=bary_all(0,1:*) - off_accumulated(0)
67 off_pos(1,1:*)=bary_all(1,1:*) - off_accumulated(1)
68 off_all=[[off_all],[off_pos]]
69 other_para=[[other_para],[other_all]]
70
71 bary_all_image=[[bary_all_image],[off_pos]]
72 endfor
73
74 off_all=[[off_all],[0,0]]
75 other_para=[[other_para],[0,0,0,0,0]]
76
77 all_parameters=findgen(17)*0
78 velocity=[0,0,0]
79 image_limit=where(off_all(0,*) eq 0)
80 pos_x_old=off_all(0,image_limit(0)+1:image_limit(1)-1)
81 pos_y_old=off_all(1,image_limit(0)+1:image_limit(1)-1)
82 para_old=other_para(*,image_limit(0)+1:image_limit(1)-1)
83
84 for i=1, n_elements(image_limit)-2 do begin
85
86     pos_x=off_all(0,image_limit(i)+1:image_limit(i+1)-1)
87     pos_y=off_all(1,image_limit(i)+1:image_limit(i+1)-1)

```

Figura A-9.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```

88     para=other_para(*,image_limit(i)+1:image_limit(i+1)-1)
89     for j=0, n_elements(pos_x_old)-1 do begin
90         distance=sqrt((pos_x_old(j)-pos_x)^2+(pos_y_old(j)-pos_y)^2)
91         conection=where(distance le max_dist)
92         table_connections=[table_connections,string(j)+' '+string(conection)]
93
94         if (conection(0) ne (-1)) then begin
95             for k=0, n_elements(conection)-1 do begin
96                 velocity=[[velocity],[pos_x_old(j)-pos_x(conection(k)),pos_y_old(j)-pos_y(conection(k)),$
97                     distance(conection(k))]]
98
99                 all_parameters=[[all_parameters],[i, j, conection(k),para_old(0,j),para_old(1,j),para_old(2,j),$
100                     para_old(3,j),para_old(4,j),para(0,conection(k)),para(1,conection(k)),para(2,conection(k)),$
101                     para(3,conection(k)),para(4,conection(k)),pos_x_old(j),pos_y_old(j), pos_x(conection(k)), $
102                     pos_y(conection(k))]]
103             endwhile
104         endif
105     endfor
106     table_connections=[table_connections,'0 0']
107     pos_x_old=pos_x
108     pos_y_old=pos_y
109     para_old=para
110 endfor
111
112 velocity=velocity(*,1:*)*pix_to_dist/cadence
113
114 off_all_reverse=off_all
115 off_all_reverse(0,*)=reverse(off_all(0,*))
116 off_all_reverse(1,*)=reverse(off_all(1,*))
117
118 image_limit=where(off_all(0,*) eq 0)
119 pos_x_old=off_all_reverse(0,image_limit(0)+1:image_limit(1)-1)
120 pos_y_old=off_all_reverse(1,image_limit(0)+1:image_limit(1)-1)
121
122 for i=1, n_elements(image_limit)-2 do begin
123     pos_x=off_all_reverse(0,image_limit(i)+1:image_limit(i+1)-1)
124     pos_y=off_all_reverse(1,image_limit(i)+1:image_limit(i+1)-1)

```

Figura A-10.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```

125     for j=0, n_elements(pos_x_old)-1 do begin
126         distance=sqrt((pos_x_old(j)-pos_x)^2+(pos_y_old(j)-pos_y)^2)
127         conection=where(distance le max_dist)
128         table_connections_reverse=[table_connections_reverse,string(j)+' '+string(conection)]
129     endfor
130     table_connections_reverse=[table_connections_reverse,'0 0']
131     pos_x_old=pos_x
132     pos_y_old=pos_y
133 endfor
134
135 file='../Imagenes_tesis/vel_hinode.eps'
136 set_plot,'ps'
137 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=24,ysize=16
138
139 bin=50
140 histograma=histogram(velocidad(2,*),locations=x_t,binsize=bin)
141 plot,x_t,histograma,psym=10, title='Histograma de velocidad conjunto de datos I', xtitle='Velocidad ms!E-1', $
142 ytitle='N'+string(250b)+'mero de MBPs', xrange=[0,8000], yrange=[0,800],/xst,/yst, charsize=1.2, charthick=1.2, thick=5
143
144 param=[10100,200000,9000,139500]
145 weights=x_t*0+1
146 y=histograma
147 x=x_t
148 yfit = CURVEFIT(x, y, weights, param, FUNCTION_NAME='my_rayleight_2',/noderiv)
149 my_rayleight,x,param(0:1),ytest_1
150 my_rayleight,x,param(2:3),ytest_2
151 oplot, x, yfit, color=3, thick=5
152 oplot, x, ytest_1, linestyle=4, color=2, thick=5
153 oplot, x, ytest_2, linestyle=3, color=2, thick=5
154
155 items = ['Ajuste Rayleight','Componente I','Componente II']
156 legend, items, /fill, pos=[5500,770], COLOR=[3,2,2], linestyle=[0,3,4], charsize=1.2, charthick=1.2
157
158 device,/close
159 set_plot,'x'
160
161 media1=param(0)*sqrt(!pi/2.)

```

Figura A-11.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```

162 print, media1
163
164 media2=param(2)*sqrt(1pi/2.)
165 print, media2
166
167 print,param(1)/(param(1)+param(3))*100
168
169 file='../Inagenes_tests/vel_x_y_hinode.eps'
170 set_plot,'ps'
171 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=20,ysize=18
172
173 plot, velocidad(0,*), velocidad(1,*), psym=3, title='Velocidad Vx y Vy para el conjunto de datos I', xtitle='Vx ms!E-1', ytitle='Vy ms!E-1',
xrange=[-12000,12000], yrange=[-12000,12000],/xst,/yst, charsize=1.2, charthick=1.2, thck=5
174
175 device,/close
176 set_plot,'x'
177
178 vx=velocidad(0,*)
179 vy=velocidad(1,*)
180
181 vx=reform(vx)
182 vy=reform(vy)
183
184 file='../Inagenes_tests/vel_x_y_3d_hinode.eps'
185 set_plot,'ps'
186 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=20,ysize=18
187
188 vel_mat=hist_2d(vx,vy, bin1=250,bin2=250, min1=-10000, max1=10000, min2=-10000, max2=10000)
189 Surface, vel_mat(20:60, 20:60), findgen(41)*250-5000, findgen(41)*250-5000, title='Componentes de la velocidad de los MBPs',
xtitle='Velocidad en x', ytitle='Velocidad en y', ztitle='N'+string(250b)+'mero de elementos', charsize=1.5, charthick=1.2, thick=5
190
191 device,/close
192 set_plot,'x'
193
194 file='../Inagenes_tests/vel_hinode_x.eps'
195 set_plot,'ps'
196 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=24,ysize=16
197

```

Figura A-12.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```

198 x_t=x_t+bin/2.
199 bin=200
200 histograma=histogram(velocidad(0,*),locations=x_t,binsize=bin)
201 plot,x_t,histograma,psym=10, title='Histograma de la velocidad en '+string(120b)+' conjunto de datos I', xtitle='Velocidad ms!E-1',
ytitle='N'+string(250b)+'nero de MBPs', xrange=[-6000,6000], yrange=[0,2000],/xst,/yst, charsize=1.2, charthick=1.2,
thick=5
202 x_t=x_t+bin/2.
203
204 param=[2100,0,36500,1500,0,100010]
205 weights=x_t*0+1
206 y=histograma
207 x=x_t
208 yfit = CURVEFIT(x, y, weights, param, FUNCTION_NAME='my_gauss_2',/noderv)
209 my_gauss,x,param(0:2),ytest_1
210 my_gauss,x,param(3:5),ytest_2
211 oplot,[0,0],[0,3000],linestyle=5, color=4, thick=5
212 oplot,x,yfit, color=3, thick=5
213 oplot, x, ytest_1, linestyle=3, color=2, thick=5
214 oplot, x, ytest_2, linestyle=4, color=2, thick=5
215
216 items = ['Ajuste Gauss','Componente I','Componente II']
217 legend, items, /fill, pos=[2850,1900], COLOR=[3,2,2], linestyle=[0,3,4]
218
219 device,/close
220 set_plot,'x'
221
222 print, param(0)
223 print, param(1)
224 print, param(3)
225 print, param(4)
226
227 print,param(2)/(param(2)+param(5))*100
228
229 file='../Inagenes_tests/vel_hinode_y.eps'
230 set_plot,'ps'
231 device,filename=file,/encaps,/color,bits_per_pixel=24,xsize=24,ysize=16
232
233 x_t=x_t+bin/2.

```

Figura A-13.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.

```
234 bin=200
235 histograma=histogram(velocidad(1,*),locations=x_t,binsize=bin)
236 plot(x_t,histograma,psym=10, title='Histograma de la velocidad en '+string(121b)+' conjunto de datos I', xtitle='Velocidad ms!E-1',
      ytitle='N'+string(250b)+'mero de MBPs', xrange=[-6000,6000], yrange=[0,2500],/xst,/yst, charsize=1.2, charthtck=1.2, thtck=5
237 x_t=x_t+bin/2.
238 param=[1550,0,100500,1500,0,100000]
239 weights=x_t*0+1
240 y=histograma
241 x=x_t
242 yfit = CURVEFIT(x, y, weights, param, FUNCTION_NAME='my_gauss_2',/noderiv)
243 my_gauss,x,param(0:2),ytest_1
244 my_gauss,x,param(3:5),ytest_2
245 oplot,[0,0],[0,3000],linestyle=5, color=4
246 oplot,x,yfit, color=3, thick=5
247 oplot, x, ytest_1, linestyle=3, color=2, thick=5
248 oplot, x, ytest_2, linestyle=4, color=2, thick=5
249
250 items = ['Ajuste Gauss','Componente I','Componente II']
251 legend, items, /fill, pos=[2800,2400], COLOR=[3,2,2], linestyle=[0,3,4]
252
253 device,/close
254 set_plot,'x'
255
256 print, param(0)
257 print, param(1)
258 print, param(3)
259 print, param(4)
260
261 print,param(2)/(param(2)+param(5))*100
262
263 end
```

Figura A-14.: Código para determinar la velocidad de los MBPs del conjunto de datos I.