



Expansión y autosimilitud de eyecciones coronales de masa a partir de observaciones estereoscópicas

H. Cremades^{1,2}, F.A. Iglesias^{1,2}, L.A. Merenda², F.M. López³ & I. Cabello^{1,2}

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

² Facultad Regional Mendoza, UTN, Argentina

³ Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio, CONICET-UNSJ, Argentina

Contacto / hebe.cremades@frm.utn.edu.ar

Resumen / Las eyecciones coronales de masa (ECMs) constituyen los eventos dinámicos más espectaculares del sistema solar, y juegan un papel fundamental en la determinación de las condiciones de la meteorología del espacio. Dado que la ocurrencia de una ECM ha sido hasta el momento imposible de predecir, en el mejor de los casos es posible elaborar pronósticos que intenten evaluar su grado de impacto. En este respecto, es crucial comprender cómo están organizados los campos magnéticos dentro de ECMs, y cómo evolucionan desde la baja corona hacia la heliósfera. Misiones solares excepcionales, como *STEREO*, *SOHO*, y *SDO*, brindan una oportunidad privilegiada para examinar este aspecto. Las imágenes de vista estereoscópica provistas por el paquete de instrumentos *STEREO/SECCHI* en combinación con imágenes desde la perspectiva terrestre captadas por *SDO/AIA* y *SOHO/LASCO* permiten el análisis de la evolución de ECMs desde su nacimiento en la baja corona. El grupo de ECMs bajo estudio surge de una combinación apropiada entre los puntos de observación de las naves y la dirección de propagación de ECMs, fundamental para reducir incertidumbres en su modelado. Estos eventos son analizados cuidadosamente en sus comienzos en la baja corona mediante observaciones simultáneas de *STEREO/EUVI* y *SDO/AIA*, y seguidos hasta el final del campo visual de los coronógrafos a bordo de *STEREO* y *SOHO*. En particular, examinamos la evolución de la configuración global de su campo magnético, y cómo se expanden en la dirección de su eje principal de simetría y en aquella perpendicular a éste.

Abstract / Coronal mass ejections (CMEs) constitute the most spectacular dynamic events in the solar system, and are key players in determining space weather conditions. Given that the occurrence of a CME has so far been impossible to predict, the best attempt at forecasting is then to assess their impact with the best possible accuracy. In this respect, understanding how magnetic fields are organized within CMEs, and how they evolve from the low corona into the heliosphere, is crucial. Exceptional ongoing solar missions, such as *STEREO*, *SOHO*, and *SDO*, provide a unique opportunity to shed light into this aspect. The *STEREO*-view images provided by the *STEREO/SECCHI* suite in combination with images from Earth's perspective recorded by *SDO/AIA* and *SOHO/LASCO* enable the analysis of CME evolution from their birth in the low corona. The set of CMEs under study arises from an appropriate combination of spacecraft vantage points and CME propagation direction, which is helpful to reduce uncertainties in their forward modeling. These events are carefully analyzed as they originate low in the corona by means of simultaneous observations of *STEREO/EUVI* and *SDO/AIA*, and followed up to the outer fields of view of the *STEREO* and *SOHO* coronagraphs. In particular, we examine the evolution of their global magnetic field configuration, and how CMEs expand along the direction of their main symmetry axis and orthogonal to it.

Keywords / Sun: coronal mass ejections (CMEs) — Sun: corona — Sun: dynamics

1. Introducción

Las eyecciones coronales de masa (ECMs) son descomunales burbujas de plasma y campos magnéticos, eyectadas por el Sol en todas direcciones. Están asociadas a variedad de fenómenos solares como fulguraciones, protuberancias y oscurecimientos coronales, a su vez relacionados a procesos de liberación de energía, aceleración de partículas, y remoción del flujo magnético solar. Por otro lado, su capacidad de interactuar con la magnetósfera terrestre las torna un objeto imperativo de estudio, al poder afectar sistemas de comunicaciones y de navegación, líneas de transmisión de energía eléctrica, satélites, y astronautas en paseos extravehiculares, entre otros.

El estudio de la morfología de ECMs, por su parte, resulta de particular interés por su estrecha relación con la configuración de sus campos magnéticos. De esta manera, tanto la morfología como su evolución, son la llave para comprender procesos físicos involucrados en la iniciación de ECMs, para asociar la configuración de sus regiones fuente con estructuras *in situ*, y para mejorar predicciones de meteorología del espacio en base a configuraciones pre-eruptivas u observaciones coronográficas. Debido a las limitaciones imperantes en la elaboración de pronósticos de meteorología del espacio, el poder conocer cómo están organizados los campos magnéticos asociados a ECMs es clave para determinar si la magnetósfera terrestre será perturbada y en que medida.

El principal instrumento empleado para el análisis

de ECMs es el coronógrafo, capaz de detectar el brillo dispersado por los electrones presentes en la corona solar mediante el efecto de Thomson *scattering*. Desde el descubrimiento de las ECMs, la sensibilidad y resolución espacial y temporal de los coronógrafos ha mejorado formidablemente. A pesar de esto, una restricción fundamental prevalece: al registrar el brillo integrado a lo largo de la línea de la visual, los coronógrafos brindan una proyección bidimensional de una entidad tridimensional, como lo son las ECMs. Fundamentalmente por esta razón, la interpretación de las imágenes coronográficas se ve considerablemente dificultada.

En la actualidad, es mayormente aceptado que las ECMs están organizadas a lo largo de un eje principal de simetría, consistente con una cuerda de flujo magnético retorcida. Evidencia de campos magnéticos helicoidales puede encontrarse en cantidad de imágenes coronográficas de ECMs (Dere et al., 1999; Wood et al., 1999, *v.g.*), mientras que Moran & Davila (2004) encontraron una configuración de arcadas con simetría cilíndrica en base a imágenes polarizadas de la corona solar. Cremades & Bothmer (2004), por su parte, notaron que las vistas de ECMs proyectadas en la corona, dependen de la inclinación y ubicación de las líneas neutras asociadas a sus regiones fuente, también en acuerdo con una configuración de simetría cilíndrica. No fue hasta el trabajo de Cabello et al. (2016b), que pudieron visualizarse simultáneamente la vista axial y lateral de una misma ECM, es decir a lo largo y a lo ancho de su eje principal, como prueba de esta configuración. El concepto de cuerda de flujo también explica la manera en que están organizados los campos magnéticos de estructuras interplanetarias como las nubes magnéticas, contrapartes de ECMs detectadas *in situ* por misiones espaciales.

Como fuera señalado por Mierla et al. (2009), la reconstrucción tridimensional de la morfología de una ECM a partir de imágenes coronográficas disponibles es una tarea intrínsecamente indeterminada, dado que una reconstrucción tomográfica adecuada requiere un gran número de imágenes de una misma ECM desde numerosos puntos de observación diferentes. No obstante, la simultaneidad de misiones espaciales dedicadas al monitoreo solar desde puntos de observación diferentes, se transformó en una realidad con la Misión *STEREO* (Kaiser et al., 2008, Solar-Terrestrial Relations Observatory). Las imágenes de la corona solar tomadas desde sus naves gemelas, sumadas a las de la vista terrestre provistas por la Misión *SOHO* (Domingo et al., 1995, Solar and Heliospheric Observatory), conforman un triplete que resta subjetividad a la reconstrucción tridimensional de la morfología de ECMs, permitiendo la investigación de su evolución desde sus inicios en la baja corona.

2. Datos y métodos

Los datos primordialmente empleados en este análisis consisten en imágenes de la corona solar en luz blanca, provistas por los coronógrafos *COR1* y *COR2* del paquete *SECCHI* (Howard et al., 2008, *Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation*) a bordo de las naves de la misión *STEREO*. La tercer vista de

la corona en luz blanca es provista por el coronógrafo *LASCO C2* (Brueckner et al., 1995, *Large Angle Spectroscopic Coronagraph*) a bordo de la legendaria Misión *SOHO*, que brinda la perspectiva terrestre. Los instantes iniciales de la evolución de las ECMs son investigados mediante datos de la baja corona en el extremo ultravioleta (EUV) registrados por los telescopios *SECCHI/EUVI* de la Misión *STEREO* y *AIA* (Lemen et al., 2012, Atmospheric Imaging Assembly) a bordo de la nave *SDO* (Pesnell et al., 2012, Solar Dynamics Observatory).

Con el objetivo fundamental de caracterizar la morfología de un puñado de ECMs minimizando incertezas por efectos de proyección, los eventos bajo estudio se seleccionaron siguiendo una serie de cuidadosos criterios. De otra manera, tres vistas del mismo evento no serán suficientes para discernir correctamente la orientación de su eje principal de simetría ni la configuración global de su campo magnético. Por un lado, los eventos bajo estudio fueron identificados durante épocas de cuadratura entre naves: noviembre de 2010–julio de 2011 (cuadratura de las naves de *STEREO* con *SOHO*) y diciembre de 2012–junio de 2013 (cuadratura entre las dos naves de *STEREO*). Siguiendo el mismo criterio utilizado por Cabello et al. (2016b), además se condicionó la selección a ECMs cuya dirección de propagación fuese aproximadamente ortogonal al plano que contiene las naves (la eclíptica para *STEREO*, *SOHO* y *SDO*), es decir, que se propagasen a altas latitudes. Dado que gran parte de las ECMs se origina en los dos cinturones de actividad situados a ± 20 deg, los eventos polares son relativamente poco frecuentes.

Como primera aproximación para identificar los eventos que cumplieran con estos criterios, se investigó el *SOHO/LASCO CME Catalog* (Yashiro et al., 2004, http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) en búsqueda de ECMs con ángulo de posición central (APC) dentro de ± 25 deg con respecto a un APC = 0 deg (polo norte) y un APC = 180 deg (polo sur), durante los dos períodos de cuadratura mencionados. Se encontraron un total de ~ 35 eventos que cumplieron estos criterios. Sin embargo, como uno de los objetivos fundamentales de este trabajo es estudiar la evolución de ECMs desde sus inicios en la baja corona, aquí sólo se consideran aquellos cuya erupción pudo visualizarse por los instrumentos *STEREO/SECCHI EUVI* y *SDO/AIA*.

Como fuera mencionado en la Sec.1., la configuración general de las ECMs está de acuerdo con la de una cuerda de flujo magnético retorcida de manera helicoidal, con simetría aproximadamente cilíndrica. El modelo GCS propuesto por Thernisien et al. (2009) es una herramienta de modelado capaz de ajustar una figura tridimensional *ad hoc* representativa de una cuerda de flujo a dos o tres vistas estereoscópicas de la corona solar. Este modelo es un avance de la versión desarrollada por Thernisien et al. (2006), en base a los descubrimientos de Cremades & Bothmer (2004). La estructura *ad hoc* que es ajustada a las imágenes consiste de una figura tubular organizada sobre un eje principal, curvada en sus extremos y sostenida por dos conos que representan las “patas”, de manera que todo el conjunto se parece a una medialuna de confitería (ver Fig. 1). A

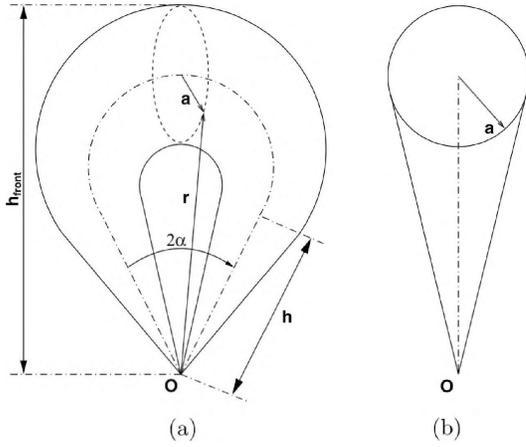


Figura 1: Representación del modelo GCS (a) de frente, mostrando su eje principal con una línea punteada, y (b) de costado. Adaptado de Thernisien et al. (2009).

pesar de ser vastamente usado, la correcta aplicación de este modelo no es trivial, debido a que dos (o tres) vistas estereoscópicas de una misma ECM pueden no ser suficientes si su dirección de propagación yace cerca del plano que contiene a las naves, y diversas soluciones pueden parecer ajustar a la misma ECM.

3. Resultados

Las vistas simultáneas de la ECM del 5 de junio de 2011 se muestran a modo de ejemplo para dos instantes de tiempo en la Fig. 2, uno durante su inicio en la baja corona (panel superior) y otro momentos después, a mayor altura (panel inferior). Las filas primera y tercera muestran a la ECM sin ajustar, mientras que las filas segunda y cuarta muestran en verde la malla de la figura ajustada con el modelo GCS. Este tipo de ajustes se repitió para cada instante de tiempo en que la ECM fuera observada, desde su inicio en la baja corona y durante su paso por el campo visual de los coronógrafos *STEREO/COR* y *SOHO/LASCO*. La evolución de los parámetros ajustados por el modelo GCS, y de otros derivados a partir de éstos, se grafica en la Fig. 3, de arriba a abajo y de izquierda a derecha: altura, ángulo medio entre las “patas”, longitud central, latitud central, relación de aspecto, inclinación, ancho angular en la dirección del eje principal, ancho angular en la dirección perpendicular al eje, derivada de las dos anteriores, y diferencia entre las derivadas.

Gráficas como las de la Fig. 3 fueron confeccionadas para siete eventos más a altas latitudes cuya erupción pudo seguirse desde la baja corona. Para comprender cómo se expanden las ECMs en la dirección de su eje principal, y en la perpendicular a éste, resultan de particular interés los valores de AW_L y AW_D . Éstos son representativos del ancho angular en ambas direcciones, y se corresponden con los de las vistas esquematizadas en la Fig. 1. El ancho angular de una ECM en la dirección del eje principal de su cuerda de flujo se determina como $AW_L = 2(\alpha + a \sin(\kappa))$, mientras que el ancho angular en la dirección perpendicular al eje se calcula

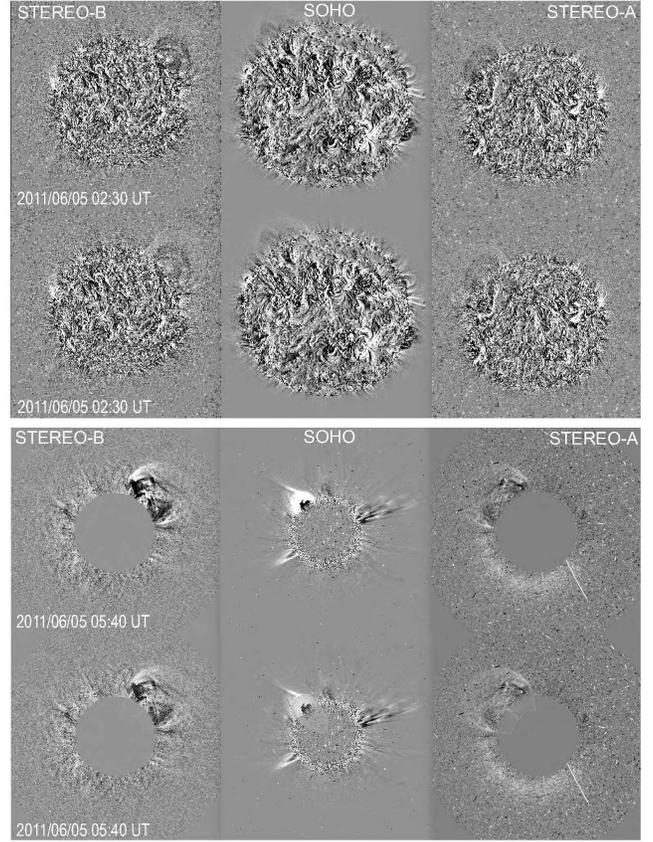


Figura 2: ECM del 5 de junio de 2011 en imágenes diferenciales de la corona solar, desde las perspectivas de *STEREO-B* (columna izquierda), *SOHO* (columna central), y *STEREO-A* (columna derecha). Panel superior: baja corona en el extremo ultravioleta a las 02:30 UT, arriba sin ajustar y abajo con el ajuste del modelo GCS. Panel inferior: corona de luz blanca a las 05:40 UT, arriba sin ajustar y abajo con el ajuste del modelo GCS.

como $AW_D = 2a \sin(\kappa)$. El ángulo α es el ángulo medio entre el eje de los conos que conforman las “patas” de la estructura, mientras que la relación de aspecto κ está dada por $\kappa = a(r)/r$, con $a(r)$ siendo el radio variable de la sección transversal de la estructura a una distancia r del Sol (Fig. 1).

Una relación entre los anchos angulares AW_L y AW_D de ECMs distinta de la unidad, fue propuesta por Cremades & Bothmer (2005), quienes obtuvieron un valor de 1.6. Sin embargo, esta relación surge de comparar los AW_L y AW_D promedios determinados para diferentes eventos, ya que en ese momento no se contaba con vistas estereoscópicas de la corona solar. Los primeros casos para los que fue posible determinar AW_L/AW_D a partir de la misma ECM, fueron presentados en Cabello et al. (2016b,a). En la Fig. 4 se muestra, para las ECMs bajo estudio, la evolución de esta relación en función de la altura. Puede notarse que esta relación cambia en los primeros instantes de su evolución, y hasta unos ~ 3 radios solares. A partir de esta altura, la relación AW_L/AW_D se estabiliza y se alcanza la autosimilitud. Además, el valor en el que se estabiliza esta relación varía significativamente de evento a evento, entre ~ 1.2 y 2.5.

Expansión y autosimilitud de ECMs

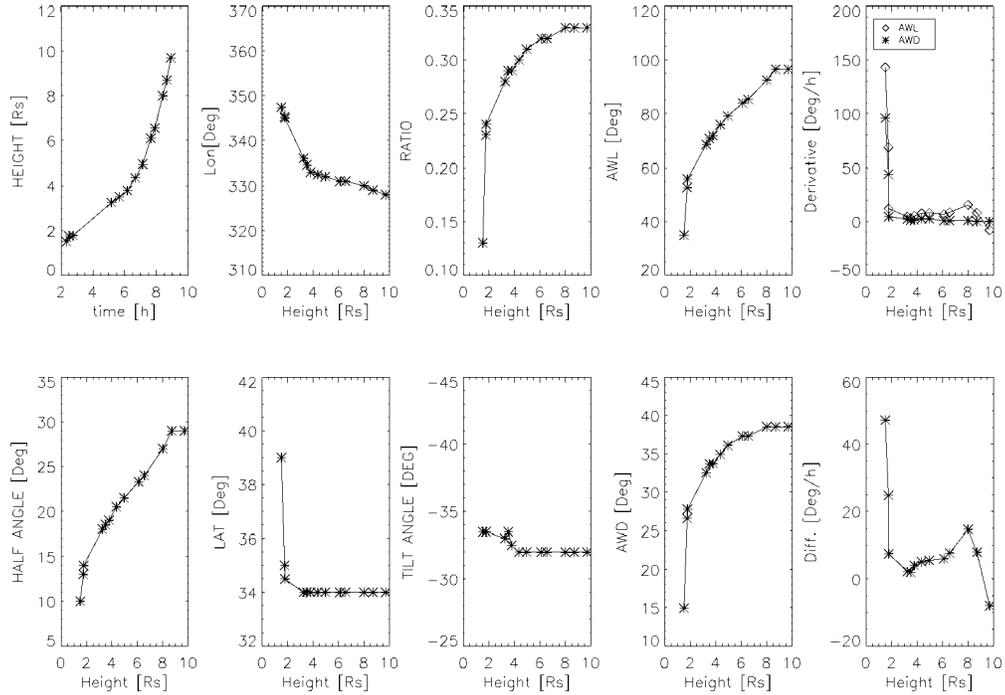


Figura 3: Evolución de los parámetros ajustados mediante el modelo GCS al evento del 5 de junio de 2011.

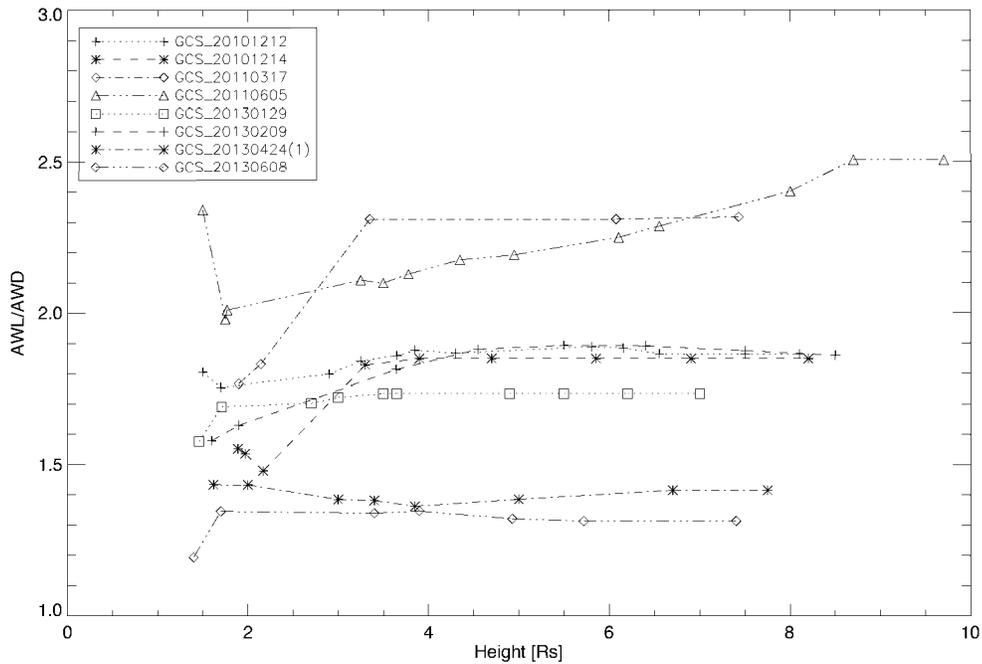


Figura 4: Relación entre los anchos angulares AW_L y AW_D como función de la altura de las ECMs.

En búsqueda de asimetrías entre la manera que se expanden las ECMs a lo largo de su eje y perpendicular a éste, en la Fig. 5 se muestra, en grados por hora, la diferencia entre las derivadas de AW_L y AW_D . Puede notarse que, al ser esta diferencia siempre positiva, todos los eventos se expanden más rápidamente en la dirección de su eje que en la perpendicular a éste. Además, esta asimetría se da mayormente en la baja corona, ya que

más allá de ~ 4 radios solares ambas tasas de expansión y su diferencia se vuelven despreciables.

4. Discusión y perspectivas futuras

Las vistas estereoscópicas provistas por naves de monitoreo solar desplazadas con respecto a la línea Sol-Tierra permiten restringir apropiadamente los parámetros mor-

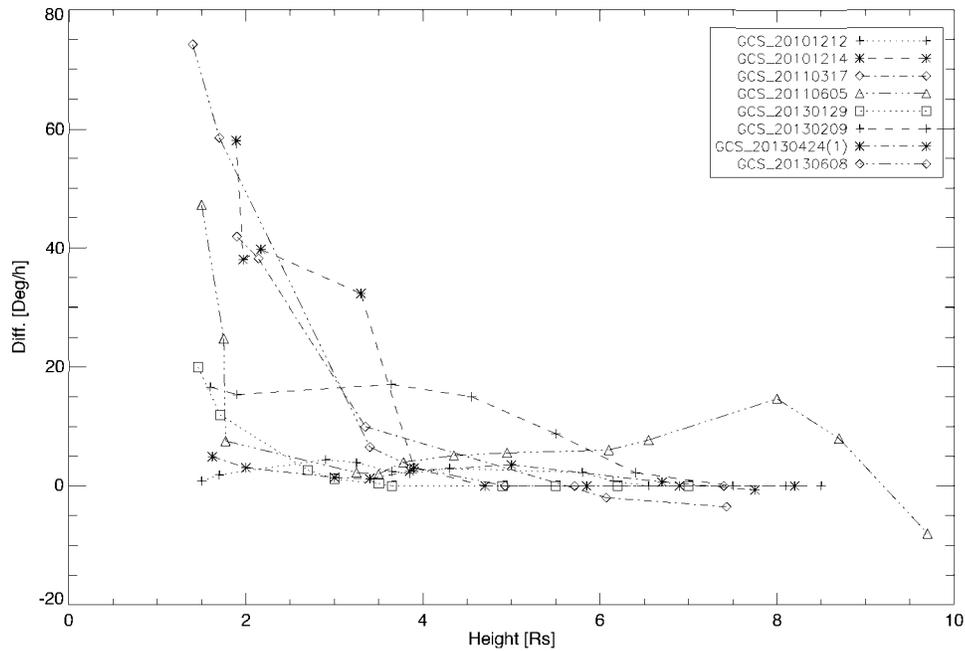


Figura 5: Diferencia entre las derivadas de AW_L y AW_D como función de la altura. Los distintos trazos y puntos representan los diferentes eventos analizados.

fológicos principales de ECMs. De todas maneras, debe tenerse en cuenta que el modelado tridimensional de la morfología de ECMs es un problema para el que existen múltiples soluciones posibles dependiendo de la ubicación de las naves y de la dirección de propagación de las ECMs. En este trabajo se han analizado ocho eventos aproximadamente polares, ocurridos durante épocas de cuadratura, y cuya erupción pudo visualizarse también en la baja corona.

Según los resultados obtenidos, la autosimilitud, un atributo comúnmente considerado inherente a ECMs, no puede garantizarse por debajo de ~ 3 radios solares. A partir de esta altura, la relación AW_L/AW_D se estabiliza en valores que van de ~ 1.2 hasta 2.5 dependiendo del evento. Además, pudo comprobarse que existe una asimetría considerable entre las velocidades de expansión en la dirección de su eje principal de simetría y en la perpendicular a éste, siendo mucho mayor en la dirección del eje.

Si bien aquí se presentan resultados que surgen del análisis de ocho eventos, en la actualidad se busca ampliar la muestra. Mejorando el contraste de las estructuras en las imágenes de la baja corona, será posible estudiar para mayor cantidad de eventos los instantes iniciales de las erupciones, que como se ha visto son los más importantes en cuanto a cambios de morfología. Misiones fuera de la eclíptica, como Solar Orbiter, permitirán además extender este tipo de análisis a eventos propagándose cerca de este plano, y en particular, a ECMs dirigidas hacia la Tierra.

Agradecimientos: HC agradece a los Comités Organizadores de

la Segunda Reunión Binacional entre la Asociación Argentina de Astronomía y la Sociedad Chilena de Astronomía por su invitación a presentar este informe y por la ayuda brindada para asistir a esta reunión. HC e IC son miembros de la Carrera del Investigador Científico (CONICET). FAI y FML son becarios de CONICET, y LAM becario del Consejo Interuniversitario Nacional. Los autores agradecen financiamiento de los proyectos UTN UTI4035TC y UTI4915TC. Los autores reconocen el uso de datos de *STEREO* (NASA), *SDO* (NASA), *SOHO* (ESA/NASA), y *Wind* (NASA).

Referencias

- Brueckner G.E., et al., 1995, *SoPh*, 162, 357
 Cabello I., et al., 2016a, *BAAA*, 58, 263
 Cabello I., et al., 2016b, *SoPh*, 291, 1799
 Cremades H., Bothmer V., 2004, *A&A*, 422, 307
 Cremades H., Bothmer V., 2005, K. Dere, J. Wang, Y. Yan (Eds.), *Coronal and Stellar Mass Ejections, IAU Symposium*, vol. 226, 48–54
 Dere K.P., et al., 1999, *ApJ*, 516, 465
 Domingo V., Fleck B., Poland A.I., 1995, *SoPh*, 162, 1
 Howard R.A., et al., 2008, *SSRv*, 136, 67
 Kaiser M.L., et al., 2008, *SSRv*, 136, 5
 Lemen J.R., et al., 2012, *SoPh*, 275, 17
 Mierla M., et al., 2009, *SoPh*, 259, 123
 Moran T.G., Davila J.M., 2004, *Science*, 305, 66
 Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012, *SoPh*, 275, 3
 Thernisien A., Vourlidas A., Howard R.A., 2009, *SoPh*, 256, 111
 Thernisien A.F.R., Howard R.A., Vourlidas A., 2006, *ApJ*, 652, 763
 Wood B.E., et al., 1999, *ApJ*, 512, 484
 Yashiro S., et al., 2004, *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, 109, A07105