

Seguimiento en la heliosfera interna de la morfología de una eyección coronal de masa dirigida hacia la Tierra

F. Manini^{1,2}, H. Cremades^{1,2} & F.M. López^{1,2}

¹ Grupo de Estudios en Heliofísica de Mendoza, Facultad de Ingeniería, Universidad de Mendoza, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Contacto / franco.manini@um.edu.ar

Resumen / El estudio morfológico de fenómenos eruptivos como las eyecciones coronales de masa (ECM) desde su inicio en la baja corona solar y durante su propagación en el medio interplanetario, resulta fundamental para caracterizarlos, ya que pueden afectar al entorno terrestre. En este trabajo, presentamos el análisis de una ECM dirigida hacia la Tierra ocurrida el día 3 de abril de 2010. La evolución del evento en la corona solar fue estudiada mediante imágenes de los coronógrafos de luz blanca LASCO C2 y SECCHI COR1 y COR2 a bordo de las misiones *Solar and Heliospheric Observatory* (SoHO) y *Solar-Terrestrial Relations Observatory* (STEREO). La propagación de la contraparte interplanetaria (ECMI) en la heliosfera interna hasta su llegada a la Tierra fue analizada mediante datos de los telescopios HI1 y HI2 de la misión STEREO. Durante la misma, se estudió la evolución de parámetros morfológicos fundamentales mediante un modelo geométrico iterativo de ajuste manual. Los resultados de los ajustes son puestos en el contexto de trabajos disponibles en la literatura. Quedó en evidencia la deficiente capacidad del modelo empleado para representar apropiadamente la morfología de la ECM a grandes distancias, debido a que ésta presenta distorsiones significativas con respecto a la geometría del modelo.

Abstract / The morphological study of eruptive phenomena such as coronal mass ejections (CMEs), from their origins in the low solar corona, and throughout their propagation in the interplanetary medium, is fundamental to characterize those events, which can significantly alter the terrestrial environment. In this work we present the analysis of an Earth-directed CME, which took place on April 3, 2010. The evolution of the event in the solar corona was studied by means of white-light coronagraphic images from the LASCO C2 (aboard the *Solar and Heliospheric Observatory*; SoHO) and SECCHI COR1 and COR2 (aboard the *Solar-Terrestrial Relations Observatory*; STEREO) instruments. Its propagation in the inner heliosphere up to its arrival at Earth, was studied with data from the HI1 and HI2 telescopes from the STEREO mission. Throughout the propagation, different fundamental morphological parameters were measured, by means of an iterative geometrical model of manual fitting. The results of the fits were contrasted with those available in the literature. The conclusion is that this model is not suitable to represent the CME morphology at large distances due to the significant distortions with respect to the model geometry.

Keywords / Sun: coronal mass ejections (CMEs) — Sun: heliosphere — solar-terrestrial relations

1. Descripción del evento

La eyección coronal de masa (ECM) analizada se originó el día 3 de abril de 2010 en la región activa AR11059 (S25W03), asociada a un flare de GOES de clase B7.4. La ubicación privilegiada de las naves STEREO, aproximadamente en cuadratura con la línea Sol-Tierra para esta fecha, posibilitó seguir este evento desde su origen hasta su llegada a nuestro planeta. Desde la perspectiva de STEREO-A, el telescopio EUVI en 304 Å observa la erupción de una protuberancia al sur de la AR11059 (Fig. 1a) que comienza alrededor de las 09:00 TU. Desde la perspectiva terrestre, el filamento correspondiente se observa en H α sobre el disco el día anterior (Fig. 1b). La región activa se observa con una línea neutra con orientación mayormente N-S, aunque en el filamento en H α se puede discernir una tenue extensión curvada hacia el SE (ver recuadro en panel b).

El seguimiento de la evolución de la ECM desde su eyección en la baja corona solar hasta su llegada a la Tierra se realiza mediante los instrumentos de luz blanca a

bordo de las naves STEREO. Hasta distancias de ~ 15 radios solares (R_s) se utilizan los coronógrafos COR1 y COR2. Para seguir la ECM en su trayectoria por el medio interplanetario, se utilizaron los STEREO/SECCHI Heliospheric Imagers (HI, Eyles et al., 2009). Para esta fecha, HI2-B estuvo fuertemente afectado por altos niveles de ruido de fondo debido a la Vía Láctea, por lo que sus observaciones no pudieron ser consideradas.

El choque que viaja por delante de la ECMI (Fig.1e) llega a Tierra el día 05 de Abril a las 07:55 TU, siendo detectado por la nave ACE, y 4 horas más tarde llega el frente de la ECMI, la cual corresponde a una nube magnética según Richardson & Cane (2010) y el catálogo de ECMIs de Wind (Nieves-Chinchilla et al., 2018). La misma produjo una tormenta geomagnética moderada, con un índice DsT de -72 de acuerdo a Möstl et al. (2010) y Wood et al. (2011), y un valor final de -81 de acuerdo al World Data Center for Geomagnetism, Kyoto.

2. Ajuste del modelo

Para estudiar la morfología de la ECM se utilizó la herramienta *Graduated Cylindrical Shell* (GCS; Thernisien et al., 2006). Este modelo geométrico representa la envoltura externa de una cuerda de flujo magnético como una estructura con forma de “croissant”, con sección transversal circular y dos extremidades cónicas, cuyos vértices están anclados al centro del Sol. Los 6 parámetros resultantes de ajustar el modelo a distintas distancias del Sol se muestran en la Tabla 1. Algunos de los ajustes realizados sobre imágenes de luz blanca se muestran en la Fig. 1.

3. Dirección de propagación

Inicialmente el filamento se eyecta hacia la Tierra, pero con una componente importante hacia el Sur (ver Fig. 1 a, c, d, donde las imágenes están rotadas de forma tal que el norte se sitúa arriba). Los resultados del ajuste del modelo GCS (Tabla 1) indican que la ECM tiende a aproximarse a la eclíptica mientras se propaga en el campo visual de HI2 (ver “Lat” en Tabla 1). Por otro lado, el análisis indica que no habría una deflexión importante en longitud. Para este mismo evento, Rollett et al. (2012) encuentran a través de 2 métodos de cálculo que la longitud de propagación es de $W3 \pm 4^\circ$ según uno y $E25 \pm 10^\circ$ según el otro. En tanto Xie et al. (2012) usan el modelo de cuerda de flujo de Krall & St. Cyr (2006) y encuentran un valor de S23W3 para la dirección de propagación de este evento. Por su parte, los trabajos de Möstl et al. (2010) y Wood et al. (2011) encuentran la dirección de propagación en S27W0 y S16W2 respectivamente. Volpes & Bothmer (2015) reportan para este evento una latitud similar a nuestros valores iniciales, pero a diferencia de nuestro trabajo no encuentran una evolución hacia la eclíptica. Los autores además suponen un comportamiento autosimilar sin distorsiones. Sin embargo, en nuestro análisis encontramos un alto grado de distorsión y apartamiento con respecto a la figura *ad hoc* del GCS, lo que da lugar a dificultades para ajustar este modelo a las distancias cubiertas por HI2 (ver Fig. 1 f).

4. Análisis de la morfología

4.1. Inclinación del eje de la cuerda de flujo

La región fuente muestra una orientación de la línea neutra mayormente vertical. Sin embargo, las reconstrucciones realizadas en la corona (ver Fig. 1 c,d), principalmente acotadas por la vista de SOHO/LASCO C2, sugieren una inclinación (tilt en la Tabla 1) aproximadamente horizontal. Esto podría ser evidencia de rotación en la baja corona (antes reportada por Green et al., 2007; Vourlidas et al., 2011). Pero además, en este trabajo encontramos una inclinación aproximadamente horizontal para la extensión al SE del filamento en H α , que está de acuerdo con la inclinación que surge del ajuste del modelo GCS. Para este mismo evento, Martinić et al. (2022) determinaron el tilt de la ECMI asociada como de ‘baja inclinación’ encontrándolo acorde al de 10° por

Tabla 1: Parámetros resultantes del modelo GCS para imágenes sucesivas del evento. De izquierda a derecha: día y hora en TU, instrumentos utilizados, y los parámetros del modelo GCS: longitud Stonyhurst, latitud e inclinación (todas en grados), altura del ápex de la ECM (en Rs), relación de aspecto (κ). La columna AW es el ancho angular axial en grados.

Día/Hora	Instr	Lon	Lat	Tilt	h	κ	AW
03/09:50	COR1	26	-25	20	3.4	0.28	33
03/10:24	COR2-C2	23	-26	20	5.6	0.35	41
03/11:24	COR2-C2	23	-26	20	10	0.35	41
03/15:29	HI-1	23	-24	20	32.5	0.42	50
03/16:49	HI-1	23	-23	20	38.5	0.48	57
03/20:49	HI-1	23	-22	20	56	0.50	60
03/22:49	HI-1	23	-22	20	65	0.50	60
04/00:49	HI-1	23	-22	20	77	0.50	60
04/14:09	HI-2	23	-20	0	140	0.40	47
04/20:09	HI-2	23	-15	0	153	0.35	41
05/04:09	HI-2	23	-12	0	177	0.35	41

ellos ajustado usando GCS. Xie et al. (2012) reportan que la línea neutra formaba un ángulo de 80° respecto a la horizontal (E-O), mientras que ajustando la ECM encuentran un tilt de -70° . Wood et al. (2011) modelaron esta ECM considerando dos escenarios distintos, uno con tilt de 10° y otro de -80° . Para este último también encuentran desacuerdo al intentar conciliar con imágenes de LASCO C2.

4.2. Ancho angular

Dada la baja inclinación encontrada para esta cuerda de flujo, y el hecho de que a grandes distancias sólo se cuenta con la perspectiva de STEREO-A, la aplicación del modelo GCS permite estimar con mayor precisión la evolución del ancho angular en la dirección axial (ver Tabla 1). Este valor se determina como 2δ , donde $\delta = \arcsin(\kappa)$, siendo κ la relación de aspecto (Thernisien, 2011). En cuanto al ancho angular lateral, dado que no disponemos de una vista de la ECM favorable para acotar su valor durante su propagación, se lo consideró constante más allá del campo visual de los coronógrafos (siendo el parámetro $\alpha = 20^\circ$, que representa la mitad de la apertura de las extremidades cónicas). Además, la deformación de la ECM en las imágenes de HI dificulta la aplicación del modelo GCS, por lo que los valores obtenidos a partir del ajuste en imágenes de HI1 y HI2 tienen gran incertidumbre.

4.3. Relación de aspecto

De acuerdo a Thernisien et al. (2006), κ puede definirse como el cociente entre el radio del tubo de la cuerda de flujo de sección transversal circular y su distancia al centro del Sol. Los valores obtenidos para este parámetro mediante la aplicación del modelo GCS pueden verse en la columna “ κ ” de la Tabla 1. Martinić et al. (2022) reportan para este mismo evento una relación de aspecto de 0.35 para la ECM vista desde COR2, lo cual coincide con este trabajo. Mishra et al. (2020) por su parte, calculan a partir de las velocidades observadas *in situ*,

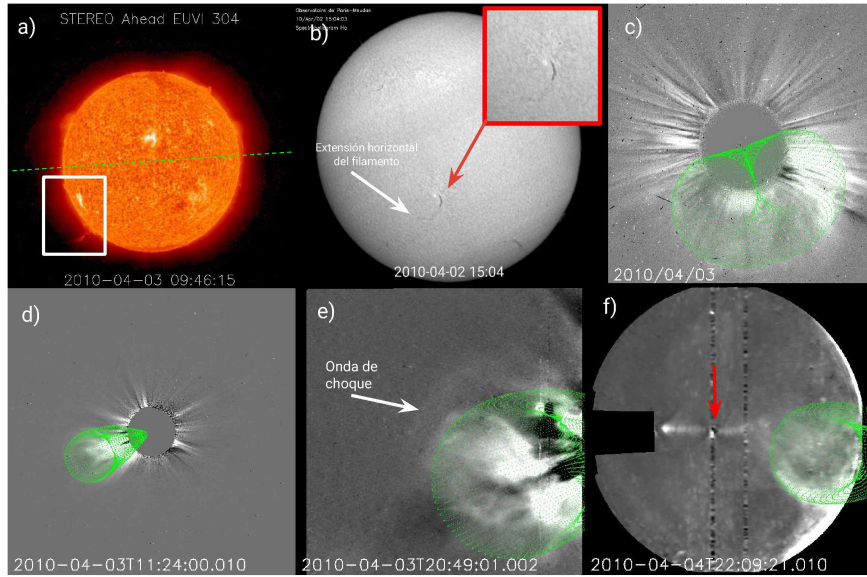


Figura 1: Evolución de la ECM en luz blanca y el respectivo ajuste GCS. a) Imagen EUVI 304 Å de STEREO A. El rectángulo blanco indica la erupción de la prominencia. En línea a trazos verde se indica la eclíptica, a 6.25° del ecuador solar. b) Imagen en H α previa a la erupción mostrando el filamento (cortesía Observatoire de Paris-Meudon). Ajuste GCS aplicado sobre las imágenes de (c) LASC0 C2, (d) COR2 A, (e) HI-1 A, donde se indica la onda de choque que puede observarse por delante del frente de onda. f) HI-2 A, donde se indica con una flecha roja la ubicación de la Tierra.

una relación de aspecto de 0.20, siendo casi la mitad de la obtenida por ellos con el modelo GCS a partir de observaciones de COR2 y HI.

4.4. Sección transversal

La sección transversal de la cuerda de flujo se observa aproximadamente circular en las vistas de COR1 y COR2. En los campos visuales de HI-1 y HI-2 se deforma considerablemente, observándose su sección transversal más comprimida hacia el sur (Fig. 1 e,f). Wood et al. (2011) concluyen sobre esta ECM que no puede ser de sección transversal circular, sino que debe ser elíptica desde el comienzo. De acuerdo a nuestro análisis, a alturas coronales la sección transversal sí se observa circular, tornándose más elíptica y distorsionada a medida que el evento se propaga por el medio interplanetario.

5. Conclusiones

Se aplicó el modelo GCS a una ECM dirigida hacia la Tierra durante su propagación en la baja corona y hasta 1 UA, observada por medio de instrumentos de sensado remoto. La dirección de propagación encontrada está de acuerdo con reportes anteriores, así como el valor obtenido del ángulo de inclinación (Tilt, Tabla 1). Sólo observamos diferencias en la longitud de propagación, en nuestro caso más inclinada hacia el oeste. En cuanto a la sección transversal, se observó una deformación de su estructura frontal en el medio interplanetario, lo que dificulta la aplicación del modelo GCS a las imágenes de HI. Nuestro análisis nos permite concluir, que para

el evento estudiado el modelo GCS no resulta apropiado para su ajuste en las imágenes de HI debido a la deformación del frente de la ECM (Kay & Nieves-Chinchilla, 2021; Riley & Crooker, 2004).

Agradecimientos: FM es becario doctoral de CONICET. HC y FML son miembros de la Carrera del Investigador Científico de CONICET. Los autores agradecen financiamiento de los proyectos PIP 11220200102710CO (CONICET) y MSTCAME008181TC (UTN). Este trabajo usó datos de las misiones STEREO (NASA) y SOHO (ESA/NASA), producidos por los consorcios internacionales de SECCHI y LASC0.

Referencias

- Eyles C.J., et al., 2009, *Solar Phys.*, 254, 387
 Green L.M., et al., 2007, *Solar Phys.*, 246, 365
 Kay C., Nieves-Chinchilla T., 2021, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 126, e2020JA028911. E2020JA028911
 Krall J., St. Cyr O.C., 2006, *ApJ*, 652, 1740
 Martinić K., et al., 2022, *A&A*, 661, A155
 Mishra W., et al., 2020, *Front. Astron. Space Sci.*, 7
 Möstl C., et al., 2010, *Geophys. Res. Lett.*, 37
 Nieves-Chinchilla T., et al., 2018, *Solar Phys.*, 293, 27
 Richardson I.G., Cane H.V., 2010, *Solar Phys.*, 264, 189
 Riley P., Crooker N.U., 2004, *ApJ*, 600, 1035
 Rollett T., et al., 2012, *ApJ*, 276, 293
 Thernisien A., 2011, *ApJS*, 194, 33
 Thernisien A.F.R., Howard R.A., Vourlidas A., 2006, *ApJ*, 652, 763
 Volpes L., Bothmer V., 2015, *Solar Phys.*, 290
 Vourlidas A., et al., 2011, *ApJL*, 733, L23
 Wood B.E., et al., 2011, *ApJ*, 729, 70
 Xie H., et al., 2012, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 117