



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

***Evolución temporal de la energía contenida en la
Corriente Anillo durante las tormentas geomagnéticas
más intensas ocurridas en 2015***

Anabella Urutti

Director: Dr. Francisco Azpilicueta
Codirector: Dr. Facundo L. Poblet

La Plata, Argentina

Año 2020

*Esta tesis está dedicada a mis padres Cristina y Daniel,
mis hermanos Aldana y Federico, mi compañero Francisco Vargas
y a la memoria de mis abuelas y abuelos.*

Resumen

La Corriente Anillo está presente en tiempos de calma y se incrementa considerablemente en tiempos de tormenta, produciendo una depresión en la componente horizontal ecuatorial del Campo Geomagnético medida en la superficie de la Tierra. El índice *Dst* muestra dicha perturbación y es generalmente empleado como un estimador de la intensidad de la Corriente Anillo.

En este trabajo se estudia la evolución temporal de la energía contenida en la Corriente Anillo durante las tormentas geomagnéticas intensas del 17 de marzo de 2015 y del 22-23 de junio de 2015. Para el análisis se utilizaron datos de Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE) a bordo de la sonda RBSP-B de la misión Van Allen Probes.

En una primera etapa, se analizó la distribución de los flujos de protones, iones O^+ y He^+ en función del parámetro L durante los días de las tormentas geomagnéticas así como también las variaciones de estos flujos en las distintas fases de las tormentas. Se obtuvo que los flujos omnidireccionales de las tres especies alcanzan sus máximos en la región ecuatorial cercana a la Tierra ($L=2.5-4$), y se aprecia que los iones H^+ son la especie dominante en los eventos analizados.

Posteriormente se estimaron las densidades de energía y luego las energías contenidas en los flujos de los iones H^+ , He^+ y O^+ durante las tormentas. A partir de las mediciones directas de estos iones se calcularon las variaciones magnéticas estimadas en superficie y se comparó lo obtenido con los valores medidos de los índices *Dst* y *SYM-H*. Los resultados demuestran que la variación total ΔB estimada se debe en mayor medida a H^+ , las perturbaciones magnéticas

estimadas de He^+ y O^+ son despreciables y el *Dst* medido se encuentra influenciado por otros sistemas de corrientes, además de la Corriente Anillo.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumen | i |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Marco teórico | 4 |
| 2.1. Campo Geomagnético | 4 |
| 2.1.1. Parámetro L | 7 |
| 2.1.2. Variación secular | 7 |
| 2.1.3. Variaciones regulares del Campo Magnético de la Tierra | 7 |
| 2.2. La ionósfera | 8 |
| 2.3. La plasmosfera | 9 |
| 2.3.1. Cinturones de Radiación | 10 |
| 2.3.2. Corriente Anillo | 11 |
| 2.4. El viento solar | 12 |
| 2.5. La magnetosfera | 13 |
| 2.5.1. Reconexión magnética | 14 |
| 2.6. Corrientes eléctricas | 15 |
| 2.6.1. Corrientes ionosféricas | 15 |
| 2.6.2. Corrientes magnetosféricas | 17 |
| 2.7. Actividad solar | 18 |
| 2.8. Tormenta geomagnética | 21 |
| 2.8.1. Fases de una tormenta | 23 |
| 2.8.2. Índice geomagnético Dst | 25 |
| 2.9. Índice geomagnético $SYM-H$ | 28 |
| 2.10. Índice geomagnético kp | 29 |
| 3. Van Allen Probes | 31 |
| 3.1. La misión en su inicio | 31 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.2. | La misión en la actualidad | 31 |
| 3.3. | El futuro de la misión | 32 |
| 3.4. | RBSPICE | 32 |
| 3.5. | Datos utilizados | 33 |
| 4. | Análisis espacial y temporal de los datos | 35 |
| 4.1. | Actividad geomagnética en el Ciclo Solar 24 | 35 |
| 4.1.1. | La tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015 | 35 |
| 4.1.2. | La tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015 | 37 |
| 4.2. | Localización de las sondas RBSP durante las dos tormentas analizadas | 39 |
| 4.3. | Análisis espacial: distribución de los flujos en L | 41 |
| 4.4. | Análisis temporal | 56 |
| 5. | Energía de la Corriente Anillo..... | 62 |
| 5.1. | Flujo de partículas y densidad de energía..... | 62 |
| 5.2. | Estimación del contenido de energía de la Corriente Anillo durante las tormentas geomagnéticas estudiadas | 66 |
| 5.3. | La relación Dessler-Parker-Sckopke | 70 |
| 5.3.1. | Estimación de la variación magnética debida al flujo de H^+ durante las tormentas geomagnéticas estudiadas..... | 74 |
| 5.3.2. | Variaciones magnéticas estimadas de los flujos de He^+ y O^+ | 76 |
| 5.4. | Corrección al Dst por los efectos de las corrientes en la magnetopausa | 78 |
| 5.5. | Correlación entre ΔB de H^+ y los índices geomagnéticos | 83 |
| 6. | Conclusiones | 87 |
| 7. | Bibliografía | 90 |

Capítulo 1

Introducción

La magnetosfera de la Tierra es un sistema altamente dinámico, que intercambia continuamente energía con el viento solar y la ionósfera (Lui et al., 2005).

En la magnetosfera, durante las tormentas geomagnéticas, varias regiones de plasma se ven afectadas y sufren fuertes modificaciones. Tales cambios están asociados con intensificaciones en los sistemas de corrientes, principalmente en la región de la Corriente Anillo (Akasofu & Chapman, 1972; Lanzerotti, 1979).

Estudios previos se han focalizado en la energía de la Corriente Anillo durante tiempos de tormenta. Krimigis et al., (1985) estudiaron la tormenta geomagnética intensa del 4 de septiembre de 1984 usando datos de iones en un rango de energía de aproximadamente unos keV a unos pocos MeV, proporcionados por Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers Charge Composition Explorer (AMPTE CCE). Ellos encontraron que la densidad de energía en la Corriente Anillo está dominada por protones con energías $> \sim 50$ keV, con un pico de $\sim 100-300$ keV tanto en tiempos de calma como de tormenta. Williams (1980) usó datos del detector de partículas en la nave espacial Explorer 45 y asumiendo que las mediciones eran solo de protones, mostró que en $L \sim 4$, más del $\sim 80\%$ de la densidad de energía en la Corriente Anillo está contenida en protones con energías de $\sim 20-300$ keV tanto en tiempos de calma como de tormenta. Por otro lado, Korth et al., (2000) investigaron varias tormentas geomagnéticas moderadas e intensas usando datos del satélite CRRES. En contraste con estudios previos, encontraron que iones con energías $\sim 5-28$ keV contribuyen significativamente a la densidad de energía de la Corriente Anillo durante la fase principal de las tormentas. Las discrepancias entre

los estudios podría deberse a las diferencias entre las distintas tormentas geomagnéticas estudiadas así como también a las diferencias en las mediciones realizadas por distintos instrumentos (Zhao et al., 2015).

En este trabajo se estudian las dos tormentas geomagnéticas más intensas del Ciclo Solar 24, la tormenta del 17 de marzo de 2015 y la del 22-23 de junio de 2015. Diversas misiones espaciales han proporcionado información para estudios anteriores sobre estas tormentas, por ejemplo las misiones Two Wide-angle magine Neutral-Atom Spectrometers (TWINS), The Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS) (Goldstein et al., 2016), y The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) (Astafyeva et al., 2015), en el caso de la tormenta del 17 de marzo de 2015. Las misiones satelitales Swarm (Astafyeva et al., 2017; 2018), C/NOFS, DMSP y GUVI (Astafyeva et al., 2017), en el caso de la tormenta del 22-23 de junio de 2015. Para este trabajo se utilizaron datos de la misión Van Allen Probes (RBSP). También se han empleado las observaciones de esta misión en estudios previos como por ejemplo (Zaho et al., 2015; Baker et al. 2016; Goldstein et al., 2016; Sandhu et al., 2018; Poblet, 2020).

La misión RBSP consta de dos sondas RBSP-A y RBSP-B. Específicamente se trabajó con las mediciones realizadas por el instrumento Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE) a bordo de la sonda RBSP-B, el cual fue diseñado para observar la población de plasma de la Corriente Anillo (Mitchell et al., 2013) y medir la distribución de partículas de iones H^+ , He^+ y O^+ .

RBSP junto a otras misiones, como las mencionadas en los párrafos anteriores, han contribuido a una mejora en el entendimiento de la dinámica de los principales constituyentes de la Corriente Anillo terrestre. Estas misiones permiten estudiar esta corriente, no a través de

índices geomagnéticos clásicos, como el índice *Dst*, sino a través de mediciones in situ. La calidad de las observaciones de RBSP permite además, implementar relaciones conocidas hace más de medio siglo para calcular perturbaciones magnéticas a partir de flujos de partículas, como la relación “Dessler-Parker-Sckopke” (Dessler & Parker, 1959; Sckopke, 1966).

Precisamente lo novedoso en este trabajo, fue no utilizar el método clásico para inferir características de la Corriente Anillo a partir de índices geomagnéticos, sino que a partir de mediciones directas de flujos, se estimaron perturbaciones magnéticas en superficie utilizando la relación DPS para los dos eventos estudiados. El contraste de las variaciones magnéticas estimadas con las observadas por índices geomagnéticos nos da una idea de cuán bueno es el modelo DPS para las dos tormentas geomagnéticas estudiadas.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Campo Geomagnético

El Campo Magnético de la Tierra (CMT) en cualquier punto sobre la superficie terrestre, es la suma de las contribuciones de campos de origen interno y campos de origen externo. Los campos de origen interno son: por un lado el que se genera en el núcleo externo, llamado Campo Interno Principal. Por otro lado, el interno debido a rocas que tienen componentes capaces de generarlo, el Campo Interno Cortical. Los de origen externo, tienen sus fuentes en corrientes magnetosféricas e ionosféricas. Estos campos se superponen e interactúan entre sí. Más del 90% del campo medido es Campo Interno Principal.

El CMT es una magnitud vectorial, los elementos que lo describen, cinco modulares y dos angulares, se aprecian en la Figura 2.1, donde X representa la componente norte del vector, Y la componente este, Z la componente vertical (positiva hacia abajo) llamada intensidad vertical, H la intensidad horizontal o componente horizontal del vector a lo largo del meridiano magnético local (positiva hacia el norte), D es la declinación magnética (positiva al este) o el ángulo entre la dirección norte geográfica y el meridiano magnético (ángulo entre X y H), I la inclinación magnética (positiva hacia abajo) o el ángulo entre H y la dirección del vector campo (\vec{F}). Y por último, la intensidad total F o módulo de Campo Geomagnético.

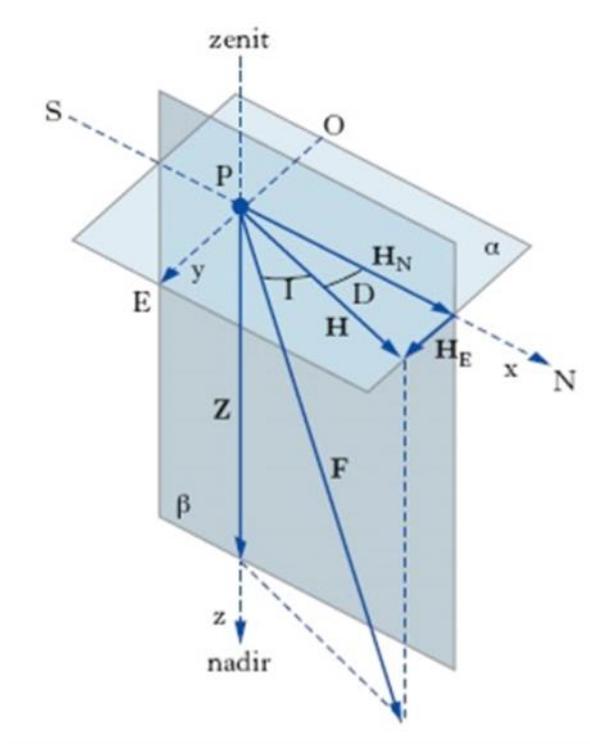


Figura 2.1. Componentes del Campo Geomagnético.
Adaptado de <http://www.treccani.it/enciclopedia/magnetismo/>

Las siguientes fórmulas muestran las relaciones entre las componentes:

$$F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (2.1)$$

$$H^2 = X^2 + Y^2 \quad (2.2)$$

$$X = H \cos D \quad (2.3)$$

$$Y = H \sin D \quad (2.4)$$

$$Z = F \sin I \quad (2.5)$$

$$D = \tan^{-1}(Y/X) \quad (2.6)$$

$$I = \tan^{-1}(Z/H) \quad (2.7)$$

La intensidad del campo magnético se mide en Tesla (T) en el SI, aunque es más práctico usar el nanoTesla (nT), que equivale a 10^{-9} T. En el sistema CGS, la unidad más usada es el gamma (γ), que se corresponde con 10^{-5} Gauss, y equivale en el SI a un nT.

Una aproximación inicial del Campo Geomagnético es describirlo como un campo generado por un dipolo magnético ubicado en el centro de la Tierra, con su eje ligeramente inclinado del eje rotacional, como se puede observar en la Figura 2.2. Dicho dipolo magnético intersecta la superficie terrestre en dos puntos, denominados polos geomagnéticos Norte y Sur.

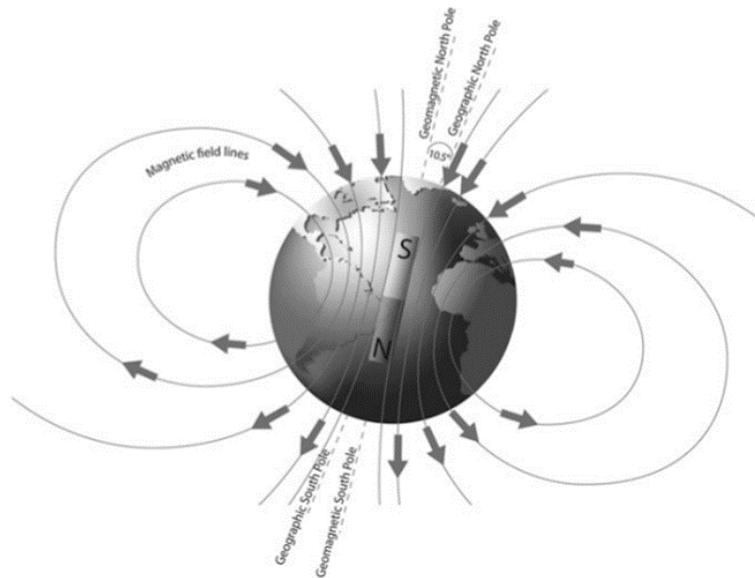


Figura 2.2. Campo Magnético de la Tierra como un dipolo con una inclinación de 10.5° respecto al eje de rotación. Imagen adaptada de (Zolesi & Cander, 2014).

2.1.1. Parámetro L

La ecuación de una línea del Campo Geomagnético es $r = L (\cos \lambda)^2$, siendo r la distancia geocéntrica desde el centro de la Tierra y λ la latitud magnética. El parámetro L es la distancia en radios terrestres desde el centro de la Tierra al punto donde la línea del Campo Geomagnético cruza el ecuador magnético ($\lambda = 0$), este parámetro es utilizado en la identificación de las líneas de campo (Daglis, 1999).

2.1.2. Variación secular

El Campo Magnético Principal es generado por las corrientes eléctricas que fluyen en/o cerca de la superficie del núcleo externo a una profundidad de aproximadamente 2900 km. Estos sistemas de corrientes no son estables ni homogéneos por lo que el campo medido en la superficie de la Tierra muestra grandes anomalías en comparación al producido por un campo dipolar. La variación del campo principal se conoce como **variación secular**. Monitorear la misma es muy difícil debido a que los cambios anuales son pequeños.

2.1.3. Variaciones regulares del Campo Magnético de la Tierra

El campo de origen externo presenta variaciones regulares que están relacionadas con la rotación y/o movimientos orbitales de la Tierra, el Sol y la Luna. La más importante es la **variación diurna** o variación solar diaria. La radiación solar ioniza la atmósfera alta durante las horas del día, el Sol produce una marea térmica en las capas ionosféricas y la Luna genera un movimiento de marea gravitacional en las mismas. El gas ionizado se mueve en el CMT produciendo corrientes eléctricas las cuales se reconocen como variaciones diarias en los registros magnéticos. La variación diurna depende de la época del año, de la actividad solar y de la latitud geomagnética. Mientras que la variación lunar es pequeña, de unos pocos nT, el efecto solar puede producir una variación con una amplitud de 100 nT en el verano.

Los observatorios geomagnéticos dan la variación solar diaria promedio para los meses del año, e incluso por separado para los días tranquilos y los días perturbados. La variación del campo magnético en los días considerados tranquilos se conoce como variación solar del día calmo o **variación S_q** .

Otra variación periódica es la anual, del orden de unos pocos nT, cuya explicación es el movimiento de la Tierra alrededor del Sol y la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano ecuatorial del Sol, lo que condiciona como la radiación solar alcanza la Tierra en las distintas épocas del año.

En la actividad magnética también se puede observar un período de aproximadamente 27 días que se lo conoce como período sinódico de rotación, y se corresponde con la rotación de la región del Sol donde se ubican las áreas más activas y las manchas solares. El Sol posee rotación diferencial y las regiones rotan a una velocidad distinta dependiendo de la latitud, las regiones ecuatoriales del Sol rotan de forma más rápida que las zonas cercanas a los polos. Al período sinódico de rotación se lo define como el tiempo promedio que le toma a un punto fijo en el Sol rotar a la misma posición aparente vista desde la Tierra (Beck, 2000).

2.2. La ionósfera

Cuando los componentes más intensos del espectro solar - los rayos X y la radiación ultravioleta extrema (EUV) - inciden en la atmósfera de la Tierra, ionizan una fracción del gas neutro de la atmósfera. El equilibrio entre esta fuente de ionización y la recombinación de partículas con carga opuesta en átomos neutros o moléculas producidas por colisiones aleatorias, da como resultado el mantenimiento de cargas libres positivas y negativas en un determinado nivel de densidad. Generalmente se considera a la ionosfera como aquella región atmosférica comprendida entre los 50-60 km y los 1000 km de altura. Dado que las colisiones disminuyen con

el aumento de altitud debido a la disminución de densidad del gas atmosférico, la densidad de plasma es generalmente insignificante hasta cierta altitud, aproximadamente 80 o 100 km, y luego aumenta hacia arriba hasta aproximadamente los 1000 km (Baumjohann et al., 2010). Fenómenos solares, como las llamaradas, cambios en el viento solar y las tormentas geomagnéticas también afectan la carga de la ionósfera. Dado que la mayor cantidad de ionización es causada por la radiación solar, el lado nocturno de la Tierra se ve afectado en muchísima menor medida por la ionización, que el lado diurno.

2.3. La plasmosfera

Como se mencionó anteriormente, la atmósfera superior de la Tierra se encuentra expuesta a la radiación ultravioleta del Sol, provocando que se liberen electrones de las partículas atmosféricas neutras. Los electrones logran escapar de la gravedad terrestre a causa de su energía y baja masa, el resultado es una ionósfera cargada positivamente y una región sobre ella cargada negativamente lo que origina un campo eléctrico. Muy rápidamente, este campo eléctrico resultante se opone al movimiento ascendente de los electrones fuera de la ionósfera. Sin embargo, los electrones tienen energía suficiente para resistir mientras que los iones se sienten atraídos y comienzan a moverse hacia arriba, fuera de la ionósfera. Esto sucede a pequeña escala, como resultado los iones más ligeros de hidrógeno, helio y oxígeno pueden escapar de la ionósfera. Debido al Campo Geomagnético, estas partículas que se mueven hacia afuera permanecen atrapadas cerca del planeta a menos que otros procesos las alejen y las lleven al espacio interplanetario. En solo unas horas y días, este plasma que escapa puede, en algunos lugares, acumularse y alcanzar un equilibrio formando la **plasmosfera**, un volumen de plasma con forma toroidal relativamente frío ($\sim 1-2$ eV), y denso ($10^2-10^4 \text{ cm}^{-3}$) de origen ionosférico. Compuesta de H^+ ($\sim 80\%$), He^+ ($\sim 10-20\%$) y O^+ ($5-10\%$), y atrapada por el Campo

Geomagnético (Lemaire & Gringauz, 1998), la plasmosfera co-rota con la Tierra. Este plasma existe en latitudes medias y bajas, comienza desde la ionósfera y se extiende hasta $\sim 4-5$ radios terrestres en el plano ecuatorial (radio de la Tierra = 6371 km). Por lo tanto, coexiste en la misma región que el Cinturón de Radiación Interior. El límite de la plasmosfera se llama plasmopausa. Fuera de este límite está el Cinturón de Radiación Exterior. La Corriente Anillo y el Cinturón de Radiación Exterior coinciden parcialmente con la población de la plasmosfera, como puede verse en la Figura 2.3.

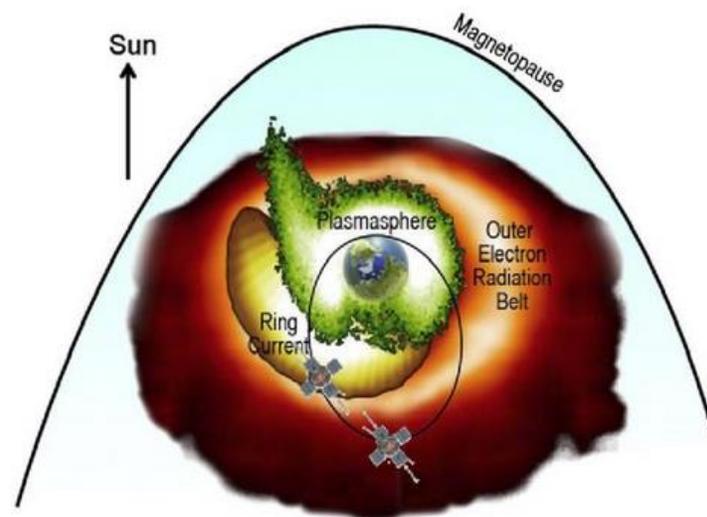


Figura 2.3. Las sondas RBSP orbitando las poblaciones de partículas de la plasmosfera, los Cinturones Van Allen y la Corriente Anillo. Adaptado de (Fox & Burch, 2014).

2.3.1. Cinturones de Radiación

Los **Cinturones de Radiación de Van Allen** que rodean la Tierra, fueron descubiertos en 1958 por James Van Allen, corresponden a una región en el espacio que está habitada por partículas energéticas atrapadas, electrones e iones. Por lo general, hay dos Cinturones de Radiación: el Cinturón Interior y el Cinturón Exterior, los cuales se observan en la Figura 2.4. El

Cinturón Interno está ubicado a una distancia ecuatorial aproximadamente entre 1.2 y 3 radios terrestres desde el centro de la Tierra y está habitado por electrones que tienen energías de cientos de keVs e iones que tienen cientos de MeVs. El Cinturón Exterior está ubicado a una distancia ecuatorial de entre 4 y 8 radios terrestres, y está poblado principalmente por electrones que tienen energías que van desde unos pocos cientos de keV a decenas de MeV. A veces, aparece un tercer cinturón ubicado entre el interior y el exterior.

Las partículas atrapadas muestran tres movimientos, los cuales se aprecian en la Figura 2.4: (i) giran alrededor de una línea de campo magnético, (ii) rebotan de un lado a otro a lo largo de la línea de campo entre los puntos espejo, (iii) gradualmente se desplazan longitudinalmente alrededor de la Tierra.

2.3.2. Corriente Anillo

El CMT actúa como una botella magnética para algunos tipos de partículas en el medio ambiente de la Tierra. Las partículas pueden quedar atrapadas rebotando entre los polos magnéticos Norte y Sur a lo largo de las líneas de campo. Viajan en espiral alrededor de estas líneas de campo a una frecuencia llamada “frecuencia ciclotrón”. El radio de esta espiral para valores de campo de baja intensidad es grande y la frecuencia pequeña, mientras que para un campo magnético fuerte el radio es pequeño y la frecuencia grande. Las partículas se acercan a las regiones polares donde la intensidad del campo es alta y, a medida que aumentan su frecuencia de giro, giran en espiral a lo largo de órbitas más estrechas y pequeñas alrededor de una línea de campo particular. Después de que se reflejan en los 'puntos espejos', se despliegan a lo largo de las líneas de campo hacia el plano ecuatorial a medida que disminuye la frecuencia de giro y aumenta el radio de su órbita.

Con radios de órbita más grandes, las partículas comienzan a experimentar los efectos de los 'gradientes' o cambios en la intensidad del campo magnético entre las líneas de campo contiguas, y esto produce una fuerza de gradiente que hace que las partículas fluyan de manera constante y continua a las líneas de campo próximas.

La dirección de este flujo es hacia el Oeste para los iones con carga positiva, y hacia el Este para los electrones y las partículas con carga negativa. Estos flujos de partículas forman la **Corriente Anillo Ecuatorial**, la cual fluye hacia el Este alrededor de la Tierra, y se encuentra centrada en el plano ecuatorial magnético a una distancia entre 2 y 9 radios terrestres, en la región de los Cinturones de Radiación de Van Allen.

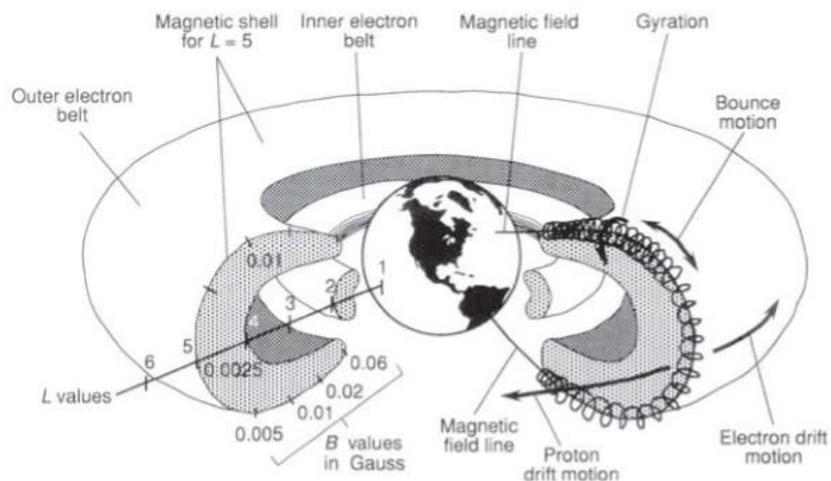


Figura 2.4. Diagrama tridimensional de los Cinturones de Radiación (Mitchell, 1994). Imagen adaptada de (Bothmer & Daglis, 2007).

2.4. El viento solar

El Sol emite plasma altamente conductor en el espacio interplanetario como resultado de la expansión supersónica de la corona solar. Este plasma se llama viento solar. Fluye con una velocidad supersónica de aproximadamente 500 km/s y se compone principalmente de electrones y protones, con una mezcla de iones de helio en un 5% (partículas alfa). El campo magnético del

Sol, está "congelado" en el plasma y es arrastrado hacia afuera por el viento solar en expansión (Baumjohann et al., 2010).

2.5. La magnetosfera

La interacción del viento solar con el CMT forma la **magnetosfera**, término que fue acuñado por T. Gold en 1959 para describir la región sobre la ionósfera en la que el CMT controla los movimientos de las partículas cargadas. Un esquema de la magnetosfera se muestra en la Figura 2.5. El límite de la cavidad magnetosférica se llama **magnetopausa**, su tamaño y forma se puede calcular a partir de la suposición de equilibrio entre la presión del CMT y la presión dinámica incidente del viento solar. Esto ocurre aproximadamente a 10 radios terrestres a lo largo de la línea que conecta los centros de la Tierra y el Sol. La magnetopausa separa el geoespacio de las regiones exteriores donde domina el plasma del viento solar. En contraste con la compresión que ocurre del lado diurno, del lado nocturno las líneas del Campo Magnético de la Tierra se extienden en una estructura alargada a más de 100 radios terrestres llamada **magnetocola**. Un arco de choque a unos aproximadamente 5 radios terrestres del lado diurno de la magnetopausa, ralentiza el flujo incidente. El plasma perturbado, lento y desviado entre el arco de choque y la magnetopausa se denomina **magnetovaina**. Cuando el campo magnético interactúa con el viento solar, lo hace a través del viento alterado en la magnetovaina.

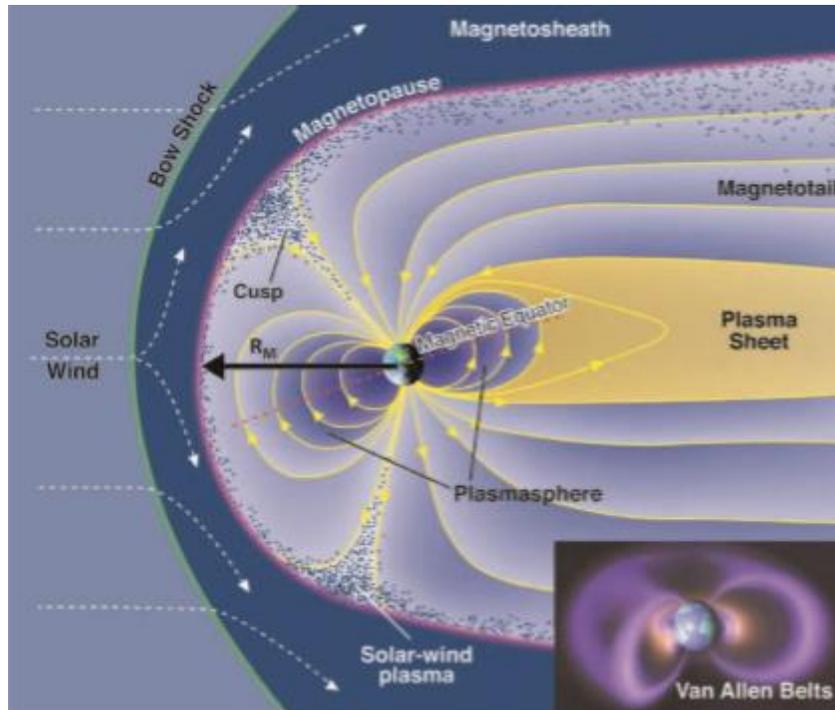


Figura 2.5. Esquema de la magnetosfera. Imagen adaptada de (McFadden, Weissman, & Johnson, 2007).

2.5.1. Reconexión magnética

Dungey (1961) fue el primero en reconocer que la magnetopausa no es en su totalidad una barrera para el viento solar, y que la topología del campo magnetosférico está también controlada por su interconexión, o **reconexión magnética** con el Campo Interplanetario que es el campo magnético proveniente del Sol. Cuando el Campo Interplanetario (IMF) está orientado hacia el Norte, paralelo al campo dipolar de la Tierra en el Ecuador, produce una configuración magnéticamente cerrada de la magnetosfera. Mientras que el IMF hacia el Sur, que es antiparalelo al campo dipolar de la Tierra en el Ecuador, produce una configuración magnéticamente abierta permitiendo que los campos de las regiones polares de la Tierra se conecten con el IMF, como se muestra en la Figura 2.6. Estas diferencias afectan en gran medida la transferencia de energía y de partículas del viento solar al geoespacio. En el caso del IMF

orientado hacia el Norte, la magnetopausa se asemeja a un límite viscoso para la interacción con el viento solar, produciendo un intercambio mínimo de partículas y energía. En el caso de la orientación hacia el Sur, las partículas cargadas en el espacio interplanetario tienen acceso a las regiones polares a través de las líneas del IMF.

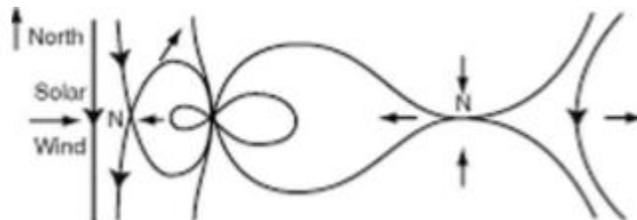


Figura 2.6. El IMF orientado hacia el Sur puede reconectarse con el Campo Geomagnético en el lado diurno de la magnetopausa. Adaptado de (Mc Fadden, Weissman & Johnson, 2007)

2.6. Corrientes eléctricas

Las corrientes eléctricas en la magnetosfera y en la ionósfera fluyen en gran parte debido a la interacción del CMT con el viento solar. Cambios en la presión del viento solar en escalas de tiempo de minutos y días afectan el tamaño de la magnetosfera y la fuerza de las corrientes de la magnetopausa que separa los campos magnéticos interplanetario y terrestre. Variaciones en la fuerza y orientación del IMF en escalas de tiempo de minutos y horas controlan el nivel de interconexión entre el medio interplanetario y el campo terrestre, modificando la estructura y circulación dentro de la magnetosfera (Milan et al., 2017).

2.6.1. Corrientes ionosféricas

Desde el punto de vista de la electrodinámica, la ionósfera está gobernada esencialmente por el campo magnético terrestre y el campo eléctrico que se genera en ella como consecuencia de las diferentes frecuencias de colisión con las moléculas neutras que presentan los electrones y

los iones. De acuerdo con esto, el viento neutro, gobernado por los gradientes de presión y la fuerza de Coriolis (despreciable a bajas latitudes), arrastra de manera diferencial a las partículas cargadas en el interior del campo magnético terrestre, dando origen a corrientes y campos eléctricos. Este mecanismo, se conoce como dínamo terrestre (Hurtado de Mendoza, 1997).

El sistema de corriente creado por el movimiento de marea de la atmósfera de la Tierra a altitudes típicas de 100-130 km se llama la corriente solar silenciosa o **Corriente S_q** . Este sistema de corriente crea variaciones magnéticas diarias en superficie. La corriente S_q forma dos vórtices, uno en el hemisferio Norte y otro en el hemisferio Sur, que se tocan en el Ecuador Geomagnético y forman una corriente extendida en la ionósfera, similar a un chorro, el **Electrojet Ecuatorial** (Baumjohann et al., 2010).

La presencia del campo geomagnético hace que la conductividad eléctrica de la ionósfera sea anisótropa. La razón básica de la existencia del electrojet es que la conductividad eléctrica en la dirección paralela al campo magnético, es mucho mayor que en el plano normal a la misma. El campo eléctrico este-oeste generado por la dínamo produce un campo eléctrico de polarización vertical que apunta hacia arriba durante el día y, con la misma magnitud, aproximadamente, apunta hacia abajo durante la noche; dicho campo vertical, casi dos órdenes de magnitud mayor que el campo este-oeste, produce una velocidad de deriva de los electrones con dirección este-oeste durante el día y oeste-este durante la noche (contraelectrojet); además, la velocidad de deriva del plasma durante la noche resulta ser del mismo orden de magnitud que durante el día, pero la corriente eléctrica es mucho menor debido a la baja densidad electrónica (Hurtado de Mendoza, 1997).

Los observatorios situados a lo largo del Ecuador Magnético han observado que el rango de variación diaria de la componente H en el Ecuador es mayor en un factor de 2 a 2.5,

comparada con las mediciones de otras estaciones ubicadas varios grados más allá del Ecuador. Esa diferencia se debe al Electrojet Ecuatorial que fluye principalmente en la capa E de la ionósfera.

El campo eléctrico del viento solar en regiones donde el campo magnetosférico presenta una configuración abierta, en latitudes altas, agita la ionósfera polar de modo que los iones y electrones ionosféricos son arrastrados sobre los casquetes polares y luego forzados a fluir a latitudes más bajas. El movimiento diferencial de los iones y electrones causado por colisiones entre partículas atmosféricas e ionosféricas, junto con los campos eléctricos y magnéticos que controlan el movimiento, conducen a una corriente ionosférica. Esta corriente es conocida como **Electrojet Auroral** y su fuerza depende de la combinación del campo eléctrico del viento solar y del nivel de ionización de la ionósfera.

2.6.2. Corrientes magnetosféricas

La magnetopausa separa el campo magnético más débil en la magnetovaina del campo más fuerte dentro de la magnetosfera, en donde fluye la corriente de la magnetopausa o **Corriente de Chapman-Ferraro**, con una densidad de aproximadamente 10^{-6}Am^{-2} desde el amanecer hasta el anochecer en la nariz de la magnetosfera y desde el anochecer hasta el amanecer a través de la magnetocola de la magnetopausa (Chapman & Ferraro, 1931). La corriente total que fluye en la magnetopausa es del orden de 10 MA.

En la sección Norte de la magnetocola, las líneas de campo apuntan generalmente hacia el Sol, mientras que en la sección Sur, la orientación se invierte. Estas regiones se denominan lóbulos Norte y Sur, y están separadas por una capa de corriente eléctrica, la **Hoja de Corriente Neutra** de la magnetocola, llamada así por el campo magnético que contiene, si bien no es cero, es débil, del orden de 1 a 5 nT. Fluye generalmente desde el amanecer hasta el anochecer cerca

del ecuador de la magnetocola, en la hoja de plasma neutra compuesta por un plasma de iones-electrones casi neutro de aproximadamente 1–10 keV. La corriente en la cola de la magnetopausa se alimenta adicionalmente por la corriente en la lámina neutra de la magnetocola.

La **Corriente Anillo**, de la cual se habló en la Sección 2.3.2, es una corriente eléctrica en forma toroidal que fluye hacia el Este alrededor de la Tierra centrada en el plano ecuatorial con una densidad variable y una existencia permanente. Su intensidad en tiempos calmos es de $\sim 1\text{-}5$ nA/m² (Lui & Hamilton, 1992) mientras que en los tiempos de tormenta puede llegar a 50 nA/m² (Vallat et al., 2005).

Constituyendo un circuito de corriente gigante de 1–10 MA, puede alterar significativamente el campo terrestre incluso en la superficie de la Tierra (Kamide et al., 1998; Daglis et al., 1999). La Corriente Anillo consiste de iones y electrones con energías que cubren un rango de 1 a 400 keV. Las principales especies de iones son H⁺, He⁺ y O⁺. Las dos fuentes principales de partículas de la Corriente Anillo son la ionósfera y el viento solar. (N. Ganushkina et al., 2017).

2.7. Actividad solar

El Sol es la principal fuente de energía de nuestro Sistema Solar y la principal fuente de clima espacial.

La acción del Sol sobre la Tierra se realiza a través de su campo gravitatorio, la radiación electromagnética y la emisión continua de materia de su corona, el viento solar. Las características de la radiación electromagnética del Sol y el viento solar dependen estrechamente de su nivel de actividad, que tiene una componente cíclica y otra esporádica. La morfología de la superficie del Sol varía con un ciclo de aproximadamente 11 años que se denomina Ciclo Solar. El incremento de actividad se expresa por un aumento del número de manchas en la fotosfera

(superficie visible) y por la presencia de un mayor número de fenómenos violentos que constituyen la actividad esporádica. Las manchas solares son zonas que aparecen oscuras, ya que su temperatura, unos 4500 K, es inferior a la del entorno, próxima a 6000 K. El número de manchas solares ha sido medido desde 1849 a partir de una fórmula empírica definida por Rudolf Wolf (1816-1893). Los promedios mensuales de este número de 10 a más de 100, y hasta 200 revelan un claro ciclo de 11 años. Los ciclos de actividad solar se numeran sucesivamente por iniciativa de Wolf, quien asignó el número 1 al periodo 1755-1766.

Durante el máximo de actividad solar, las principales estructuras liberadas por el Sol son las eyecciones de masa coronal (CMEs), las cuales son explosiones de material caliente, plasma, observado como una nube de partículas magnetizadas lanzadas al espacio que puede tardar hasta tres días en llegar a la Tierra. En el medio interplanetario, reciben el nombre de ICMEs. En las fases de disminución y mínimo de la actividad solar, los agujeros coronales del Sol son los fenómenos relevantes, los mismos liberan corrientes de viento solar a gran velocidad, que interactúan con el viento solar lento, formando estructuras interplanetarias llamadas regiones de interacción de rotación (CIRs). Tanto las ICMEs como las CIRs pueden originar tormentas geomagnéticas cuando alcanzan la magnetósfera de la Tierra (Guarnieri et al., 2006). En las Figuras 2.7 y 2.8 se aprecian las CMEs que originaron las tormentas geomagnéticas que se estudiaron en este trabajo.

Las CMEs y las llamaradas solares o flares son dos tipos de tormentas solares que a veces ocurren al mismo tiempo, de hecho, los flares más intensos están correlacionados con las CMEs. Los flares son intensas explosiones de radiación, provenientes de la liberación de energía magnética asociada con las manchas solares. Estos destellos de luz, pueden durar de minutos a horas y viajan a la velocidad de la luz tardando ocho minutos en llegar a la Tierra. Las

fulguraciones solares son clasificadas por su manifestación en emisión de radiación X como: A, B, C, M o X, acorde al pico del flujo (en Watts por metro cuadrado, W/m^2) de rayos X.

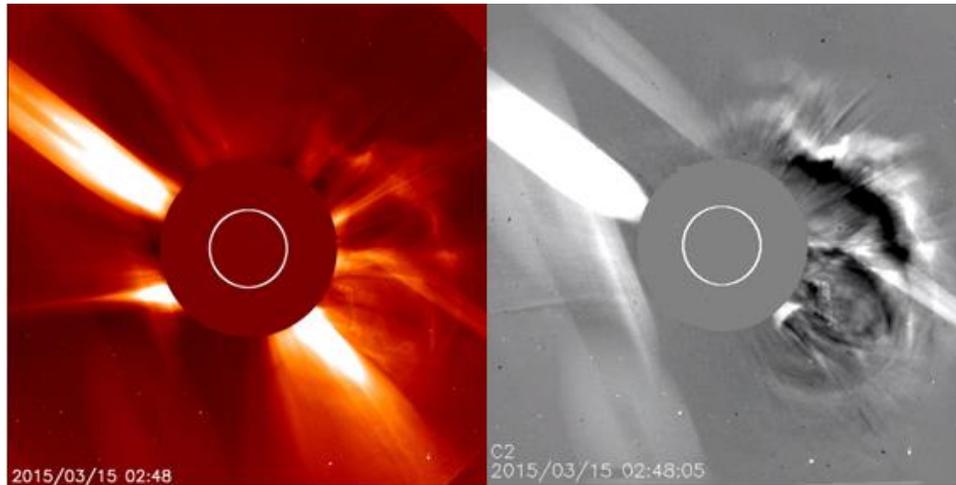


Figura 2.7. CME observada por el satélite SOHO el 15/03/2015. Llegó a la Tierra dos días después. Imagen adaptada de <https://soho.nascom.nasa.gov/data/realtime/mpeg/>

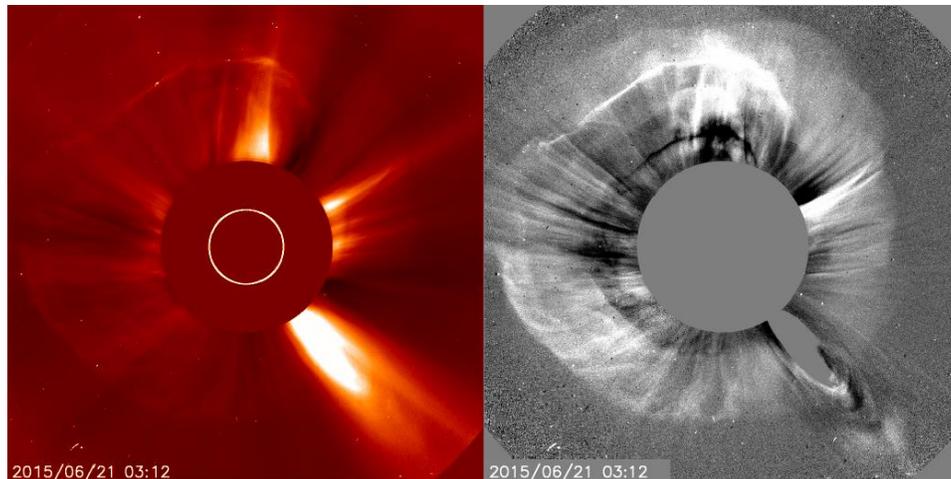


Figura 2.8. CME del 21/06/2015, observada por el satélite SOHO. Las CME dirigidas a la Tierra como ésta se denominan CME de halo, porque el material que sale disparado del Sol parece un anillo alrededor de su disco. Imagen adaptada de <https://www.nasa.gov/image-feature/sun-releases-cme-on-june-21-2015>

2.8. Tormenta geomagnética

El término *tormenta geomagnética* fue usado por primera vez por Chapman y Bartels (1940) para describir las perturbaciones en la magnetosfera y en la ionósfera. Ellos creían que las tormentas eran causadas por corrientes esporádicas provenientes del Sol. Más tarde se comprobó que el viento solar es emitido de forma continua (Parker, 1958), y que su interacción con el CMT origina la magnetosfera. Durante las tormentas geomagnéticas se produce un incremento de la presión del viento solar sobre el CMT.

No todas las eyecciones de masa coronal producen tormentas geomagnéticas en la Tierra. Para que ocurra deben cumplirse tres condiciones (Gonzalez et al., 1994; Sarachaga et al., 2014): (i) que la tormenta solar sea suficientemente energética, alcanzando la clase X o valores elevados de la clase M, es decir, con picos en el flujo de emisión de radiación X de 10^{-5} - 10^{-4} W/m² para ser clase M, o de 10^{-4} - 10^{-3} W/m² para ser de clase X. (ii) Que la eyección de masa coronal esté dirigida hacia la Tierra, lo que requiere que la región activa donde se encuentran las manchas

solares en las que se inicia el proceso esté situada en la cara del Sol visible desde la Tierra. (iii) que la componente B_z del IMF dirigida por el viento solar este orientada hacia el Sur, de manera que se puedan acoplar las líneas de este campo con las de la Tierra. Cuando esto último ocurre, el lado diurno de la magnetosfera se contrae, la magnetocola se estira y comienza a oscilar. En ese entorno inestable, los electrones en el espacio cercano a la Tierra fluyen rápidamente por las líneas de campo magnético hacia los polos de la Tierra. Allí, interactúan con las partículas de oxígeno y nitrógeno en la atmósfera superior, liberando fotones, que crean las franjas de luz en el cielo conocidas como auroras boreales en el hemisferio Norte y auroras australes en el hemisferio Sur, permitiendo observarlas en latitudes menores a lo normal. Las Figuras 2.9 y 2.10 son imágenes de auroras observadas durante las tormentas estudiadas.



Figura 2.9. Aurora boreal observada al sur de Gales el 17 de marzo de 2015. Adaptada de https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/aurora-image-gallery/index.html



Figura 2.10. Aurora austral en Queenstown, Nueva Zelanda. 23 de junio de 2015. Adaptada de <http://blog.nuestroclima.com/las-auroras-boreales-de-las-ultimas-horas/>

2.8.1. Fases de una tormenta

Una tormenta geomagnética tiene cuatro fases (Parkinson, 1983), las cuales se describen a continuación y se muestran esquemáticamente en la Figura 2.11:

- *Comienzo brusco de tormenta (SSC: Sudden Storm Commencement)*: Puede haber tormenta sin que aparezca el SSC, sin embargo la mayoría de las tormentas comienzan con un salto abrupto en la componente horizontal H , generalmente un incremento. Antes del SSC las curvas de todas las componentes del Campo Geomagnético son comparativamente estables, después del SSC están más perturbadas, a menudo con fluctuaciones irregulares del orden de los 10 nT y períodos del orden de unos pocos minutos. A veces, un incremento inicial pequeño en H es seguido por un gran decrecimiento durante unos dos o tres minutos.

- *Fase inicial*: Se caracteriza por un aumento en la densidad de líneas de campo debido al incremento de la presión del viento solar. Esto hace que el valor de la componente horizontal del

campo magnético terrestre aumente entre 30 y 50 nT su valor inicial antes de la tormenta. Esta variación puede durar una o dos horas, aunque en muchas tormentas no aparece.

- *Fase principal*: Como su nombre lo indica, es la esencia de la tormenta geomagnética y comienza de 2 a 10 horas después del SSC. En esta fase tiene lugar una inyección de plasma energizado en la Corriente Anillo Ecuatorial que provoca su aumento. Se produce un decrecimiento estable de H , generalmente de unos cientos de nT, que suele durar algunas horas. La amplitud del decrecimiento en H es máxima cerca del Ecuador, y decrece hacia los polos.

- *Fase de recuperación*: Después que el valor de la componente horizontal ha alcanzado su mínimo, lentamente y más o menos exponencialmente, recupera su valor normal. El proceso lleva varios días, un tiempo más prolongado que el decrecimiento durante la fase principal.

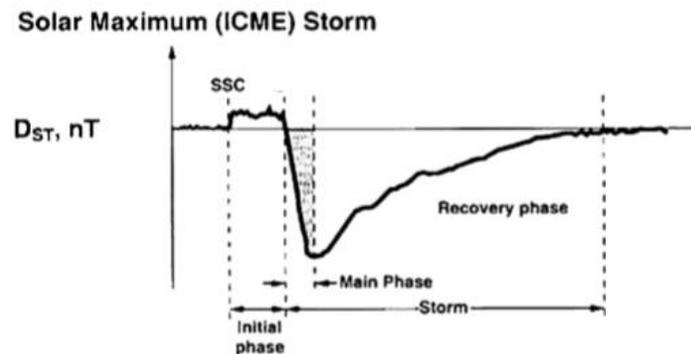


Figura 2.11. Perfil del índice D_{ST} durante las distintas etapas de una tormenta geomagnética. Adaptado de (Guarnieri et al., 2006).

Las tormentas geomagnéticas, incluidas las perturbaciones magnéticas polares que las acompañan, son causadas por tres sistemas de corriente: (i) El comienzo repentino de la tormenta (SSC) y la fase inicial se relacionan con un incremento en la intensidad de la Corriente Chapman-Ferraro en la superficie límite de la magnetosfera. (ii) La fase principal es causada por la

Corriente Anillo. (iii) Las perturbaciones magnéticas polares son causadas por las intensas corrientes ionosféricas, los Electrojet Aurorales (Syun-Ichi, 2018).

Al intensificarse la Corriente Anillo, se producen cambios en el Campo Geomagnético medido en la superficie de la Tierra. El incremento de la Corriente Anillo es responsable de las depresiones en la componente horizontal del Campo Magnético superficial de la Tierra, medida en latitudes medias.

2.8.2. Índice geomagnético *Dst*

El índice “Disturbance storm time” (*Dst*) se utiliza para caracterizar las tormentas geomagnéticas (ver Tabla 2.1). El valor de *Dst* es estadísticamente cero en los días considerados tranquilos por los organismos internacionales. Al llegar la ICME, la compresión de la magnetósfera y el incremento de partículas del viento solar que la atraviesan se aprecia como un impulso positivo repentino en el índice *Dst*. Seguido de este impulso, el período de incremento del *Dst*, que puede durar unas pocas horas, es la fase inicial de la tormenta. Luego, si al llegar a la magnetosfera el IMF orientado hacia el Sur, mantiene una gran amplitud por un tiempo prolongado, se producen importantes inyecciones de partículas en la Corriente Anillo causando la disminución del *Dst* hasta su valor mínimo. Posteriormente vuelve lentamente a los niveles pre-tormenta, hasta alcanzar el valor inicial próximo a cero durante la fase de recuperación (ver Figura 2.11).

El *Dst* se calcula a partir del valor promedio de la perturbación en la componente horizontal del CMT en cuatro observatorios geomagnéticos: Hermanus (HER), Honolulu (HON), Kakioka (KAK) y San Juan (SJG), los cuales se observan en la Figura 2.12, ubicados en latitudes medias lo suficientemente distantes de los Electrojets Auroral y Ecuatorial, para minimizar las influencias de estas fuentes y evidenciar el efecto de la Corriente Anillo.

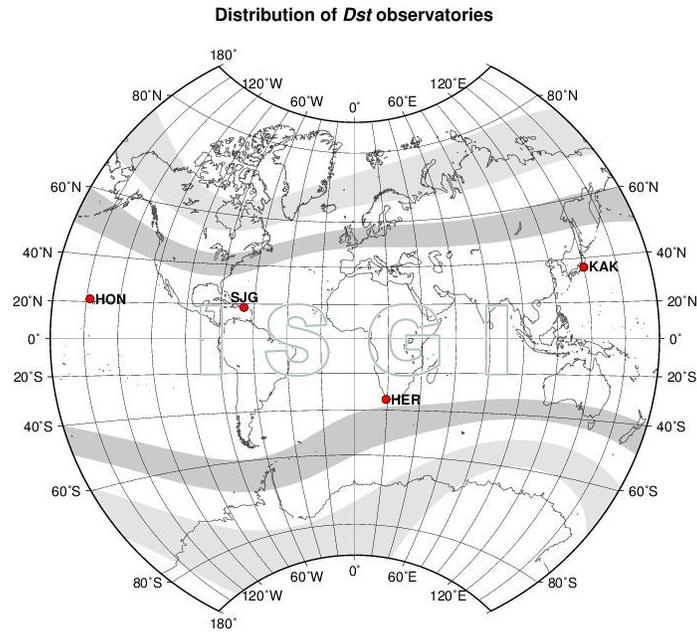


Figura 2.12. Distribución de los observatorios geomagnéticos a partir de los cuales se calcula el índice *Dst*. Adaptado de http://isgi.unistra.fr/indices_dst.php

Tabla 2.1
Clasificación de las tormentas geomagnéticas en función del índice Dst.

| Categoría | Valor <i>Dst</i> (nt) |
|------------------|------------------------------|
| Débiles | $-30 > Dst > -50$ |
| Moderadas | $-50 > Dst > -100$ |
| Intensas | $-100 > Dst$ |

Se requiere una serie de pasos para aislar la perturbación de la Corriente Anillo en los registros de la componente *H*. El cálculo del índice *Dst* está determinado por la fórmula:

$$Dst(T) = \frac{1}{4} \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta H_i}{\sum_{i=1}^4 \cos \theta_i} \quad (2.8)$$

donde ΔH_i representa la variación en la componente horizontal observada en cada uno de los cuatro observatorios, sin las contribuciones de la variación secular debida al Campo Magnético de Origen Interno y la variación del día calmo. Las variaciones se transforman en su equivalente ecuatorial al dividir por los cosenos de las latitudes geomagnéticas de los observatorios, representadas por θ_i .

Para el año en cuestión se calcula un valor promedio anual de la componente H , calculado con los valores medios diarios de los cinco días internacionales más quietos de cada mes. Luego este procedimiento se repite a los cuatro años anteriores y se ajusta un polinomio de segundo orden con los cinco puntos. La parábola resultante representa la variación secular y se denomina línea de base H_0 .

La variación diurna se determina en tiempo local T y mes M con la serie de Fourier:

$$S_q(T, M) = \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 A_{mn} \cos(mT + \alpha_m) \cos(nM + \beta_n) \quad (2.9)$$

Los coeficientes A_{mn} , α_m y β_n se obtienen por un ajuste de mínimos cuadrados a curvas $S_q(T)$ promedio, determinadas con los cinco días más quietos de cada mes. El resultado es un valor de S_q para cada hora y mes del año. Dado que no se puede obtener de forma exacta el comportamiento de S_q para un día determinado, el método estadístico es el más apropiado.

Por lo tanto, para obtener el índice Dst por medio de la Ecuación 2.8, el $\Delta H(T)$ en un día particular resulta ser:

$$\Delta H(T) = H(T) - H_0(T) - S_q(T, M) \quad (2.10)$$

La clasificación de las tormentas geomagnéticas en función del *Dst* y la ecuación para el cálculo del índice se encuentran en el sitio web <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

2.9. Índice geomagnético *SYM-H*

El índice *SYM-H* se calcula cada un minuto, considerándose como una versión de alta resolución del *Dst* (Sugiura & Poros, 1971). Los índices geomagnéticos, específicamente el *Dst* y el *SYM-H*, sugieren una manera simple y efectiva de estimar la energía total contenida en la Corriente Anillo. Debido a la cobertura casi continua de ambos índices durante un período de tiempo sustancial, el uso de los mismos plantea un método ideal para medir variaciones en la Corriente Anillo (Sandhu et al. 2018).

Las estaciones de magnetómetros terrestres distribuidas uniformemente en longitud y en el rango de $\pm 10^\circ$ – 50° de latitud magnética (Figura 2.13), contribuyen al índice *SYM-H*.

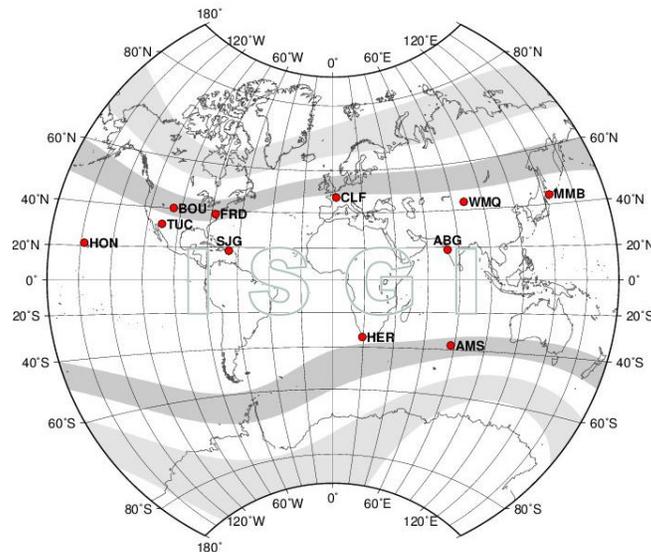


Figura 2.13. Observatorios geomagnéticos a partir de los cuales se calcula el índice *SYM-H*. Adaptado de http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php

2.10. Índice geomagnético k_p

Otro índice geomagnético utilizado para medir el tamaño de las tormentas geomagnéticas, es el índice k . Es un índice trihorario, que proporciona ocho valores diarios y permite evaluar de forma cuantitativa una perturbación magnética vinculada a la emisión corpuscular del Sol. Para calcular k se utilizan los magnetogramas, que son registros diarios del campo magnético obtenidos en los observatorios geomagnéticos. En el magnetograma se toman las componentes H y D y se eliminan las variaciones magnéticas debidas al Sol en condiciones tranquilas y a la Luna. Después se divide el magnetograma en ocho intervalos de tres horas, se mide la amplitud de variación de H y D y el mayor valor proporciona el índice k . La escala de k varía de 0 a 9 y depende de la latitud, ya que la perturbación será mayor cuanto más cerca esté el observatorio de las zonas aurorales. El índice k_p (Sarachaga et al., 2014) es un indicador de alcance planetario (ver Tabla 2.2) derivado del parámetro k . Se obtiene como el valor medio de los índices k normalizados de 13 observatorios situados entre los 44° y 60° de latitud, Norte o Sur. Este índice se relaciona estadísticamente con el estado energético de la magnetosfera y con el tamaño de las tormentas magnéticas dado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en el sitio web <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scale-explanation>.

Las tormentas estudiadas para esta tesis corresponden a la categoría de tormentas intensas de acuerdo con la clasificación de la Tabla 2.1, dado que para la tormenta del 17 de marzo del 2015 el valor mínimo de Dst fue de -222 nT, y en la del 22-23 de junio el mínimo alcanzó los -204 nT. Las tormentas analizadas alcanzaron un valor $k_p = 8$, considerándolas por lo tanto como severas.

Vale aclarar que al evento de Carrington (septiembre 1859) y a la tormenta de Quebec (marzo 1989) se les han atribuido valores de *Dst* iguales a -850 nT y -640 nT respectivamente.

Tabla 2.2
Clasificación de las tormentas geomagnéticas según NOAA en función del valor del índice Kp.

| Escala | Categoría | Valor de kp | Frecuencia |
|---------------|------------------|------------------------------------|--|
| | | <i>Determinado cada tres horas</i> | <i>Número de tormentas para el kp señalado 1 ciclo = 11 años</i> |
| G5 | Extremo | 9 | 4 por ciclo |
| G4 | Severo | 8 | 100 por ciclo |
| G3 | Fuerte | 7 | 200 por ciclo |
| G2 | Moderado | 6 | 600 por ciclo |
| G1 | Menor | 5 | 1700 por ciclo |

La agencia estadounidense NOAA estima que en un Ciclo Solar puede haber cuatro tormentas geomagnéticas extremas, cien severas y doscientas fuertes. En los casos de las tormentas más extremas, los transformadores en las redes eléctricas pueden dañarse, el funcionamiento de las naves espaciales y el seguimiento de satélites pueden verse obstaculizados, los sistemas de propagación por radio de alta frecuencia y de navegación por satélite pueden bloquearse, y las auroras pueden aparecer en latitudes menores a lo normal.

Capítulo 3

Van Allen Probes

3.1. La misión en su inicio

La misión Van Allen Probes (RBSP) fue lanzada por la NASA el 30 de Agosto de 2012. Se trata de dos naves espaciales con instrumentos idénticos. Operaban en órbitas elípticas con una inclinación de $\sim 10^\circ$, perigeos con ~ 600 km de altitud y apogeos de ~ 5.8 radios terrestres. El período orbital era de ~ 9 h., el de rotación ~ 12 segundos, con el eje de rotación apuntando aproximadamente en la dirección del Sol. Proporcionaban mediciones de partículas y del campo en el interior de la magnetosfera, recorriendo órbitas casi idénticas. Ambas sondas se muestran esquemáticamente en la Figura 3.1.

La misión Van Allen Probes tenía la capacidad de medir flujos de partículas cargadas en ambos cinturones de Van Allen en un amplio espectro de energía y con gran precisión, brindando mediciones con mejor resolución espacial y temporal que misiones anteriores.

3.2. La misión en la actualidad

Actualmente, ambas naves se encuentran iniciando la última fase de su exploración. Se ha comenzado con las maniobras para desorbitarlas, trasladándolas a un nuevo perigeo inferior, quedando las naves con suficiente combustible para mantener sus paneles solares apuntando al Sol durante un año más aproximadamente.

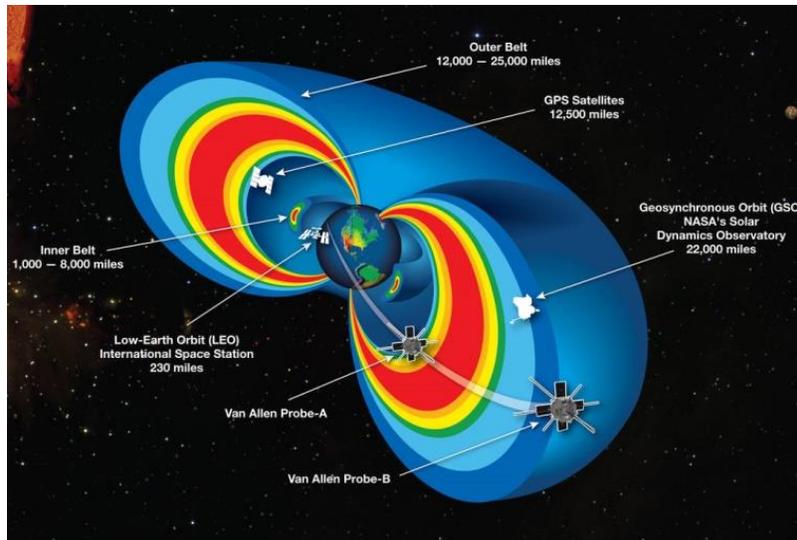


Figura 3.1. Las sondas Van Allen orbitando los Cinturones de Radiación. Imagen adaptada de https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/images/index.html

3.3. El futuro de la misión

Durante su último año de vida, las sondas Van Allen continuarán recopilando datos sobre los Cinturones de Radiación de la Tierra. También proporcionarán una nueva visión de cómo el oxígeno en la atmósfera superior de la Tierra puede degradar los instrumentos satelitales, información que podría ayudar a los ingenieros a desarrollar diseños más resistentes en el futuro.

En el 2034 alcanzaran una órbita circular y reingresaran a la atmósfera de la Tierra para desintegrarse.

3.4. RBSPICE

El Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE) presentado en la Figura 3.2, es uno de los cinco instrumentos a bordo de ambas naves, mide iones en un rango de energías que va de 20 keV a 1 MeV aproximadamente y electrones con energías entre 25 keV

y 1 MeV. RBSPICE brinda información sobre la composición (cantidad de protones, helio y oxígeno) de la Corriente Anillo.

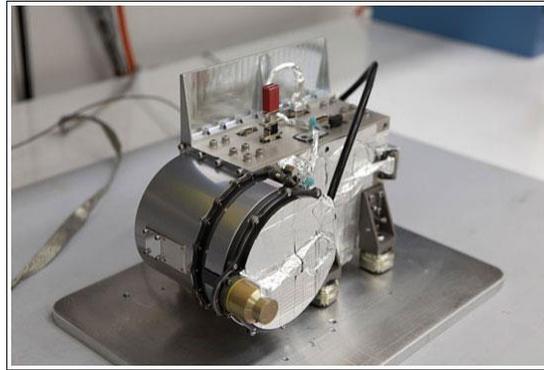


Figura 3.2. RBSPICE. Imagen adaptada de https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/spacecraft/index.html

3.5. Datos utilizados

Para la presente tesis se utilizaron las mediciones de RBSPICE a bordo de la sonda RBSP-B. Se trabajó con datos correspondientes a los meses de marzo y junio de 2015, los cuales fueron descargados del sitio web de la NASA: <https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/rbsp/>. Los mismos vienen en formato cdf y para poder ser leídos en MATLAB se obtuvieron los paquetes desde el sitio web <https://cdf.gsfc.nasa.gov/>. Se utilizaron las mediciones de flujos omnidireccionales de partículas, con 14 canales para los protones cuyo rango de energías es de ~ 45 a ~ 598 keV, con 8 canales para los iones O^+ con un rango de energías de ~ 142 a ~ 870 keV, y por último, 11 canales para los iones He^+ con energías de ~ 65 a ~ 870 keV (ver Tabla 3.1). Los rangos de energía del instrumento son adecuados para observar la población de la Corriente

Anillo, que está dominada por iones con energías desde decenas a unos pocos cientos de keV (Daglis et al., 1999).

También se emplearon los valores de los índices *Dst* y *SYM-H* correspondientes a marzo y junio de 2015 en los análisis y cálculos que se describen en los próximos capítulos. El *Dst* se obtuvo del sitio web http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/ y el *SYM-H* de https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html.

Tabla 3.1
Canales de energía de RBSPICE.

| Ion | Canal de energía (keV) | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| H⁺ | 44,7 | 54,7 | 67,1 | 81,6 | 99,4 | 121,2 | 147,8 | 180,5 | 220,5 | 268,9 | 327,6 | 400,1 | 488,9 | 597 |
| He⁺ | 65 | 85 | 110 | 142 | 184 | 238 | 309 | 400 | 518 | 671 | 870 | | | |
| O⁺ | 142 | 184 | 238 | 309 | 400 | 518 | 671 | 870 | | | | | | |

Capítulo 4

Análisis espacial y temporal de los datos

4.1. Actividad geomagnética en el Ciclo Solar 24

La actividad geomagnética durante el Ciclo Solar 24 (diciembre 2008 – finales de 2019) ha sido la más débil en los últimos 100 años con su pico a principios de 2014 (Pesnell, 2016). Se han registrado seis tormentas en el 2012, cinco tormentas en el 2015 y solo tres tormentas entre el 2013 y 2014 (Watari, 2017). De ellas, unas pocas han sido tormentas geomagnéticas intensas con un *Dst* por debajo de -100 nT, y solo dos eventos principales con un *Dst* por debajo de -200 nT se registraron entre el 2010 y el 2018 (Astafyeva et al., 2018).

4.1.1. La tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015

La tormenta más fuerte del Ciclo Solar 24 fue provocada por dos flares de tipo C el 14 y 15 de marzo de 2015, probablemente fueron las fuentes de dos CME de halo que llegaron a la Tierra el 17 de marzo alrededor de las 04:30 TU y alrededor de las 18:00 TU, respectivamente (Liu et al., 2015). La llegada a la Tierra de una eyección de masa coronal a las 04:45 TU con una velocidad de propagación de ~ 668 km/s (Wu et al., 2016) provocó un comienzo repentino de la tormenta (SSC), marcado por un fuerte aumento en la velocidad y presión del viento solar. La velocidad del viento solar pasó de 400 km/s a 500 km/s (Habarulema et al., 2018). Impulsada por la reconexión magnética en el lado diurno entre el IMF hacia el Sur y el Campo Geomagnético, la magnetopausa se movió hacia adentro hasta una distancia de separación de la Tierra de 6.35 radios terrestres. Esta distancia es 2 radios terrestres más cercana a la Tierra de lo que se esperaría debido solo a los efectos de presión dinámica.

La Figura 4.1 muestra en el gráfico superior, las variaciones en la componente B_z del IMF (curva violeta) desde el 16/03/2015 al 22/03/2015 inclusive, dichos valores fueron

obtenidos del sitio web https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html y en el gráfico inferior, se muestran las variaciones en el índice *SYM-H* (curva verde) para el mismo período. También se indican en cada gráfico los comienzos de cada etapa de la tormenta. La recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase principal lo indica la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. La fase principal de la tormenta comenzó a las ~ 07:30 TU del 17 de marzo, cuando la componente B_z del IMF giró hacia el Sur por primera vez y el índice *SYM-H* comenzó a disminuir gradualmente. Poco después, la componente del IMF giró hacia el Norte durante ~ 40 minutos y se volvió nuevamente negativa a las ~ 08:30 TU. Fue positiva nuevamente de 10:10 TU a 12:20 TU y provocó un pequeño aumento en el índice *SYM-H* durante un breve tiempo. A partir de las 12:20 TU, la componente B_z del IMF volvió a girar hacia el Sur y permaneció así hasta el día siguiente. En consecuencia, el *SYM-H* continuó disminuyendo y alcanzó su valor mínimo de -233 nT a las 22:45 TU del 17 de marzo. Luego comenzó una fase larga de recuperación. El índice k_p tuvo su máximo de 8- desde aproximadamente las 12 TU hasta las 24 TU con un valor intermedio de 7+ entre las 18-21 TU del 17 de marzo (Astafyeva et al., 2015). La fase de recuperación de la tormenta duró varios días con un valor del *Dst* por debajo de -50 nT hasta finales de marzo (Morozova et al., 2019).

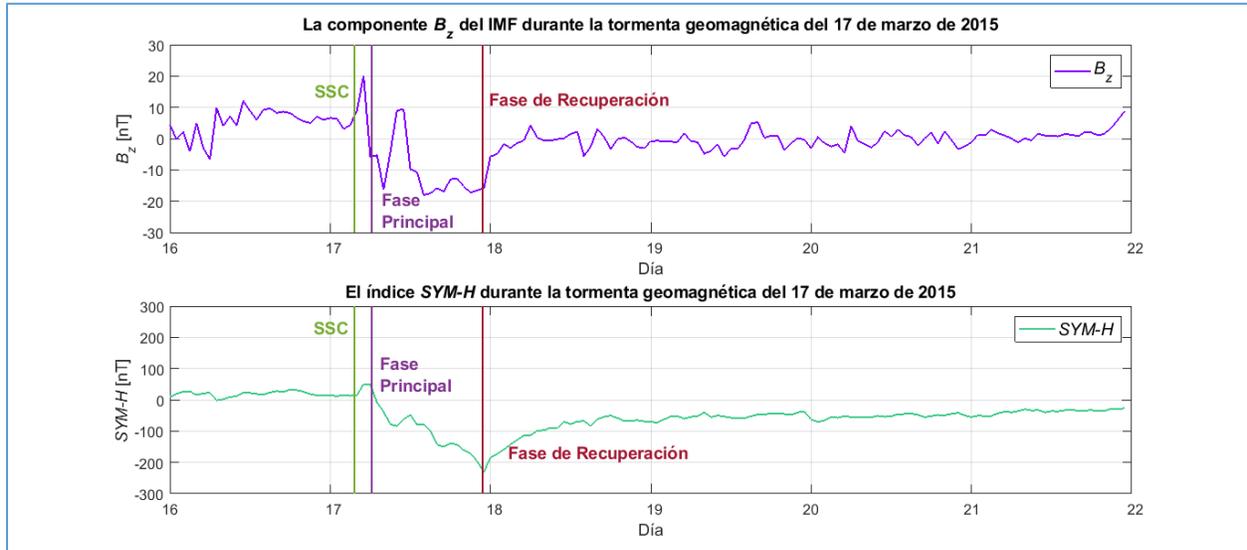


Figura 4.1. B_z del IMF (curva violeta en gráfico superior) y SYM-H (curva verde en gráfico inferior) durante la tormenta geomagnética desde el 16/03/2015 al 22/03/2015 inclusive. En ambos gráficos, la recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase principal lo indica la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo.

4.1.2. La tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015

Durante el período del 21 al 23 de junio de 2015, tres choques interplanetarios (IS) de diferentes intensidades llegaron a la Tierra. Estos IS se asociaron con eyecciones de masa coronal (Liu et al., 2015). Los primeros dos arribos IS que se observaron a las 16:45 TU del 21 de junio y a las 05:45 TU del 22 de junio se asociaron con una CME de halo y CME de halo parcial causadas por erupciones solares los días 18 y 19 de junio. El tercer IS, mucho más grande, que llegó a las 18:38 TU del 22 de junio se asoció con un CME gigante de halo completo que estalló durante una erupción M2 el 21 de junio y se propagó con una velocidad de 1209 km/s (Balasis et al., 2018). Los tres eventos IS estuvieron acompañados por cambios abruptos en la velocidad y densidad del viento solar y en la amplitud de las componentes del Campo Magnético Interplanetario. La CME del 22 de junio estuvo acompañada por incrementos significativos en la velocidad del viento solar de ~ 450 km/s a ~ 700 km/s, y en la densidad de protones de 10 a 58

n/cm^3 . Con la llegada del tercer choque, la componente B_z del IMF se intensificó y se dirigió hacia el Sur, lo que condujo a una reconexión magnética y al desarrollo de una fuerte tormenta geomagnética, con un valor mínimo del índice $SYM-H$ de -207 nT alcanzado a las $\sim 05:30$ TU el 23 de junio.

La Figura 4.2 muestra en el gráfico superior, las variaciones en la componente B_z del IMF (curva violeta) desde el 21/06/2015 al 27/06/2015 inclusive, y en el gráfico inferior, se muestran las perturbaciones en el índice $SYM-H$ (curva verde) para el mismo período. También se indican en cada gráfico los comienzos de cada etapa de la tormenta. La recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase inicial lo indica la recta naranja, el de la fase principal la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. En términos de variaciones del índice $SYM-H$, la tormenta de junio de 2015 es la segunda tormenta más grande en el Ciclo Solar 24 (Astafyeva et al., 2017).

La tormenta tuvo su SSC el 22 de junio a las 18:38 TU, la fase inicial se desarrolló entre las ~ 19 y las 21 TU, posteriormente tuvo lugar la fase principal hasta que el índice Dst alcanzó su mínimo con un valor de -204 nT a las 04:30 TU del 23 de junio, siendo acompañado por una intensa actividad auroral (Astafyeva et al., 2016). Luego comenzó la fase de recuperación pero fue interrumpida en parte por una pequeña CME que llegó el 25 de junio, lo que resultó en otra disminución del Dst el 26 de junio (Pazos et al., 2019).

La componente B_z del IMF se dirigió hacia el Sur en la fase inicial de la tormenta el día 22 desde las 18:38 hasta ~ 20 TU, luego giró hacia el Norte durante aproximadamente una hora. Fue negativa nuevamente desde $\sim 20:55$ TU hasta las 21:15 TU y cerca de las 21:20 TU cambió a positiva permaneciendo así hasta las 00:50 TU del día siguiente (Astafyeva et al., 2018).

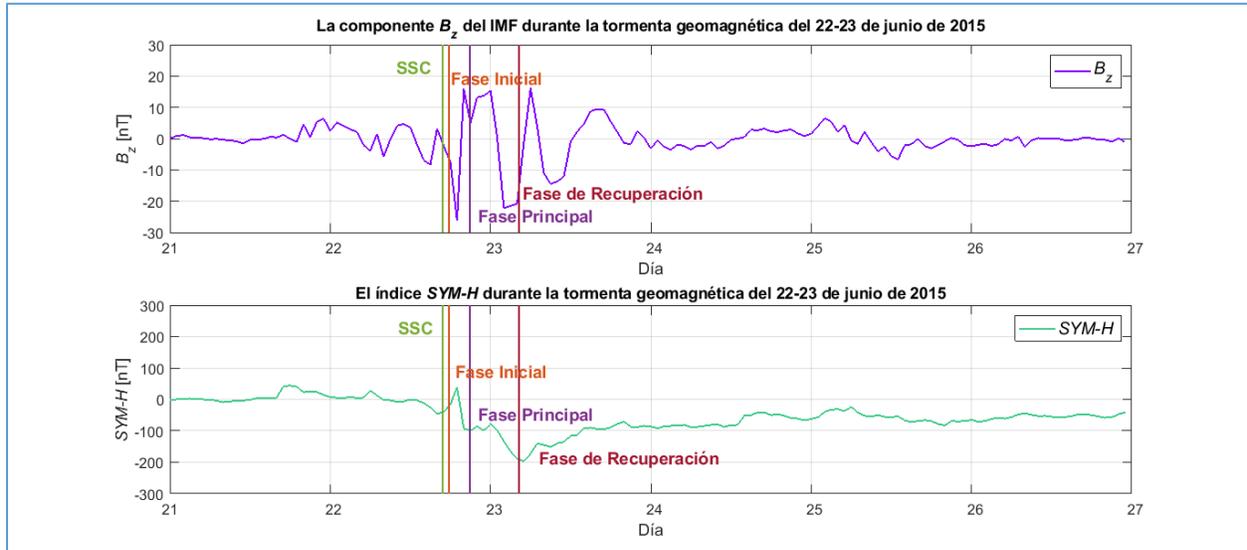


Figura 4.2. B_z del IMF (curva violeta en gráfico superior) y $SYM-H$ (curva verde en gráfico inferior) durante la tormenta geomagnética desde el 21/06/2015 al 27/06/2015 inclusive. En cada gráfico, la recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase inicial lo indica la recta naranja, el de la fase principal la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo.

4.2. Localización de las sondas RBSP durante las dos tormentas analizadas

El Sistema Geocéntrico Solar Magnetosférico (GSM) es uno de los sistemas más utilizados para estudiar las interacciones Tierra-Sol. El eje X está en la dirección Tierra-Sol, con su origen en el centro terrestre, positivo hacia el Sol. El eje Z positivo apunta hacia el Norte perpendicular a X y está siempre en el plano que contiene el eje dipolar y el eje X. El eje Y positivo apunta hacia el sector del atardecer.

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran la localización de las sondas RBSP en el GSM durante las tormentas analizadas en este trabajo. La Figura 4.3 presenta la ubicación de las sondas RBSP-A (punto rojo) y RBSP-B (punto azul) para el 17/03/2015 en el horario de las 4:45 TU, cuando la CME que originó la tormenta alcanzó la Tierra. Mientras que la Figura 4.4 muestra la ubicación de las sondas RBSP-A (punto rojo) y RBSP-B (punto azul) para el 22/06/2015 en el horario de las 18:30 TU, cuando tuvo lugar el SSC de la tormenta geomagnética.

El 17 de marzo de 2015, las sondas atravesaron tres veces el interior de la magnetosfera (plasmosfera y Corriente Anillo) en el sector previo a la medianoche, alcanzando un apogeo a ~ 4 h de distancia (Goldstein et al., 2016).

En el inicio de la tormenta de marzo, la sonda RBSP-A se ubicaba en el sector posterior a la medianoche a una distancia geocéntrica de aproximadamente 3 radios terrestres. Mientras que RBSP-B se localizaba en el sector posterior al anochecer y previo a la medianoche a una distancia radial geocéntrica ligeramente mayor. La sonda RBSP-B se encontraba saliendo del sector diurno, mientras que RBSP-A se encontraba ingresando al mismo (Baker et al., 2016) como se puede observar en la Figura 4.3, cuando una onda de choque interplanetaria golpeó la magnetosfera.

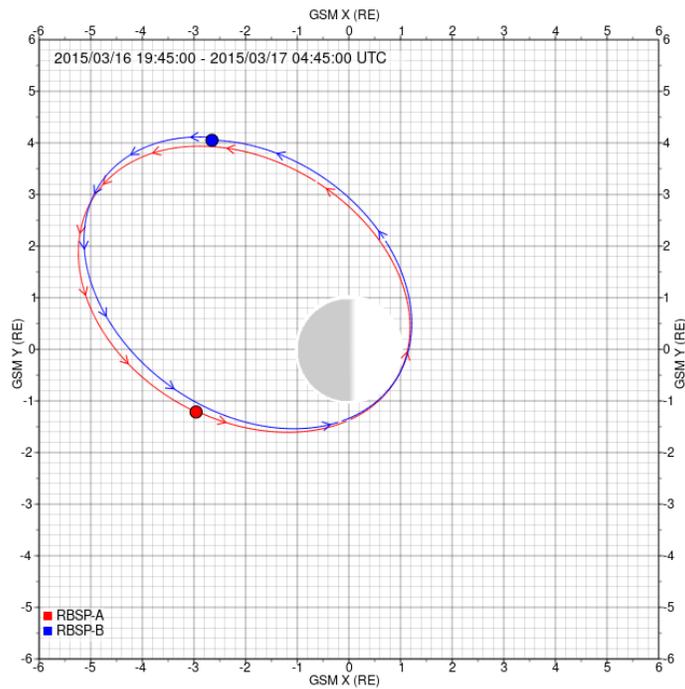


Figura 4.3. Localización de RBSP-A (punto rojo) y de RBSP-B (punto azul) en el inicio de la tormenta de marzo de 2015. Adaptado de <https://rbsp.gov/jhuapl.edu/ExtendedMissionOrbit>

El 22 de junio de 2015, las sondas se localizaban en el sector posterior al anochecer en el momento de la llegada de la onda de choque interplanetaria (Baker et al., 2016), como se puede ver en la Figura 4.4, separadas entre sí por solo 2 radios terrestres.

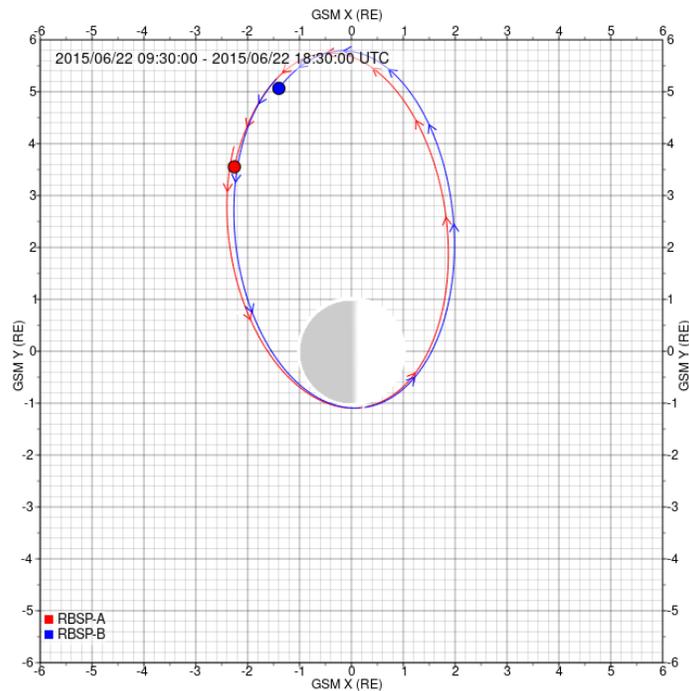


Figura 4.4. Localización de RBSP-A (punto rojo) y de RBSP-B (punto azul) en el inicio de la tormenta de junio de 2015. Adaptado de <https://rbspgway.jhuapl.edu/ExtendedMissionOrbit>

4.3. Análisis espacial: distribución de los flujos en L

En los siguientes análisis, se considera a los días de tormenta como días perturbados, mientras que aquellos de baja actividad geomagnética, como días calmos. A partir de los valores del Dst (obtenidos del World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, 2015) y de la clasificación de los días Q internacionales del índice k_p , obtenidos del sitio web <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>, se eligieron como días calmos el 5 de marzo y el 3 de junio de 2015

para comparar sus valores de flujos de iones H^+ , He^+ y O^+ , con los correspondientes a días perturbados.

Las Figuras 4.5 y 4.6 muestran la distribución en L de los flujos de iones H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) desde el 16 al 19 de marzo de 2015 inclusive y el 5 de marzo de 2015 (curva magenta). A su vez, las Figuras 4.7 y 4.8 muestran la distribución de los flujos de iones H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) desde el 21 al 24 de junio de 2015 inclusive y el 3 de junio de 2015 (curva magenta). Las Figuras 4.5 y 4.7 corresponden a iones con energías de ~ 140 keV y las Figuras 4.6 y 4.8 a iones con ~ 400 keV.

En los eventos estudiados en el presente trabajo, los cambios registrados en los flujos de iones He^+ y O^+ son similares a lo largo de los días de tormenta. En ambas tormentas, los flujos de las especies mencionadas comparados con el del ion H^+ , aumentan notablemente respecto del día calmo, lo cual se observa en las Figuras 4.5 y 4.6 al efectuar la comparación entre los gráficos de las tres especies correspondientes al 17 de marzo; y en la tormenta de junio, al comparar los gráficos del día 22 en las Figuras 4.7 y 4.8.

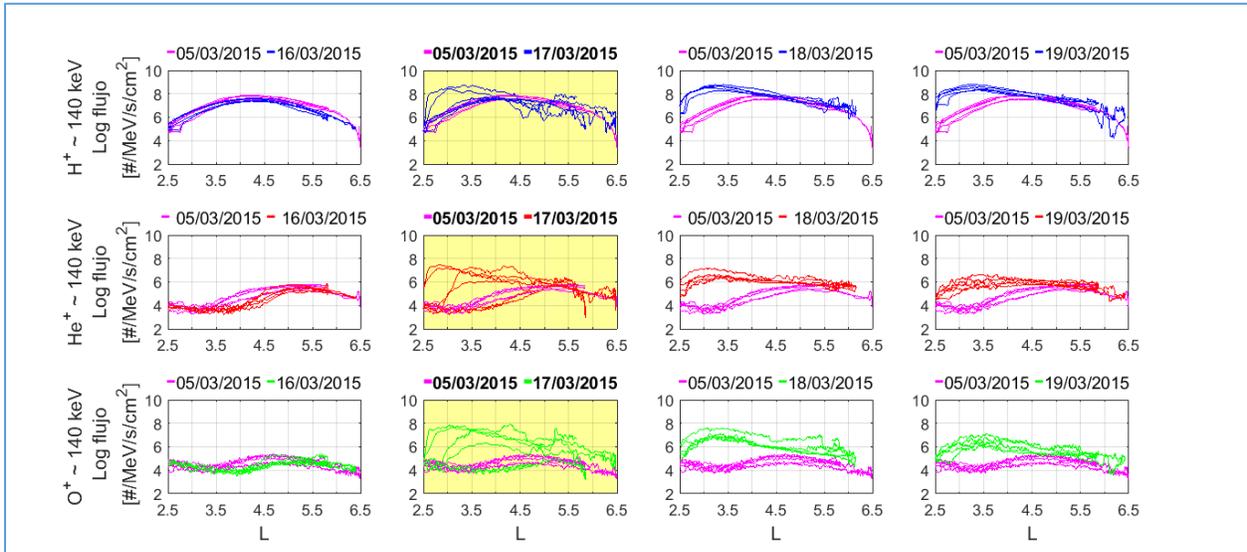


Figura 4.5. Distribución en L de flujos omnidireccionales de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 140 keV, medidos desde el 16 al 19 de marzo de 2015 inclusive y el 5 de marzo de 2015 (curva magenta). Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

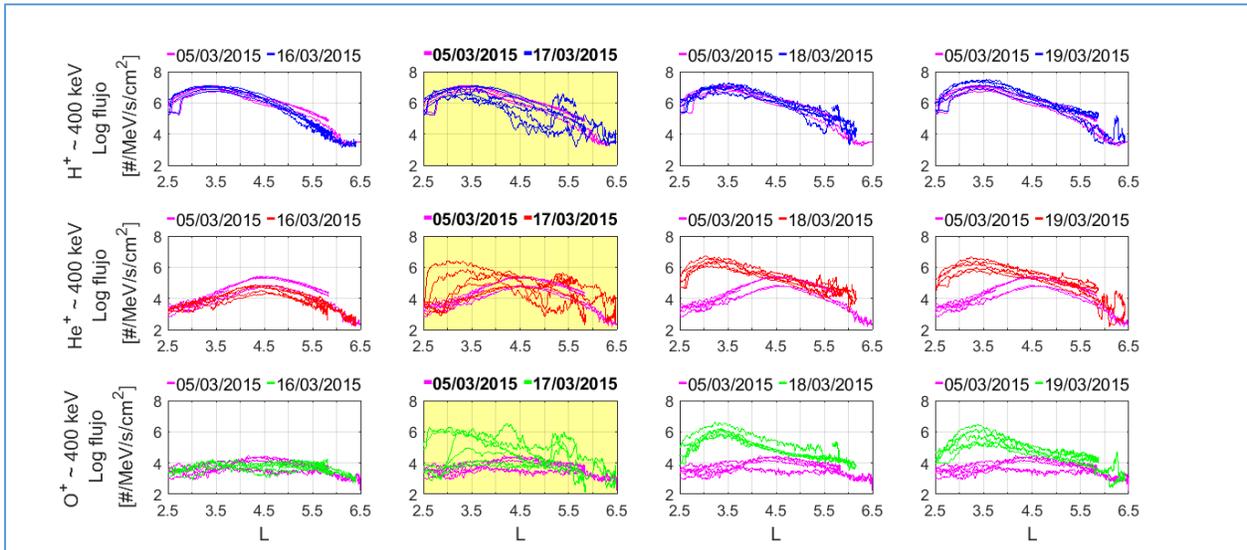


Figura 4.6. Distribución en L de flujos omnidireccionales de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 400 keV, medidos desde el 16 al 19 de marzo de 2015 inclusive y el 5 de marzo de 2015 (curva magenta). Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

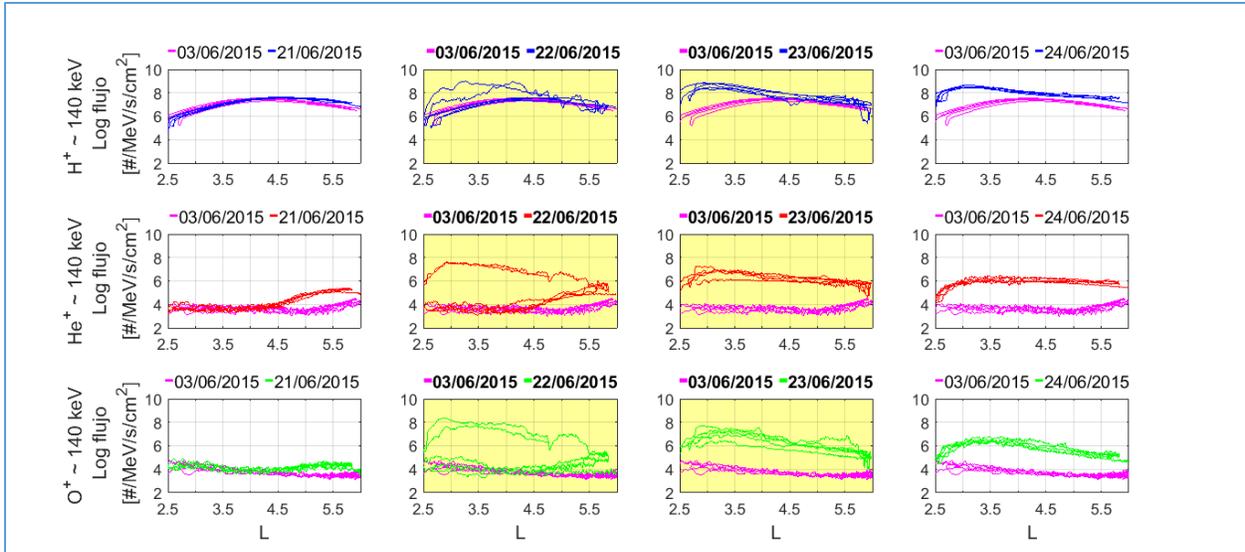


Figura 4.7. Distribución en L de flujos omnidireccionales de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 140 keV, desde el 21 al 24 de junio de 2015 inclusive y el 3 de junio de 2015 (curva magenta). Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

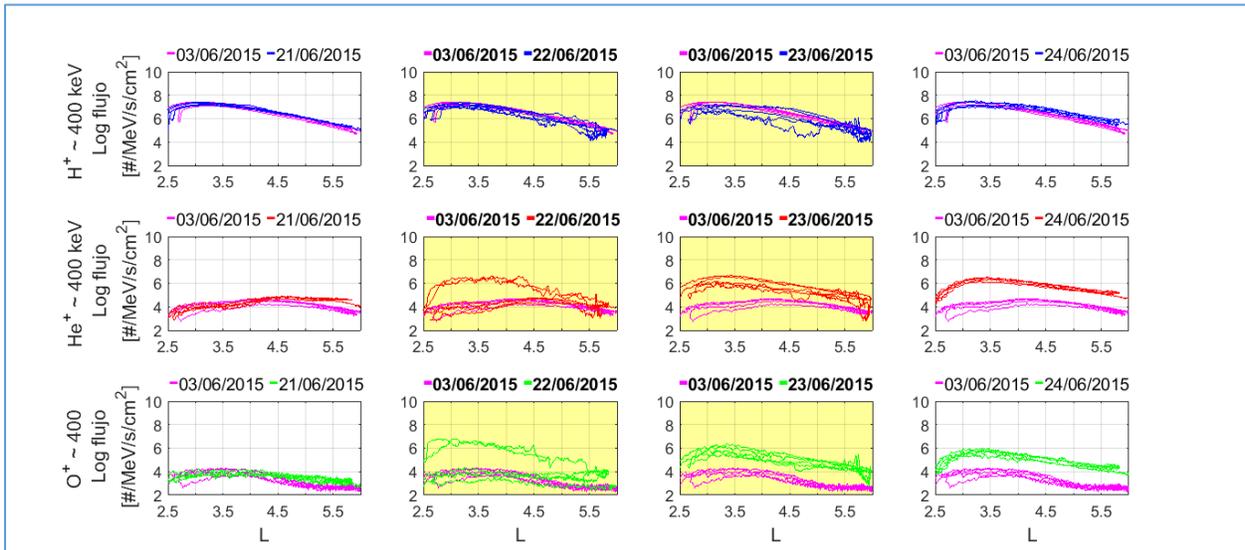


Figura 4.8. Distribución en L de flujos omnidireccionales de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 400 keV, desde el 21 al 24 de junio de 2015 inclusive y el 3 de junio de 2015 (curva magenta). Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

En las Figuras 4.9 y 4.11 se muestra la distribución en L de los flujos omnidireccionales de protones de ~ 45 keV (curvas en azul), del 16/03/2015 al 30/03/2015 y del 21/06/2015 al 30/06/2015 respectivamente. De manera análoga, las Figuras 4.10 y 4.12 muestran la distribución espacial de los flujos de protones de ~ 598 keV (curvas en azul), del 16/03/2015 al 30/03/2015 y del 21/06/2015 al 30/06/2015 respectivamente. También, en las cuatro figuras se graficaron los flujos de H^+ del día calmo considerado para cada caso (curva en magenta) y se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Al comparar las curvas de las figuras, se concluye que los protones con energías < 50 keV contribuyen a la Corriente Anillo de manera más significativa que aquellos con energías más altas. Presentan los flujos más perturbados respecto al perfil de flujo en el día calmo, al cual superan en unos cuatro órdenes de magnitud en el inicio de las tormentas al alcanzar valores de $\sim 10^{10} \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ en ambos casos. Esto se aprecia en la Figura 4.9, en el gráfico correspondiente al día 17 de marzo de 2015 y en la Figura 4.11, en el gráfico correspondiente al 22 de junio de 2015. Zhao et al., (2015) encontraron que los flujos de protones de 10 a 50 keV son mucho más dinámicos, se incrementan más rápidamente y también decaen más rápido. Los protones con las energías más bajas pueden distribuirse en la magnetosfera hasta regiones más profundas que aquellos con energías más altas, lo cual se observa al comparar las curvas de las Figuras 4.9 y 4.11 que representan el flujo de protones con energías ~ 45 keV, en donde la mayor alteración de flujo se da en $L < 4$, con las Figuras 4.10 y 4.12 de protones de ~ 598 keV donde se muestra mayor alteración del flujo para $L > 4$.

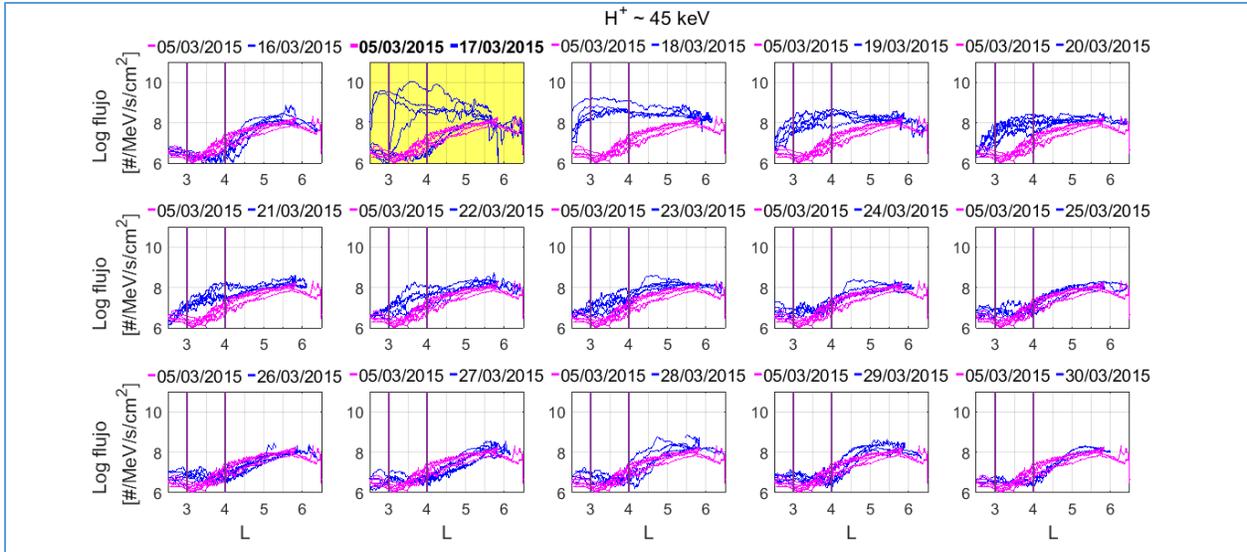


Figura 4.9. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de protones con ~ 45 keV, del 16/03/2015 al 30/03/2015 (curvas en azul) y el 5/03/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

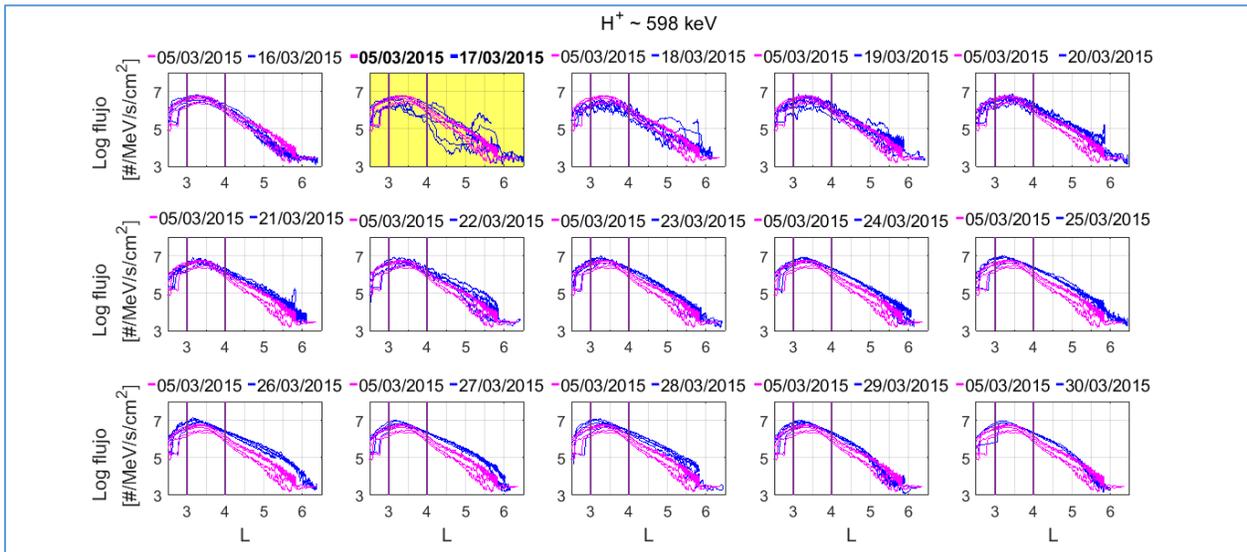


Figura 4.10. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de protones con ~ 598 keV, del 16/03/2015 al 30/03/2015 (curvas en azul) y el 5/03/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

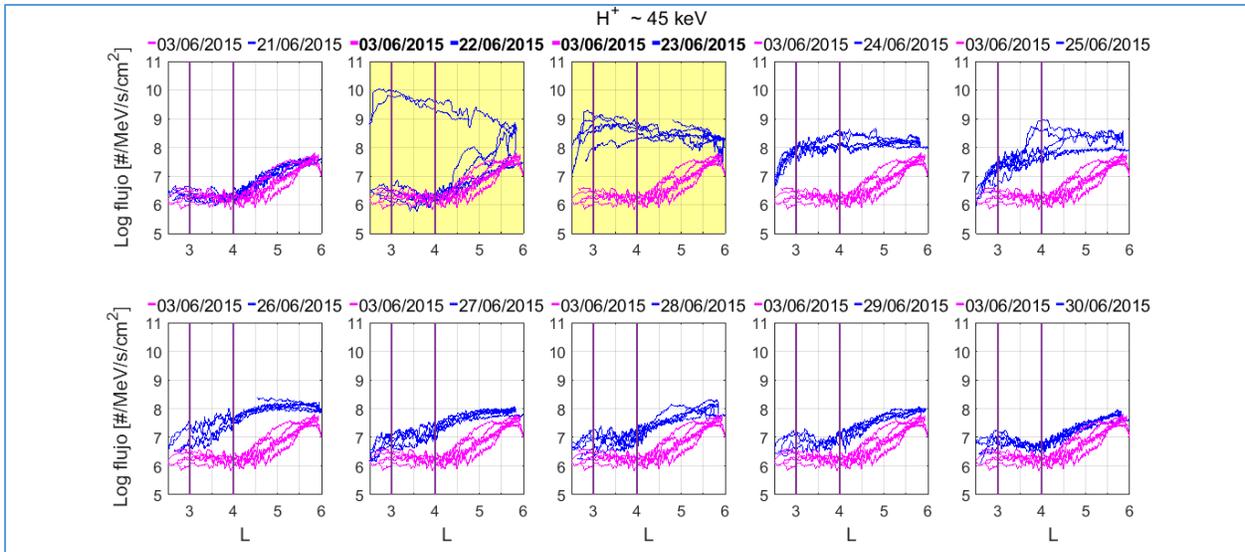


Figura 4.11. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de protones con ~ 45 keV, del 21/06/2015 al 30/06/2015 (curvas en azul) y el 3/06/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

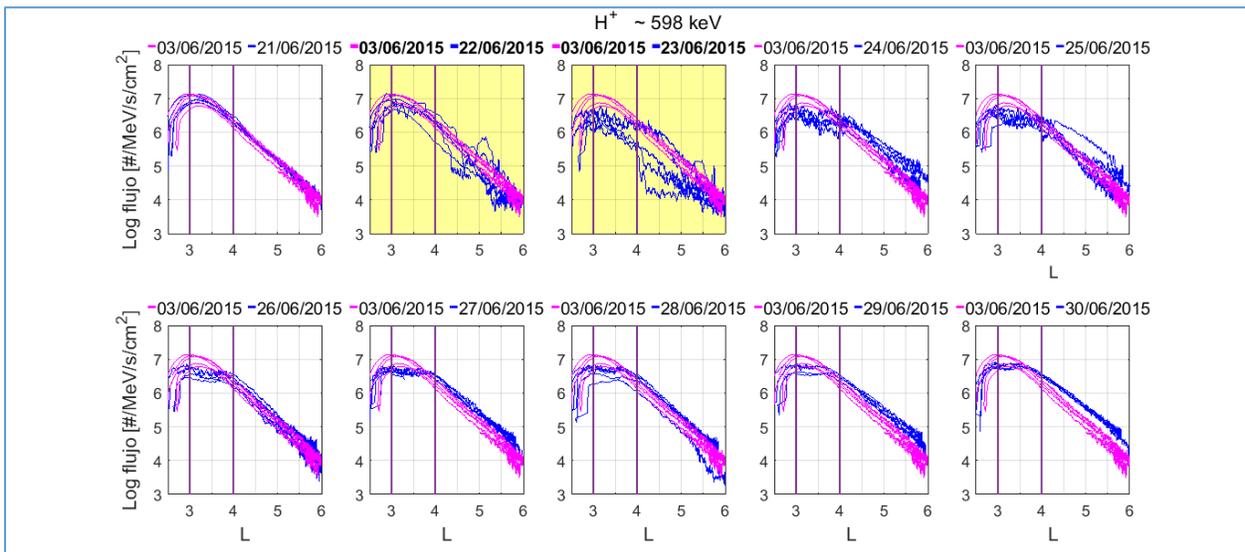


Figura 4.12. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de protones con ~ 598 keV, del 21/06/2015 al 30/06/2015 (curvas en azul) y el 3/06/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

En el inicio de ambas tormentas el flujo de los iones H^+ tiene su máximo en un $L \sim 3$. Este valor se mantiene para los protones más energéticos durante el desarrollo de las tormentas, para los cuales no se aprecian grandes diferencias entre los perfiles de flujo del día calmo y de los días de tormenta. Esto último es consistente con observaciones anteriores (Zhao et al., 2015), que afirman que los flujos de protones más energéticos (> 300 keV) no varían demasiado entre tiempos de calma y de tormentas, contribuyendo a la Corriente Anillo estable, es decir, a la Corriente Anillo en tiempos calmos.

Para los protones menos energéticos, el valor de L donde ocurre el máximo en el flujo de partículas, aumenta paulatinamente a medida que se desarrollan las fases de recuperación de las tormentas llegando a un valor ~ 6 al final de las mismas como ocurre en el día calmo.

En las Figuras 4.13 y 4.15 se muestra la distribución en L de los flujos omnidireccionales de He^+ de ~ 65 keV (curvas rojas), del 16/03/2015 al 30/03/2015 y del 21/06/2015 al 30/06/2015 respectivamente. De forma análoga, las Figuras 4.14 y 4.16 muestran la distribución espacial de los flujos de He^+ con energías ~ 671 keV (curvas rojas), del 16/03/2015 al 30/03/2015 y del 21/06/2015 al 30/06/2015 respectivamente. También en las cuatro figuras se graficaron los flujos de He^+ del día calmo considerado en cada caso (curva en magenta) y se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos.

Al comparar las curvas de las Figuras 4.13 y 4.14, y además, las curvas de la Figura 4.15 con las de la Figura 4.16, se observa que durante el comienzo de las tormentas el flujo de iones He^+ menos energéticos respecto al día calmo, aumenta tres órdenes de magnitud mientras que el flujo de los iones más energéticos de la misma especie se incrementa dos órdenes de magnitud respecto al día calmo e incluso decrece de forma más lenta que el flujo de los menos energéticos.

Los iones He^+ de menor energía alcanzan valores de flujo más altos y por lo tanto presentan una mayor contribución a la Corriente Anillo que los iones más energéticos de la misma especie.

Similar a lo que ocurre en el caso de los protones, el flujo de los iones He^+ con mayor energía tiene su máximo en valores de $L \sim 3$ al comienzo de las tormentas. Mientras que los iones menos energéticos, alcanzan máximos en el flujo de partículas en el rango $L = \sim 3-4$ hasta incluso primeros días de la fase de recuperación. Luego ese valor va cambiando a L mayores con el transcurso de los días, alcanzando el perfil del día calmo para el cual el flujo es máximo en $L \sim 6$. Esto último se aprecia mejor en la tormenta de marzo, dado que la recuperación de las características del día calmo en la tormenta de junio, es más lenta.

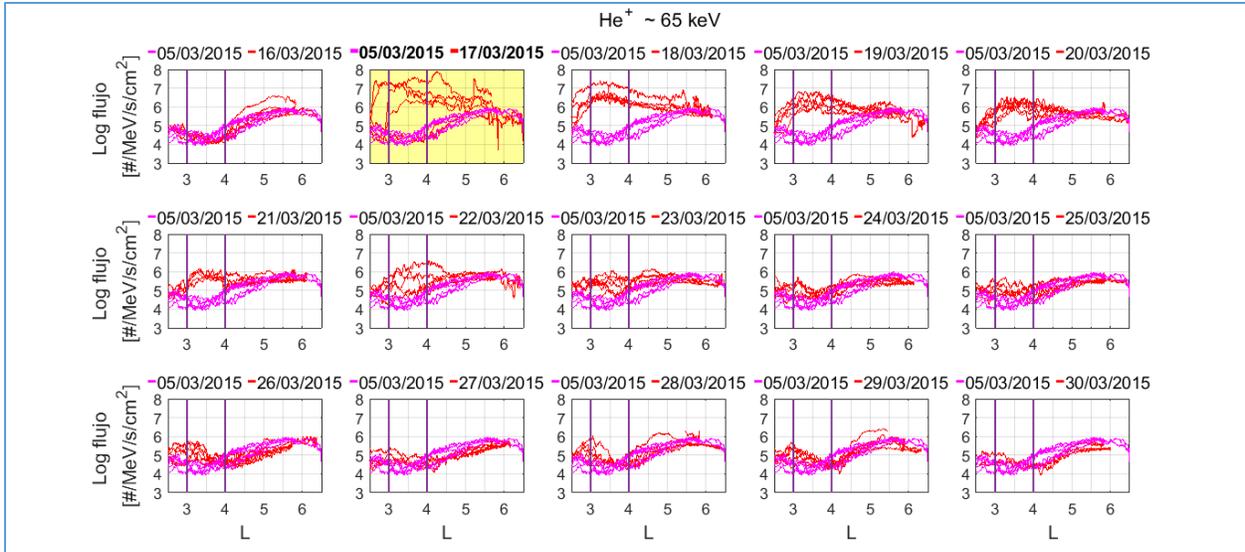


Figura 4.13. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de He^+ con ~ 65 keV, del 16/03/2015 al 30/03/2015 (curvas rojas) y el 5/03/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

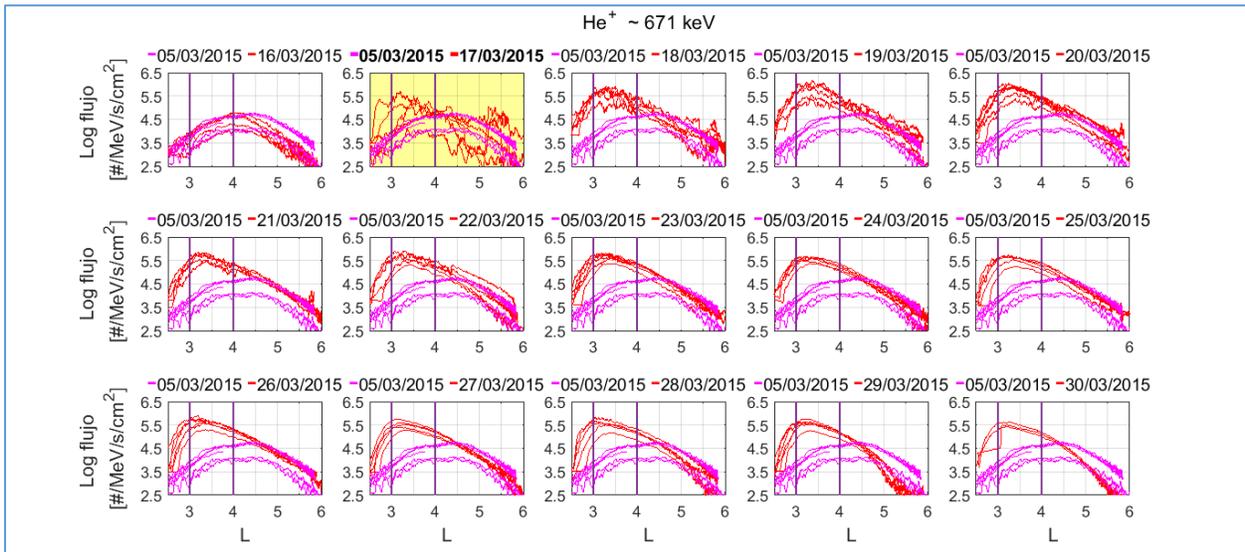


Figura 4.14. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de He^+ con ~ 671 keV, del 16/03/2015 al 30/03/2015 (curvas rojas) y el 5/03/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

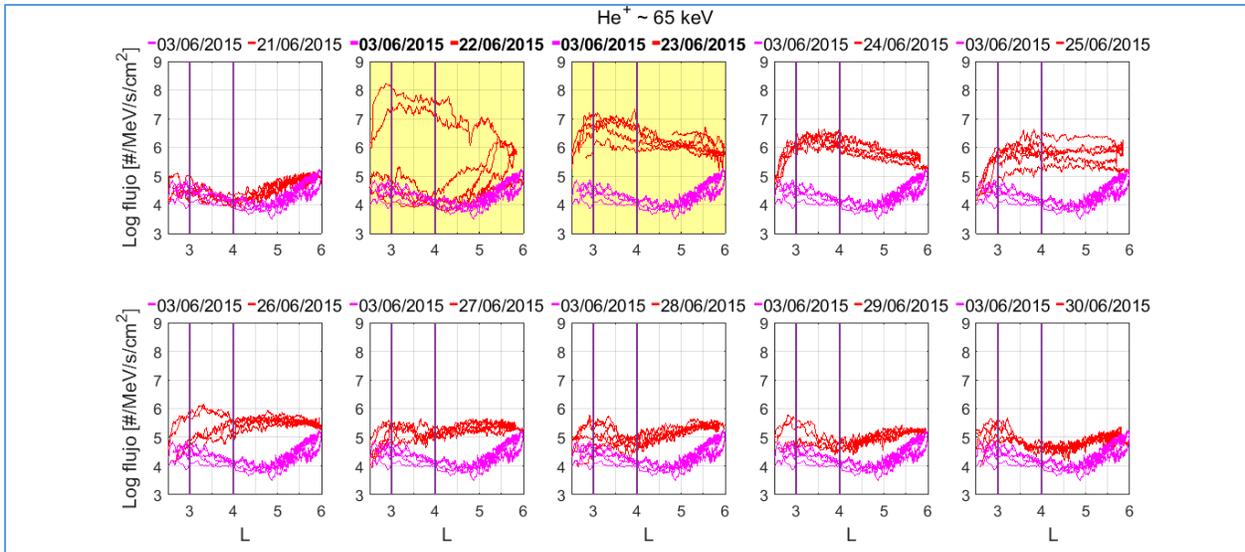


Figura 4.15. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de He^+ con ~ 65 keV, del 21/06/2015 al 30/06/2015 (curvas rojas) y el 03/06/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

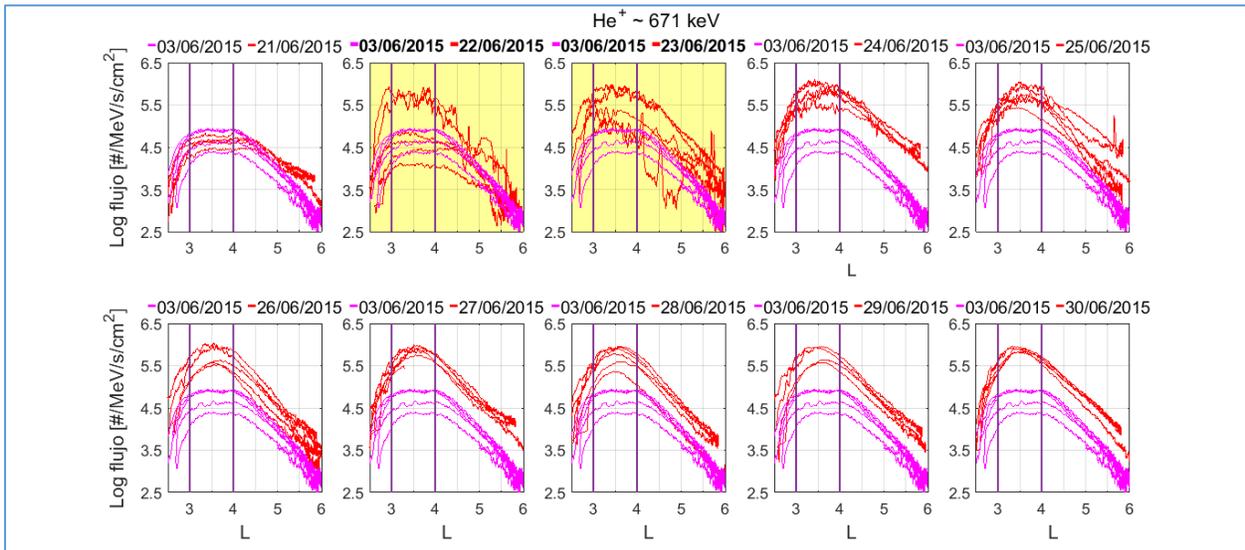


Figura 4.16. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de He^+ con ~ 671 keV, del 21/06/2015 al 30/06/2015 (curvas rojas) y el 03/06/2015 (curvas magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

En las Figuras 4.17 y 4.19 se muestra la distribución en L de los flujos omnidireccionales de O^+ de ~ 184 keV (curvas verdes), del 16/03/2015 al 30/03/2015 y del 21/06/2015 al 30/06/2015 respectivamente. De manera análoga, las Figuras 4.18 y 4.20 muestran la distribución espacial de los flujos de O^+ con energías ~ 870 keV (curvas verdes), del 16/03/2015 al 30/03/2015 y del 21/06/2015 al 30/06/2015 respectivamente. También en las cuatro figuras se graficaron los flujos de O^+ del día calmo considerado para cada evento (curva en magenta) y se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos.

Durante el comienzo de la tormenta de marzo e iniciada la fase de recuperación, los máximos en los flujos de los iones O^+ ocurren en valores de $L = \sim 3-4$. En el transcurso de la fase de recuperación, los flujos perturbados recuperan el perfil asociado a un día calmo. Para iones de esta especie con energías ≤ 400 keV, en el día considerado calmo, los máximos ocurren en valores de $L = \sim 4-5$ como puede verse en la Figura 4.17. Para iones con energías > 400 keV, en el día calmo, se tiene una continuidad espacial en los valores de los flujos, con un orden de magnitud menor a 4 en $\sim 2.5 \leq L \leq \sim 5$ como muestra la Figura 4.18.

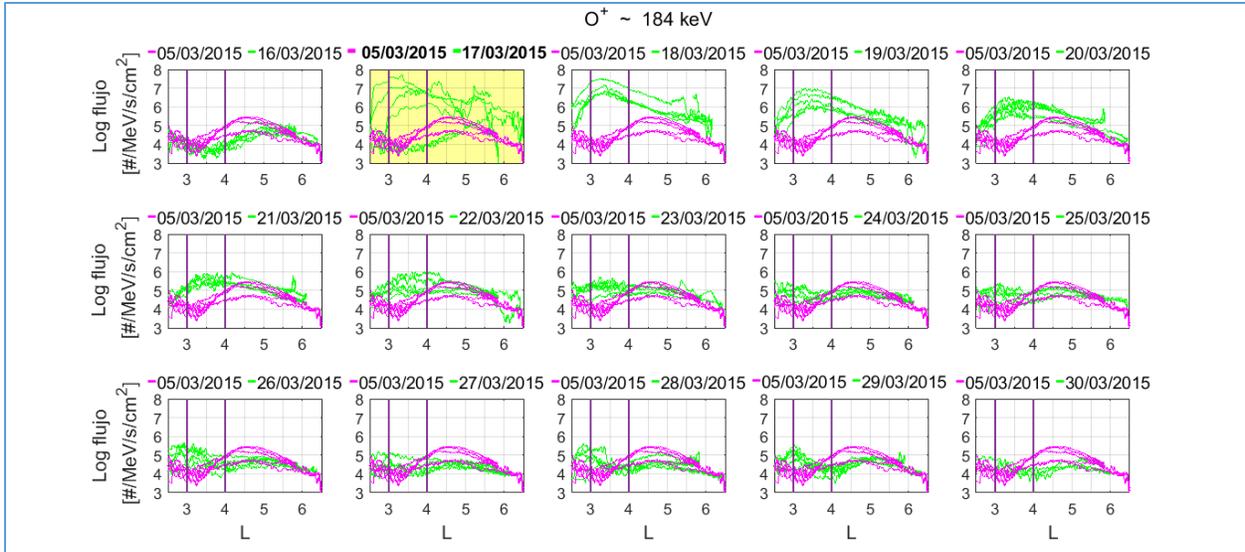


Figura 4.17. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de O^+ con ~ 184 keV, del 16/03/2015 al 30/03/2015 (curvas verdes) y el 5/03/2015 (curvas magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

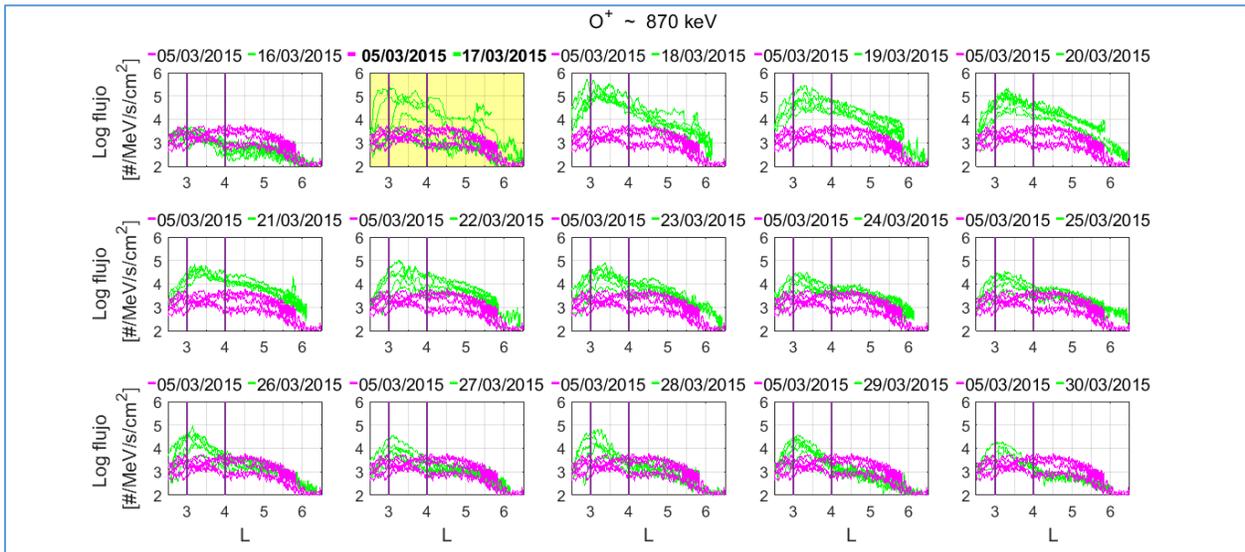


Figura 4.18. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de O^+ con ~ 870 keV, del 16/03/2015 al 30/03/2015 (curvas verdes) y el 5/03/2015 (curvas magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

Durante el comienzo de la tormenta de junio los máximos en los flujos de energía de los iones O^+ ocurren en valores de $L = \sim 2.5-3.5$ y con el transcurso de los días, entre $L = \sim 3$ y 4. En el desarrollo de la fase de recuperación, los flujos recuperan el perfil de un día calmo, el cual para iones $O^+ < 309$ keV, resulta ser un flujo con una distribución homogénea de orden de magnitud ~ 4 en el rango $2.5 \leq L \leq 6$ como se observa en la Figura 4.19. Para iones $O^+ \geq 309$ keV, se acentúan diferencias entre valores de los flujos para $L < 4$, en donde se alcanza la magnitud máxima de orden ~ 4 , y valores de los flujos para $L > 4$, a medida que se consideran rangos de energía cada vez más grandes. Esto último se aprecia en la Figura 4.20.

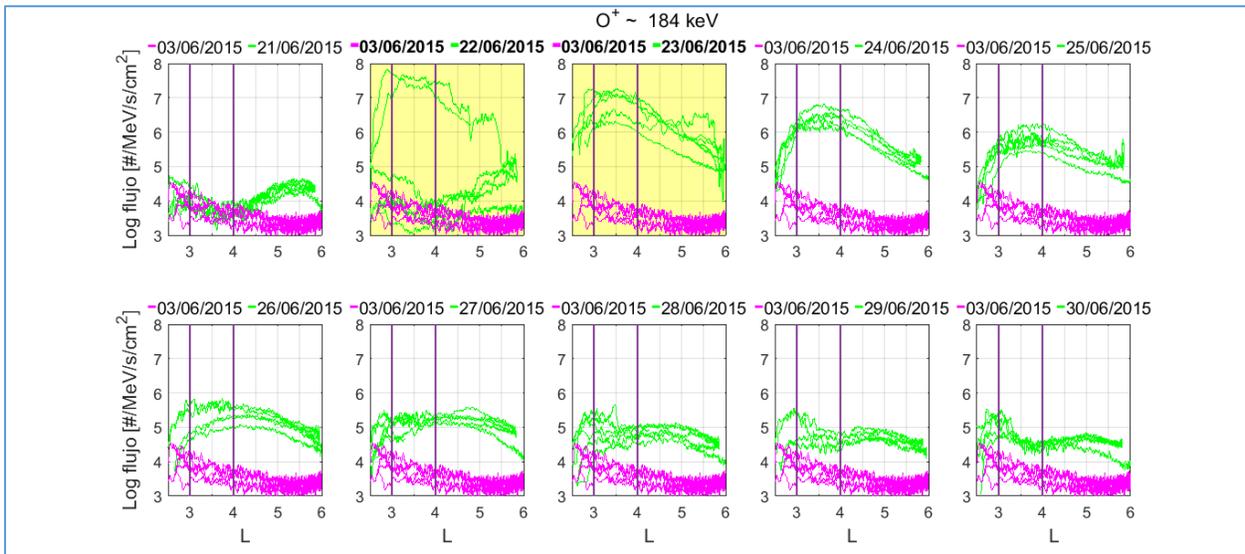


Figura 4.19. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de O^+ con ~ 184 keV, del 21/06/2015 al 30/06/2015 (curvas verdes) y el 03/06/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

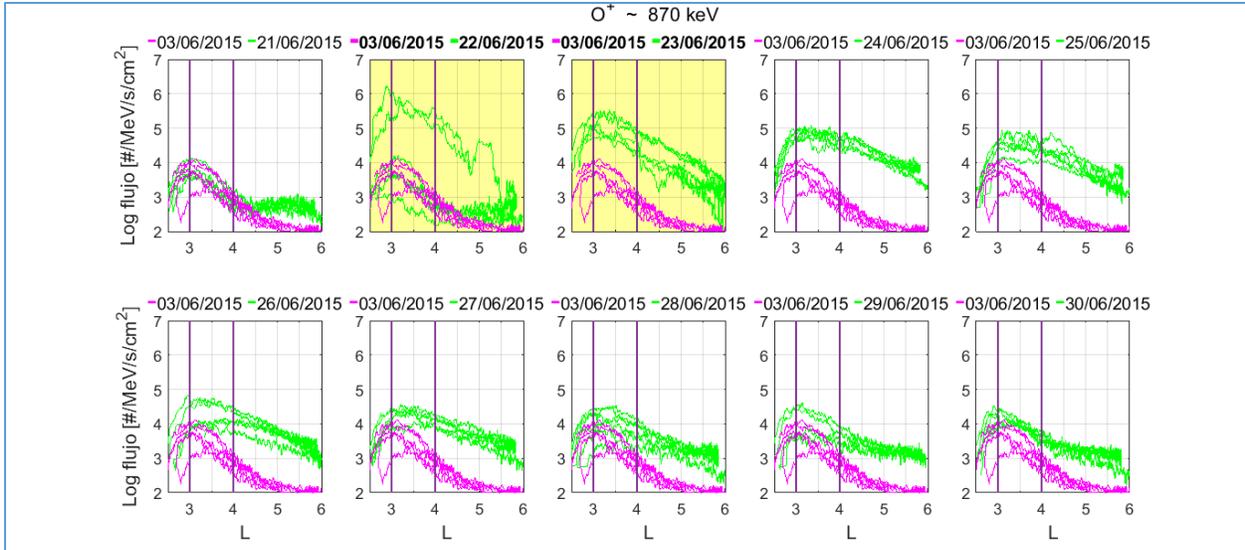


Figura 4.20. Distribución en L de los flujos omnidireccionales de O^+ con ~ 870 keV, del 21/06/2015 al 30/06/2015 (curvas verdes) y el 03/06/2015 (curva magenta). Se marcaron las líneas $L = 3$ y $L = 4$ para una mejor visualización de los resultados obtenidos. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

No hay observaciones disponibles proporcionadas por RBSPICE de O^+ con energías < 140 keV, por lo que las contribuciones de los mismos en este trabajo no se han estudiado. Sin embargo, es importante destacar que la mayor contribución de O^+ a la Corriente Anillo la aportan los iones de energías < 50 keV, con lo cual queda en evidencia el importante rol de los iones O^+ de energías más bajas en la Corriente Anillo (Zhao et al., 2015).

Al igual que en el caso de H^+ , los iones He^+ y O^+ menos energéticos alcanzan los valores máximos de flujo, con un orden de magnitud igual a 8 unidades en ambas tormentas. Esto último se observa en la Figura 4.5 en el gráfico correspondiente al ion O^+ para el 17 de marzo y en la Figura 4.13 en el caso del ion He^+ . A su vez, en la tormenta de junio, la Figura 4.7 muestra que el ion O^+ alcanza el valor más alto de flujo el día 22, al igual que el ion He^+ de acuerdo con la Figura 4.15.

4.4. Análisis temporal

La Figura 4.21 muestra los flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 140 keV (gráfico superior) y ~ 400 keV (segundo gráfico), medidos desde el 16 al 22 de marzo de 2015 junto con su correspondiente perfil del índice Dst (curva negra, gráfico inferior). En los tres gráficos, la recta color verde marca el momento en que ocurre el SSC. La recta violeta indica el comienzo de la fase principal y por último, el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. En la tormenta de marzo, durante la fase principal, se aprecian los flujos perturbados de H^+ , He^+ y O^+ , alcanzando el máximo previamente a que ocurra el mínimo del Dst , en el caso de los iones menos energéticos. Esto último se puede observar en el gráfico de iones con energía ~ 140 keV. El incremento de los flujos de protones más energéticos ocurre más tarde, durante la fase de recuperación, como se observa en el segundo gráfico. Estas afirmaciones son consistentes con estudios previos (Zhao et al., 2015), según los cuales durante tiempos de tormentas, iones con energías < 50 keV dominan la Corriente Anillo en la fase principal de la tormenta, mientras que protones con energías mayores dominan durante la fase de recuperación. El incremento en los flujos de protones más energéticos generalmente ocurre más tarde que el de aquellos menos energéticos.

La Figura 4.22 muestra los flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 600 keV (gráfico superior), y de He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 870 keV (segundo gráfico), medidos desde el 16 al 22 de marzo de 2015 junto con su correspondiente perfil del índice Dst (curva negra, gráfico inferior). También se indican en cada gráfico los comienzos de cada etapa de la tormenta. La recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase principal lo

indica la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. Se observa en los gráficos de las Figuras 4.21 y 4.22, que en tiempos de calma, los flujos de iones He^+ superan levemente a los iones O^+ en el rango de energías $\geq \sim 140$ keV. Mientras que durante la fase principal y hasta unas horas posteriores al mínimo del *Dst*, los flujos de iones O^+ logran igualar, y por momentos, superar a los flujos de iones He^+ . Por otra parte, los perfiles de los flujos de iones He^+ y O^+ se asemejan cada vez más al considerar iones con energías cada vez mayores, en el caso de iones con energías ~ 870 keV, los flujos son prácticamente iguales según lo observado en la Figura 4.22. El flujo de protones con energías ~ 600 keV no varía significativamente entre tiempos de calma y de tormenta.

Durante tiempos de calma, las contribuciones de iones He^+ y O^+ son mucho menores en comparación con la de H^+ . Aunque durante la fase principal, los flujos de He^+ y O^+ con energías $\geq \sim 140$ keV alcanzan niveles similares a los flujos de iones H^+ en el mismo rango de energía.

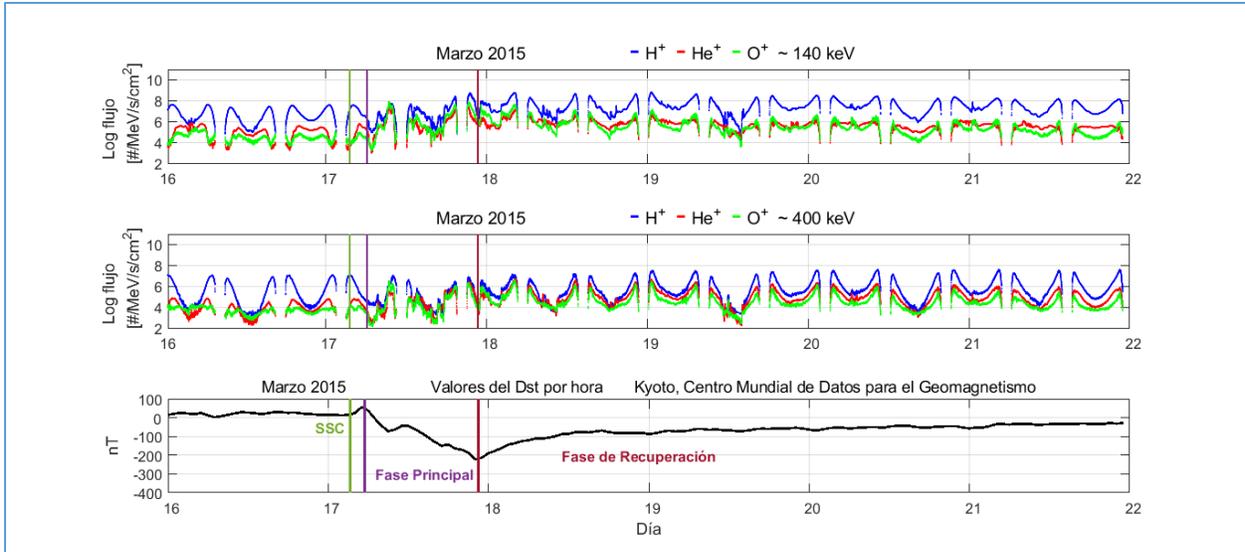


Figura 4.21. Flujos omnidireccionales de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 140 keV (gráfico superior) y ~ 400 keV (segundo gráfico), medidos desde el 16 al 22 de marzo de 2015 junto con el perfil del índice Dst para esos días (curva negra, gráfico inferior). En los tres gráficos, la recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase principal lo indica la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

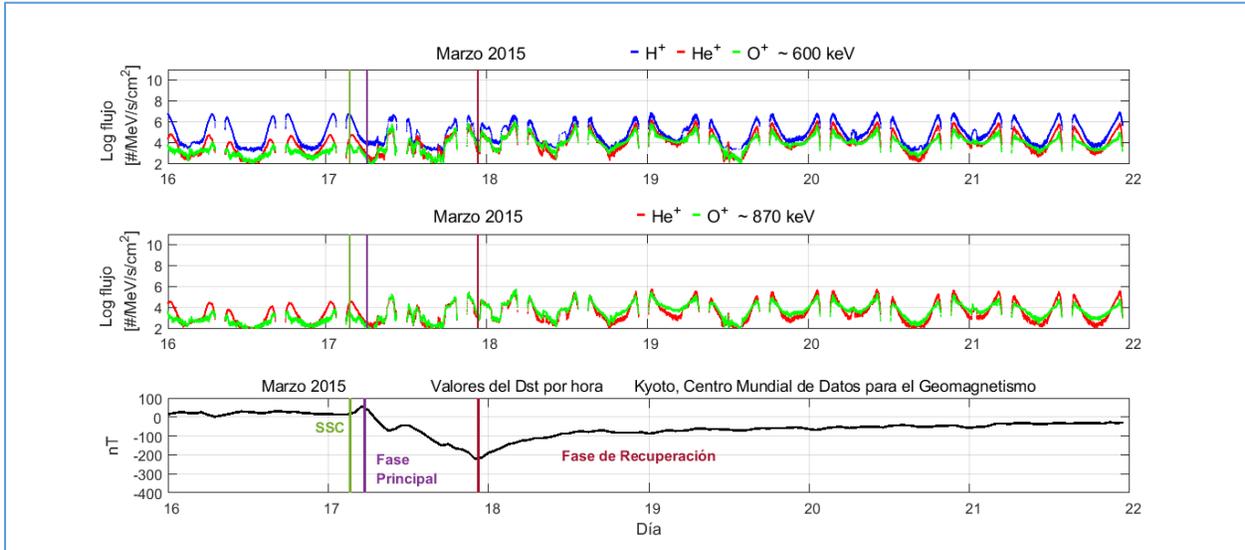


Figura 4.22. Flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 600 keV (gráfico superior), y de He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 870 keV (segundo gráfico), medidos desde el 16 al 22 de marzo de 2015 junto con el perfil del índice Dst para esos días ((curva negra, gráfico inferior). En los tres gráficos, la recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase principal lo indica la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

En la Figura 4.23 se muestran los flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 140 keV (gráfico superior) y con energías de ~ 400 keV (segundo gráfico), medidos desde el 21 al 27 de junio de 2015 junto con el perfil del índice Dst para esos días (curva negra, gráfico inferior). Por otra parte, se muestran en la Figura 4.24 los flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 600 keV (gráfico superior), y de He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 870 keV (segundo gráfico), medidos desde el 21 al 27 de junio de 2015 junto con el perfil del índice Dst para esos días (curva negra, gráfico inferior). También se indican en cada gráfico de ambas figuras, los comienzos de cada etapa de la tormenta. La recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase inicial lo indica la recta naranja, el de la fase principal la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo.

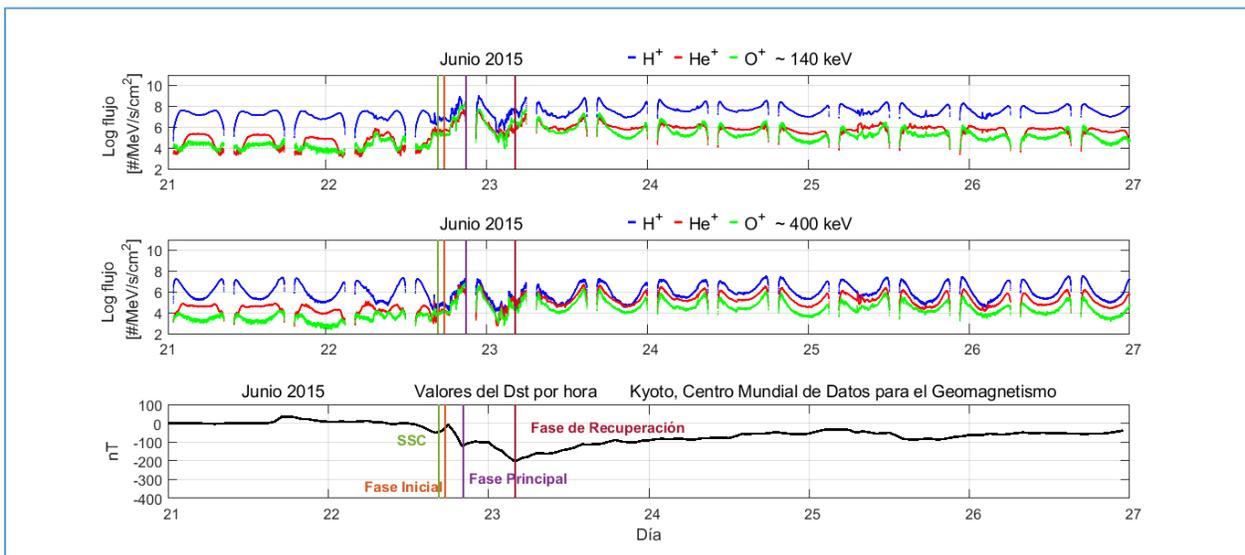


Figura 4.23. Flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 140 keV (gráfico superior) y con energías de ~ 400 keV (segundo gráfico), medidos desde el 21 al 27 de junio de 2015 junto con el perfil del índice Dst para esos días (curva negra, gráfico inferior). En los tres gráficos, la recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase inicial lo indica la recta naranja, el de la fase principal la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

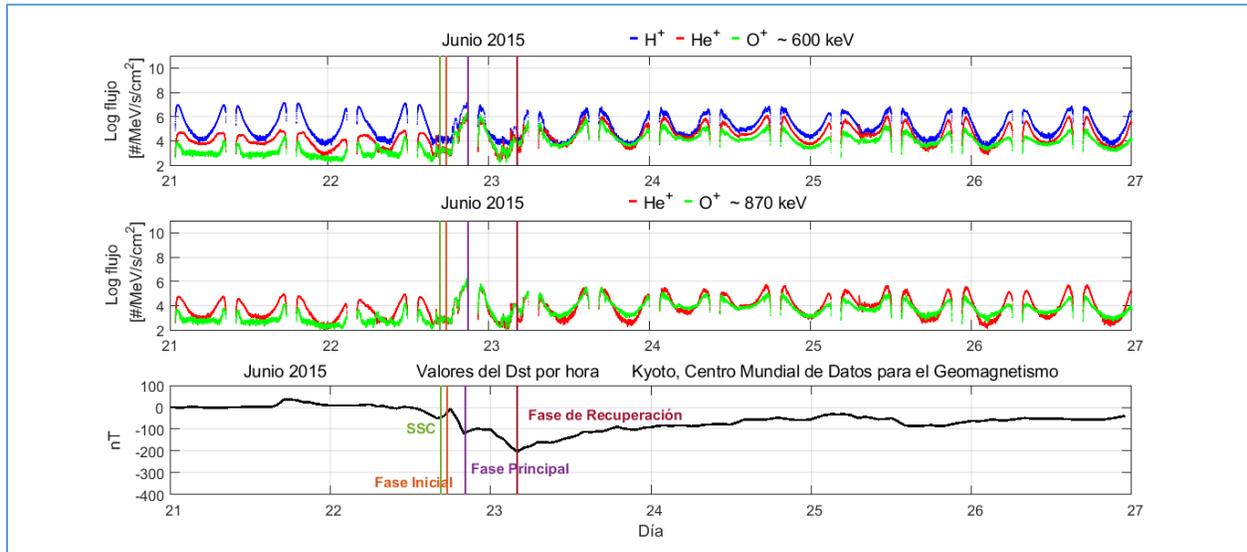


Figura 4.24. Flujos omnidireccionales diarios de H^+ (curvas azules), He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 600 keV (gráfico superior), y de He^+ (curvas rojas) y O^+ (curvas verdes) con energías de ~ 870 keV (segundo gráfico), medidos desde el 21 al 27 de junio de 2015 junto con el perfil del índice Dst para esos días (curva negra, gráfico inferior). En los tres gráficos, la recta verde marca el momento en que ocurre el SSC. El comienzo de la fase inicial lo indica la recta naranja, el de la fase principal la recta violeta y el inicio de la fase de recuperación está marcado por la recta bordo. Un promedio móvil, utilizando una ventana centrada de 10 valores de longitud, fue aplicado para mejorar la visualización.

En la tormenta de junio, los flujos perturbados de H^+ , He^+ y O^+ , alcanzan el máximo apenas comienza la fase inicial, luego decaen durante las primeras horas de la fase principal y vuelven a aumentar unas horas antes de que ocurra el mínimo del Dst . Esto último se puede observar en los gráficos de iones con energías ~ 140 keV y ~ 400 keV en la Figura 4.23, como en el gráfico de iones con energías ~ 600 keV en la Figura 4.24.

Los iones H^+ con energías ~ 400 keV no presentan cambios significativos en el flujo entre tiempos de calma y de tormenta, lo cual se observa en la Figura 4.23. Al igual que los protones con energías ~ 600 keV, según el gráfico superior de la Figura 4.24.

Durante la fase inicial y principal de la tormenta de junio, los flujos de iones O^+ logran igualar, y por momentos, superar a los flujos de iones He^+ , lo cual se observa en los gráficos de

las Figuras 4.23 y 4.24. Por otra parte, los perfiles de los flujos de iones He^+ y O^+ con energías ~ 870 keV, son prácticamente iguales según lo observado en la Figura 4.24.

En la tormenta de junio también se aprecia que los protones son la especie dominante en la Corriente Anillo, tanto en tiempos de calma como de tormenta. Durante tiempos de calma, las contribuciones de iones He^+ y O^+ son mucho menores. Durante la fase inicial y principal, los flujos de He^+ y O^+ con energías ~ 140 -600 keV alcanzan niveles similares a los flujos de iones H^+ con el mismo rango de energía.

Como se comentó en la Sección 4.1.2, la fase de recuperación de la tormenta de junio resultó alterada por un CME que llegó a la Tierra el 25 de junio, esto se ve reflejado en una disminución del *Dst* y en perturbaciones del flujo de los iones durante ese día y primeras horas del siguiente.

Cabe aclarar que, el trazado característico observado de las curvas en las figuras de esta sección, se debe a que la sonda barre distintos L en el recorrido de su órbita.

Capítulo 5

Energía de la Corriente Anillo

5.1. Flujo de partículas y densidad de energía

Considérese un detector de partículas ideal con un área de apertura δA_{\perp} , que registra la incidencia de partículas cargadas en dirección \mathbf{u} perpendicular al área, como muestra la Figura 5.1 (Roederer & Zhang, 2014). Estas partículas caen dentro de un cono que subtiende un pequeño ángulo sólido $\delta\Omega$ y además las partículas tienen energías cinéticas en el intervalo dado por E y $E + \delta E$ (no relativistas). El número de partículas δN que atraviesan el detector en un tiempo δt se puede expresar como

$$\delta N = j \delta A_{\perp} \delta\Omega \delta E \delta t \quad (5.1)$$

donde la constante de proporcionalidad j es el “flujo diferencial direccional” de las partículas y es función de la posición, el tiempo, la energía y la dirección. j representa el número promedio de partículas por unidad de tiempo, energía, ángulo sólido y área perpendicular a la dirección de movimiento. Su unidad típica en estudios magnetosféricos es $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1} \text{ster}^{-1}$.

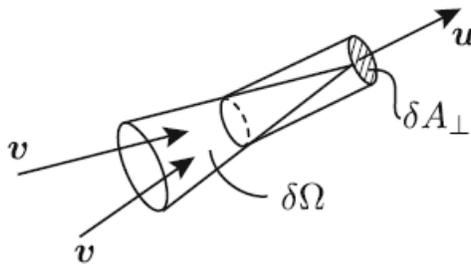


Figura 5.1. Elementos de un detector de partículas ideal. Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).

El flujo direccional puede expresarse vectorialmente como $\mathbf{j} = j\mathbf{u}$, entonces el número de partículas que atraviesan el elemento de área δA orientado en cualquier dirección será

$$\delta N = j\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \delta A \delta\Omega \delta E \delta t = \mathbf{j}(\mathbf{r}, t, E, \mathbf{u}) \cdot \delta A \delta\Omega \delta E \delta t \quad (5.2)$$

En estudios de los Cinturones de Radiación y en estudios de la magnetósfera se suele utilizar el “sistema de coordenadas naturales” que está formado por coordenadas polares referidas al campo magnético local. La Figura 5.2 muestra las coordenadas en este sistema, siendo $\mu = \cos \alpha$, donde α es el ángulo de inclinación de la partícula con respecto al campo magnético local y $\delta\Omega = \delta\mu \delta\varphi$. Entonces en un determinado punto del espacio y tiempo se puede escribir $j = j(E, \mu, \varphi)$. Al valor integrado de j sobre el ángulo sólido Ω se lo denomina “flujo diferencial omnidireccional”.

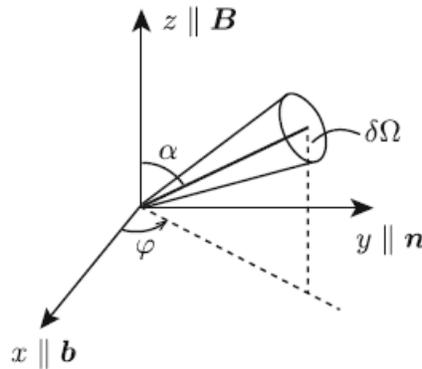


Figura 5.2. Sistema de coordenadas naturales. Adaptado de (Roederer & Zhang, 2014).

Las sensores proveen mediciones de j . Sin embargo, en la teoría se trabaja con funciones de distribución, que sirven de puente cuantitativo para vincular el estado instantáneo microscópico del conjunto de partículas con las variables macroscópicas que son más fáciles de interpretar y medir.

Sea δn un número de partículas que caen dentro de un pequeño volumen δr^3 con momentos y velocidades dentro de ciertos rangos al tiempo t . En coordenadas cartesianas δn será proporcional a δr^3 y al rango de momentos δp^3 (o velocidades δv^3) que posean:

$$\delta n = f_p(\mathbf{r}, t, \mathbf{p}) \delta r^3 \delta p_1 \delta p_2 \delta p_3 = f_v(\mathbf{r}, t, \mathbf{v}) \delta r^3 \delta v_1 \delta v_2 \delta v_3. \quad (5.3)$$

En la ecuación anterior, f_p y f_v son las funciones de distribución, suele ser conveniente trabajar con ellas en otras coordenadas.

La transformación del espacio de velocidades (v_1, v_2, v_3) al espacio de las variables (E, μ, φ) en el sistema de referencia natural esta expresada por:

$$v_1 = v \sqrt{1 - \mu^2} \cos \varphi$$

$$v_2 = v \sqrt{1 - \mu^2} \sin \varphi$$

$$v_3 = v \mu$$

donde $v = \sqrt{2E/m}$, siendo m la masa de la partícula y el determinante de la matriz jacobiana

de la transformación es $J = v/m$. Luego

$$f_{nuevo} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{2E}{m}} f_{viejo}(v_1, v_2, v_3) \quad (5.4)$$

donde f_{viejo} es la función de distribución en coordenadas cartesianas y f_{nuevo} en coordenadas naturales.

De acuerdo con la descripción anterior, se puede vincular el flujo de partículas $j(E, \mu, \varphi)$ con las funciones de distribución. Considérese el elemento de superficie δA_{\perp} por el que cruzan perpendicularmente δN partículas con velocidad $\mathbf{v} = v\mathbf{u}$ durante el intervalo de tiempo δt dentro del ángulo $\delta\Omega$. δN estará dado por la Ecuación 5.1. Antes del cruce estarán todas contenidas en un cilindro perpendicular a δA_{\perp} de volumen $\delta V = v \delta t \delta A_{\perp}$. Teniendo en cuenta la Ecuación 5.3, se puede escribir $\delta N = f(E, \mu, \varphi) v \delta t \delta A_{\perp} \delta E \delta\Omega$, y al comparar con la Ecuación 5.1 se tiene

$$j(E, \mu, \varphi) = v f(E, \mu, \varphi). \quad (5.5)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación 5.4 se puede escribir

$$j(E, \mu, \varphi) = \frac{v^2}{m} f_v(v_1 v_2 v_3). \quad (5.6)$$

La densidad de partículas δn , en un pequeño volumen de dimensiones δr^3 puede ser determinada por $\delta n / \delta r^3$. Si se hace uso de la Ecuación 5.3, se puede calcular la densidad de energía total ε para un conjunto de partículas de masa m como

$$\varepsilon = \iiint E f(v_1, v_2, v_3) dv_1 dv_2 dv_3 = \iiint E f(E, \mu, \varphi) dE d\mu d\varphi$$

además, teniendo en cuenta la Ecuación 5.5 y la relación $v = \sqrt{E/2m}$, resulta

$$\varepsilon = \iiint \frac{E}{\sqrt{2E/m}} j(E, \mu, \varphi) dE d\mu d\varphi. \quad (5.7)$$

Si se asume flujo girotrópico ($\frac{\partial j}{\partial \varphi} = 0$), se puede integrar las dependencias angulares como:

$$\varepsilon = \int_0^\infty \sqrt{\frac{mE}{2}} j(E) dE \int_{-1}^1 d\mu \int_0^{2\pi} d\varphi, \quad (5.8)$$

resultando finalmente una expresión para calcular la densidad total de energía en función del flujo girotrópico y energía cinética

$$\varepsilon = 2\pi \int_0^\infty \sqrt{2mE} j(E) dE. \quad (5.9)$$

Si se integra ε en un volumen V , se obtiene la energía total contenida en dicho volumen:

$$E^C = \int \varepsilon dV \quad (5.10)$$

5.2. Estimación del contenido de energía de la Corriente Anillo durante las tormentas geomagnéticas estudiadas

Las Ecuaciones 5.9 y 5.10 fueron resueltas con los datos de RBSPICE, correspondientes a los días de las tormentas estudiadas. Teniendo en cuenta que las sondas realizan casi tres vueltas por día, en cada media vuelta de la órbita de RBSP-B se estimó en primera instancia para cada especie de iones, la densidad de energía. La estimación, asociada a cada valor del parámetro

L entre el pasaje por el perigeo y apogeo de la sonda RBSP-B en los días de tormenta, se realizó usando la aproximación por sumatoria de la integral en la Ecuación 5.9:

$$\varepsilon = \sum_{E=E_{min}}^{E_{max}} 2\pi\sqrt{2E_i m} j(E_i, L_i)\Delta E_i, \quad (5.11)$$

donde ΔE_i es la diferencia entre canales de energía sucesivos, se usaron los flujos omnidireccionales y se consideró el parámetro L dado la dependencia espacial de estos flujos. En la Ecuación 5.11 se suman las contribuciones de todos los canales de energía, siendo para el caso de H^+ , $E_{min} = 44.7$ keV y $E_{max} = 597.6$ keV. Para He^+ , $E_{min} = 65$ keV y $E_{max} = 870$ keV, mientras que para el O^+ los límites de la sumatoria son $E_{min} = 142$ keV y $E_{max} = 870$ keV.

Para calcular la energía contenida en el volumen dipolar atravesado por la sonda RBSP-B en cada media vuelta de su órbita, se aproximó la integral de volumen en la Ecuación 5.10 por una sumatoria de productos, entre las densidades de energía estimadas con la Ecuación 5.11 y el volumen delimitado por superficies dipolares sucesivas. Suponiendo que las densidades de energía de los iones de la Corriente Anillo son constantes en el tiempo magnético local (MLT), cada densidad de energía parcial, es multiplicada por el volumen dipolar entre el L asociado y su consecutivo, siendo $\Delta L = 0.002$, y obteniéndose así una estimación del contenido de energía parcial contenida dentro de ese volumen. Esto se expresa como:

$$E^C = \sum_{L_{min}}^{L_{max}} \varepsilon(L)\Delta V(L), \quad (5.12)$$

donde $L_{min} = 2.5$ y $L_{max} = 6.5$. El volumen entre la superficie de la Tierra y la superficie dipolar a un L determinado está dado por:

$$V(L) = V_E \left[L^3 \sqrt{1 - \frac{1}{L}} \left(\frac{0.43}{L^3} + \frac{0.171}{L^2} + \frac{0.229}{L} + 0.457 \right) - \sqrt{1 - \frac{1}{L}} \right], \quad (5.13)$$

siendo $V_E = 1.083 \times 10^{21} \text{ m}^3$ el volumen de la Tierra. El contenido de energía es estimado espacialmente para cada L , los valores de energía contenida se suman a medida que se barre el rango de valores de L incluidos entre el perigeo y apogeo de la sonda.

En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestran las contribuciones de las especies de iones H^+ , He^+ y O^+ al contenido energético estimado de la Corriente Anillo durante las tormentas estudiadas. La estimación del contenido energético calculada a partir de los datos proporcionados por la sonda RBSP-B, se realizó para los intervalos de tiempo correspondientes a cada media vuelta de la configuración orbital de RBSP-B desde el 16/03/2015 al 29/03/2015, y del 21/06/2015 al 29/06/2015. Se obtuvo un valor para cada intervalo y se asoció dicho valor estimado, al instante medio entre los momentos de pasaje por el perigeo y apogeo de la sonda en cada media vuelta considerada. Cada uno de estos pares de valores están representados como puntos, de color azul en el caso del H^+ , en rojo para el He^+ y en verde para el O^+ , en las curvas de la Figura 5.3 correspondiente a la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015 y en las curvas de la Figura 5.4 correspondiente a la tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015.

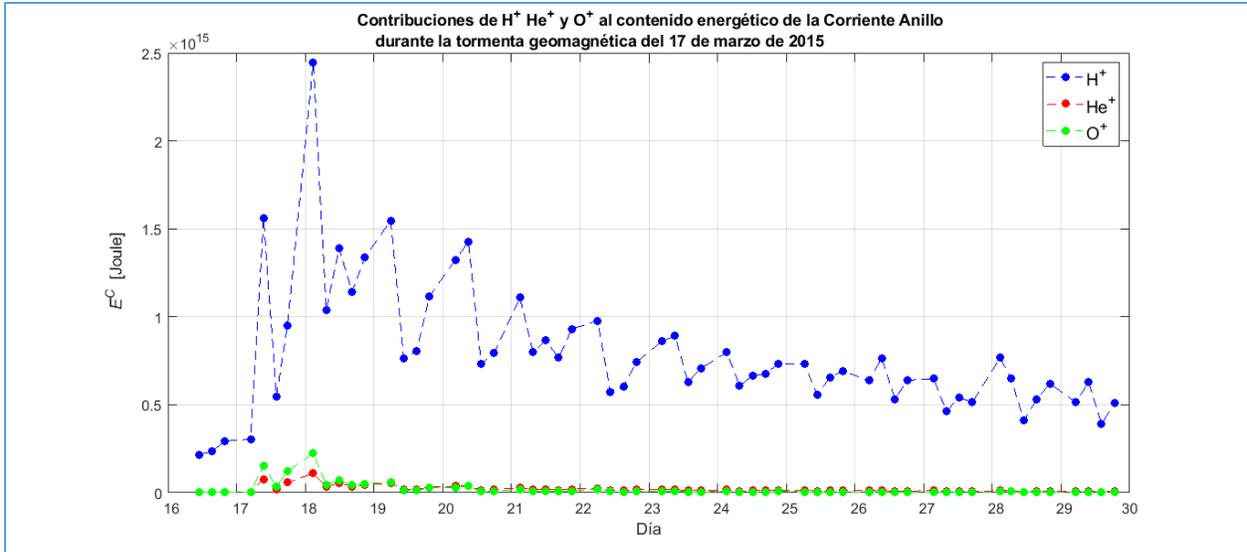


Figura 5.3. Contribuciones estimadas de H^+ (puntos en azul), He^+ (puntos en rojo) y de O^+ (puntos en verde) al contenido energético de la Corriente Anillo durante la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015.

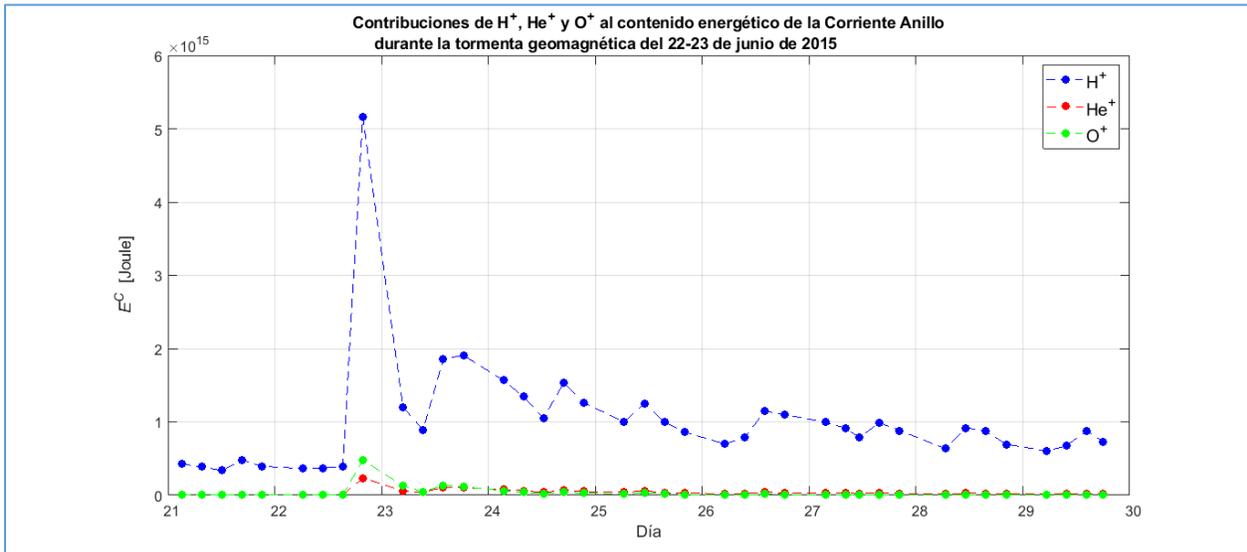


Figura 5.4. Contribuciones estimadas de H^+ (puntos en azul), He^+ (puntos en rojo) y de O^+ (puntos en verde) al contenido energético de la Corriente Anillo durante la tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015.

En las Figuras 5.3 y 5.4, se observa que las contribuciones de He⁺ y O⁺ al contenido energético de la Corriente Anillo son irrelevantes en los días de tormenta analizados, lo único destacable en estas especies es que el O⁺ durante la fase principal y hasta apenas iniciada la recuperación en ambas tormentas, supera levemente al He⁺ con valores $\leq 0.5 \cdot 10^{15}$ Joule. En contraste, se observa que en la tormenta de marzo el contenido de energía de H⁺ pasa desde valores menores a $0.5 \cdot 10^{15}$ Joule en tiempos de calma, a un pico de $\sim 2.5 \cdot 10^{15}$ Joule posterior a que la tormenta alcance su máximo. En la tormenta de junio la variación es mucho más significativa, con un salto de $\sim 0.5 \cdot 10^{15}$ Joule en tiempos de calma a un valor superior a $5 \cdot 10^{15}$ Joule previo a que la tormenta alcance su máximo.

5.3. La relación Dessler-Parker-Sckopke

Actualmente hay tres métodos principales para deducir la intensidad de la Corriente Anillo: mediciones de perturbaciones magnéticas terrestres, mediciones de perturbaciones magnéticas en altitudes altas o mediciones directas de las partículas de la Corriente Anillo. Lo más utilizado son los magnetómetros terrestres, y mayormente se usa el índice *Dst* derivado de los mismos, como estimador de la Corriente Anillo (Turner et al., 2001).

En este trabajo se emplearon las mediciones directas de partículas para calcular variaciones magnéticas estimadas en superficie y comparar lo obtenido con los valores medidos del índice *Dst*.

Las partículas cargadas, confinadas en el Campo Geomagnético, distorsionan al mismo disminuyendo la componente horizontal del campo en superficie como se describió en la Sección 2.8.1. Considerando una configuración de campo magnético dipolar y que la depresión medida en el mismo por el índice *Dst* o *SYM-H* se debe únicamente a la perturbación asociada con la Corriente Anillo (Sandhu et al., 2018), (Dessler & Parker, 1959) derivaron la Ecuación 5.14, la

cual vincula la variación del Campo Geomagnético en el centro de la Tierra (B_z^m), con la energía cinética total de las partículas (U_K) en la Corriente Anillo:

$$\frac{B_z^m}{B_e} = -\frac{2 U_K}{3 U_D}, \quad (5.14)$$

siendo B_z^m antiparalela al dipolo, B_e es el campo magnético en superficie en el Ecuador, y U_D es la energía magnética del dipolo por encima de la Tierra.

Dessler & Parker (1959) obtuvieron la Ecuación 5.14 a partir de las siguientes idealizaciones: distorsiones del campo magnético de primer orden, simetría axial, no se consideró la gravedad, se despreciaron los efectos de las corrientes en la magnetopausa y la magnetocola, y distribuciones de partículas con 0 o 90 grados de inclinación con respecto al campo Magnético Local. Luego Sckopke (1966), extendió la validez de la formulación para todas las distribuciones del ángulo de inclinación.

A continuación se describe el procedimiento analítico seguido por (Olbert et al, 1968) para derivar la Ecuación 5.14 a partir del teorema de Virial.

Para un sistema cerrado en estado estacionario, el teorema de Virial establece:

$$2U_K + U_{EM} + U_G = 0 \quad (5.15)$$

Donde U_K es la energía cinética total, U_{EM} es la energía electromagnética total, y U_G es la energía gravitacional total. El sistema Tierra-magnetosfera puede describirse por la Ecuación 5.15. Sus términos pueden descomponerse en los términos de energía correspondientes a la Tierra, denotados por el superíndice e , los asociados a la magnetosfera denotados por el superíndice m , más los términos de energía correspondientes a la interacción con el superíndice i :

$$2U_K^e + U_{EM}^e + U_G^e + 2U_K^i + U_{EM}^i + U_G^i + 2U_K^m + U_{EM}^m + U_G^m = 0 \quad (5.16)$$

A su vez, varios términos de la ecuación anterior se cancelan. Si se tiene en cuenta que la Tierra es un sistema estable: $2U_K^e + U_{EM}^e + U_G^e = 0$.

Además la energía debida a los campos eléctricos es despreciable en comparación a la producida por el campo magnético con lo cual, $U_{EM}^m = U_M^m$ y $U_{EM}^i = U_M^i$. Por otra parte si se ignoran ciertas interacciones entre la ionosfera y la magnetosfera, como precipitaciones de partículas, $U_K^i = 0$. También U_G^m (la energía auto-gravitacional de las partículas de la magnetosfera), es despreciable en comparación a U_G^i (la energía gravitacional de las partículas de la magnetosfera en el campo gravitacional de la Tierra).

El término U_M^i se puede expresar en el caso de un dipolo magnético como:

$$U_M^i = -\vec{u}^e \times \vec{B}^m(0), \quad (5.17)$$

donde $-\vec{u}^e$ es el momento dipolar de la Tierra y \vec{B}^m es el campo magnético de las partículas de la magnetosfera evaluado en el centro del dipolo. Además, si se considera el eje z del sistema de coordenadas centrado en el dipolo, antiparalelo a \vec{u} , la Ecuación 5.17 se puede reescribir como $U_M^i = u^e B_z^m(0)$. A su vez, a la energía magnética del dipolo centrado en una esfera de un radio terrestre, denotada como U_D , se la expresa:

$$U_D = \frac{1}{3} u^e B_e \quad (5.18)$$

donde B_e es el valor ecuatorial del campo del dipolo en la superficie de la esfera.

Entonces,

$$U_M^i = 3U_D \frac{B_z^m(0)}{B_e}. \quad (5.19)$$

Con las simplificaciones y modificaciones anteriores, la Ecuación 5.16 resulta

$$\frac{B_z^m(0)}{B_e} = -\frac{2U_K^m + U_M^m + U_G^i}{3U_D}. \quad (5.20)$$

Dado que $(U_M^m + U_G^i) \ll 2U_K^m$, la Ecuación 5.20 se reduce a la Ecuación 5.14.

La energía magnética U_D es calculada como $U_D = 4\pi B_e^2 R_e^3 / (3\mu_0)$, donde R_e es el radio de la Tierra y μ_0 es la permeabilidad en el vacío. De modo que al reemplazar con esta expresión a U_D en la ecuación 5.14 y renombrando a B_z^m , la perturbación magnética en el centro de la Tierra debido a las partículas como $\Delta B_{partículas}$, y a U_K , la energía contenida en el flujo de partículas como E^C , la Ecuación 5.14 derivada por (Dessler & Parker, 1959), y luego generalizada por (Sckopke, 1966) resulta:

$$\Delta B_{partículas} = -\frac{\mu_0}{2\pi B_e R_e^3} E^C, \quad (5.21)$$

a esta expresión se la conoce como la relación DPS.

5.3.1. Estimación de la variación magnética debida al flujo de H^+ durante las tormentas geomagnéticas estudiadas

La Figura 5.5 muestra en color azul, los valores estimados de la variación magnética en el centro de la Tierra debido al flujo de H^+ en la Corriente Anillo (ΔB^{H^+}) entre el 16/03/2015 y el 29/03/2015 inclusive, calculados usando la Ecuación 5.21 y utilizando los valores de E^C calculados según lo explicado en la Sección 5.2. De la misma forma, en la Figura 5.6 se muestran los valores ΔB^{H^+} del 21/06/2015 al 29/06/2015 inclusive. Cada contenido de energía parcial asociado al flujo de H^+ , que se estimó para cada media vuelta de la configuración orbital de RBSP-B en los días de las tormentas, se escaló por la constante de la Ecuación 5.21 (considerando $B_e = 3.2 \cdot 10^{-5}$ T, $\mu_0 = 1.25663706 \cdot 10^{-6}$ m kg s⁻² A⁻² y $R_e = 6371$ km), obteniéndose los ΔB^{H^+} estimados. También se graficaron en ambas figuras las variaciones del índice *Dst* (curva en negro), cada punto es el promedio de los valores horarios del *Dst* en cada intervalo de tiempo correspondiente a cada media vuelta de la sonda, asociado al instante medio entre el momento de pasaje por el perigeo y apogeo de la media vuelta considerada.

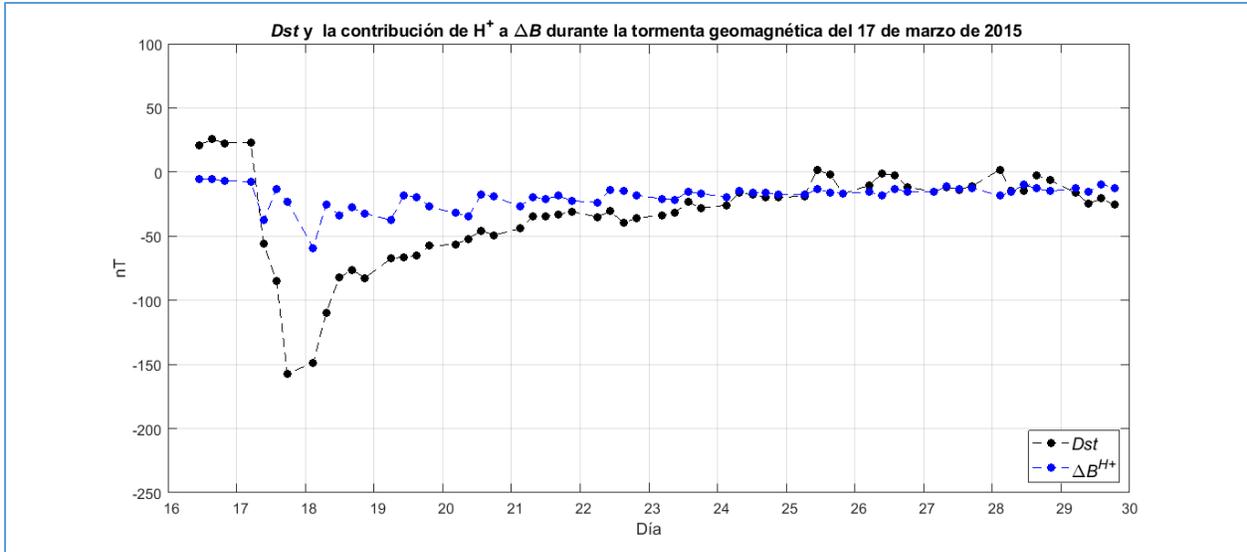


Figura 5.5. Variación magnética estimada ΔB^{H^+} debida al flujo de H^+ (curva azul) y los valores promediados de Dst (curva negra) para cada media vuelta de la configuración orbital de RBSP-B, durante la tormenta geomagnética de marzo de 2015.

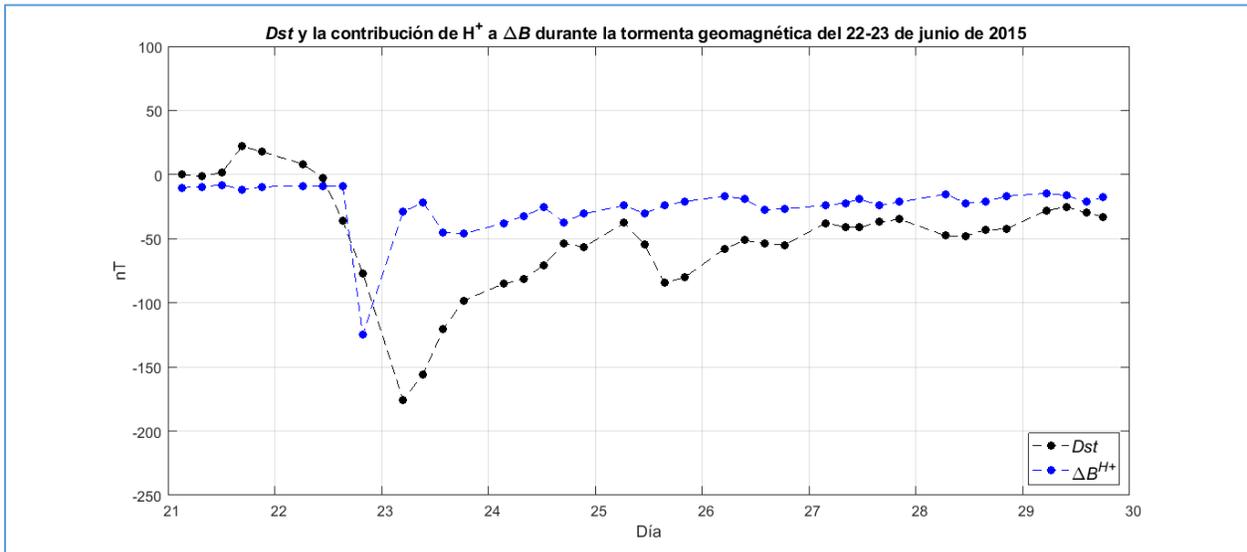


Figura 5.6. Variación magnética estimada ΔB^{H^+} debida al flujo de H^+ (curva azul) y los valores promediados de Dst (curva negra) para cada media vuelta de la configuración orbital de RBSP-B, durante la tormenta geomagnética de junio de 2015.

La perturbación magnética estimada de H^+ se aproxima bastante a la curva de variación del índice Dst en el caso de la tormenta de marzo, lo cual puede observarse en la Figura 5.5. En la Figura 5.6 se aprecia que durante la tormenta de junio, las curvas se encuentran más distantes entre sí, incluso en los días de la fase de recuperación.

También se observa en ambas tormentas, que cuando ocurre el mínimo del Dst , el ΔB^{H^+} se encuentra cerca de un mínimo relativo. La mayor variación ΔB^{H^+} en la tormenta de marzo ocurre luego del mínimo del Dst . Mientras que en la tormenta de junio, ΔB^{H^+} alcanza la mayor depresión antes que el Dst .

5.3.2. Variaciones magnéticas estimadas de los flujos de He^+ y O^+

De la misma forma que se calcularon los ΔB^{H^+} , se estimaron las perturbaciones magnéticas proporcionadas por los flujos de O^+ y He^+ , ΔB^{O^+} y ΔB^{He^+} respectivamente, para estimar la variación magnética total:

$$\Delta B = \Delta B^{H^+} + \Delta B^{He^+} + \Delta B^{O^+} . \quad (5.22)$$

En la Tabla 5.1 se muestran los valores del Dst y las variaciones magnéticas debidas a cada especie de iones correspondientes al momento en que el Dst alcanza su mínimo durante las tormentas geomagnéticas de marzo y junio de 2015. Se aprecia que las especies He^+ y O^+ no contribuyen con valores significativos en ninguna de las dos tormentas analizadas, lo cual era esperable dado los gráficos obtenidos al estimar la energía contenida en esos iones en la Sección 5.2. Este resultado coincide con estudios previos, por ejemplo el de (Poblet, 2020), en donde para el período de medición 2013-2018 se concluye que los flujos de He^+ y O^+ se pueden considerar despreciables en cuánto a su capacidad de generar variaciones magnéticas en superficie.

Tabla 5.1
Dst y variaciones magnéticas en los máximos de las tormentas del 17/03/2015 y del 23/06/2015.

| | <i>Dst</i> | ΔB | ΔB^{H^+} | ΔB^{He^+} | ΔB^{O^+} |
|------------|------------|------------|------------------|-------------------|------------------|
| 17/03/2015 | -157.25 | -27.3 | -23.01 | -1.39 | -2.9 |
| 23/06/2015 | -175.83 | -33.48 | -29.01 | -1.39 | -3.07 |

Por los valores de la Tabla 5.1, se puede concluir que en ambos casos ΔB^{H^+} representa ~ 85% de la variación magnética total estimada durante las tormentas. Por esta razón, se comparó sólo ΔB^{H^+} con el perfil de variación del *Dst* en las gráficas de las Figuras 5.5 y 5.6.

La perturbación en el Campo Geomagnético causada por los iones de la Corriente Anillo durante ambas tormentas y calculada a partir de la relación DPS, representa ~ 20 % de la depresión del índice *Dst* durante la fase principal de las tormentas. En estudios previos, por ejemplo en (Zhao et al., 2015), se concluye a partir del promedio de las mediciones realizadas por la misión Van Allen Probes en ~ 9 horas (lo que sería el período orbital de las sondas), que los iones de la Corriente Anillo pueden representar ~ 45 % del índice *Dst* en la fase principal de una tormenta en particular. Esto es consistente con lo obtenido para las tormentas de marzo y junio de 2015, que es aproximadamente la mitad del porcentaje estimado por (Zhao et al., 2015), considerando que se trabajó con las mediciones en cada media vuelta de la configuración orbital de RBSP-B y no cada órbita completa. También en (Turner et al., 2001) se concluye que la contribución de la energía de la Corriente Anillo a la depresión medida en el *Dst*, en promedio es ~ 50% en la mayoría de los eventos analizados en dicha publicación. En (Poblet, 2020), para el periodo de medición 2013-2018, se observa que el ΔB^{H^+} es aproximadamente una tercera parte del índice *Dst*.

5.4. Corrección al *Dst* por los efectos de las corrientes en la magnetopausa

Estudios previos sostienen que un porcentaje considerable del *Dst* podría no ser causado solamente por la Corriente Anillo. También contribuirían efectos debido a las corrientes inducidas en la tierra, en la magnetopausa y magnetocola.

La suposición estándar es que el *Dst* (una vez corregido por la influencia de otros sistemas de corrientes), es una medición confiable del contenido de energía en la población de partículas de la Corriente Anillo.

Algunos investigadores sostienen que las corrientes de la magnetocola pueden dominar el desarrollo del *Dst* durante las tormentas (Arykov & Maltsev, 1996). Otros argumentan que los iones de la Corriente Anillo contribuyen mayormente en la depresión del *Dst* durante las tormentas (por ejemplo, Hamilton, 1988; Jordanova et al., 1998).

Para remover la contribución de las corrientes de la magnetopausa del *Dst* medido, se propuso la siguiente fórmula (Burton et al., 1975):

$$Dst^* = Dst - b\sqrt{P} + c \quad (5.23)$$

Donde P es la presión dinámica del viento solar, b y c son constantes y el Dst^* es el *Dst* corregido (Turner et al., 2001).

En este trabajo la corrección fue calculada usando la Ecuación 5.23 con los valores de las constantes $b = 8.74 \text{ nT } (nPa)^{-\frac{1}{2}}$ y $c = 11.54 \text{ nT}$ (Turner et al., 2001). Por otra parte, también se realizó la corrección con los valores de las constantes derivadas por (O'Brien & McPherron, 2000), $b = 7.26$ y $c = 11$. Los valores de la presión del viento solar fueron tomados del sitio web https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html.

La Figura 5.7 correspondiente a la tormenta de marzo y la Figura 5.8 correspondiente a la tormenta de junio, presentan el Dst corregido (curva naranja) por los efectos de las corrientes de la magnetopausa. Como las diferencias entre los resultados usando los distintos valores de las constantes b y c son ínfimas, se eligió graficar los resultados obtenidos usando los primeros valores especificados de dichas constantes. También se volvieron a graficar las curvas del Dst (curva negra) y ΔB^{H^+} (curva azul), junto con los valores promediados del índice $SYM-H$ (curva verde). Estos últimos se promediaron de forma análoga a como se realizó con los valores del Dst en la Sección 5.3.1, usando los valores del $SYM-H$ por hora.

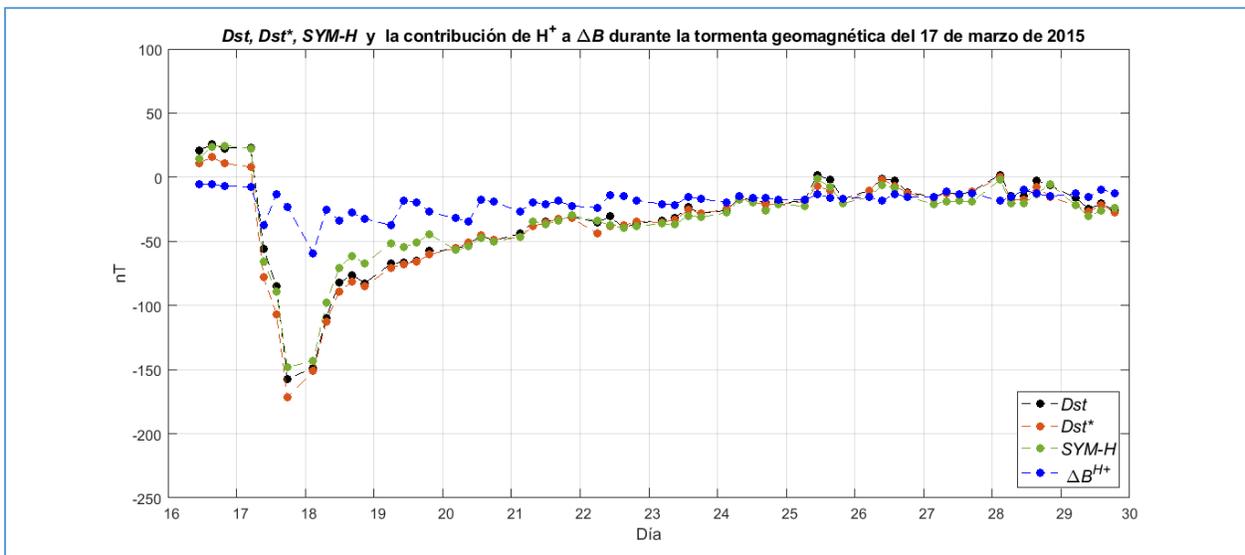


Figura 5.7. Valores estimados ΔB^{H^+} (curva azul) y valores promediados de los índices: Dst (curva negra), Dst corregido por los efectos de las corrientes de la magnetopausa (curva naranja) y $SYM-H$ (curva verde), para la tormenta geomagnética de marzo de 2015.

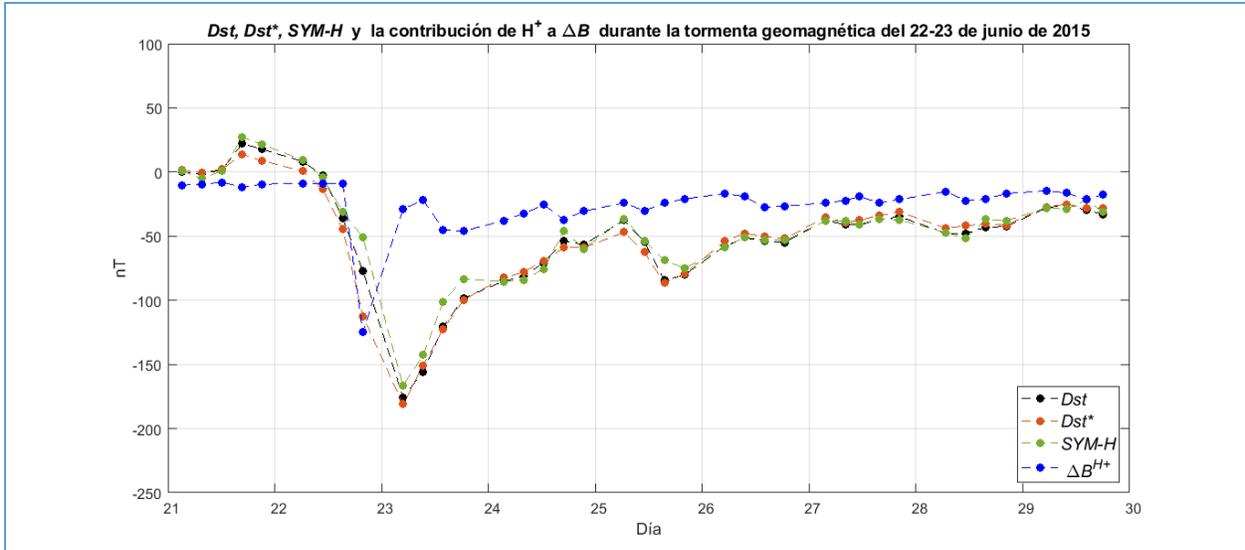


Figura 5.8. Valores estimados ΔB^{H^+} (curva azul) y valores promediados de los índices: Dst (curva negra), Dst corregido por los efectos de las corrientes de la magnetopausa (curva naranja) y $SYM-H$ (curva verde), para la tormenta geomagnética de junio de 2015.

La Tabla 5.2 correspondiente a la tormenta de marzo y la Tabla 5.3 correspondiente a la tormenta de junio, presentan algunos de los valores promediados de los índices y perturbaciones magnéticas de las especies H^+ , He^+ y O^+ . Se observa en los datos de las tablas, que en los máximos de ambas tormentas, cuando los índices alcanzan sus mínimos, la diferencia entre el valor promediado del Dst y el del $SYM-H$ es de ~ 10 nT de magnitud (ver los valores en rojo de las Tablas 5.2 y 5.3), siendo mayor la depresión del Dst . Si bien durante las dos tormentas, el Dst^* presenta mayores variaciones que el Dst y el $SYM-H$ hasta los primeros días de la fase de recuperación inclusive. También se puede afirmar por los datos, que la tormenta de marzo es la que presenta mayor similitud entre los valores del Dst y $SYM-H$. Las perturbaciones magnéticas de H^+ estimadas durante la tormenta de marzo se mantienen aproximadamente en los mismos niveles, pasando de un valor de ~ -23 nT (cuando el Dst alcanza el mínimo), a la mayor variación de ~ -59 nT. Luego de iniciada la fase de recuperación, los valores de ΔB^{H^+} se asemejan cada

vez más a los valores de los índices, y como se aprecia en la Figura 5.7, la curva de ΔB^{H^+} sigue muy bien la variabilidad de las curvas de los índices geomagnéticos.

Comparando las Figuras 5.7 y 5.8, así como las Tablas 5.2 y 5.3, se puede concluir que de las dos tormentas geomagnéticas estudiadas, la de junio tiene las variaciones más significativas. La Tabla 5.3 muestra que los primeros valores estimados de ΔB^{H^+} , ~ -9 nT para el 21 y 22 de junio, correspondientes a tiempos de calma, son mayores a los valores de los índices geomagnéticos. Pero fueron inferiores a los valores de Dst y $SYM-H$ en las últimas estimaciones de ambos días, en las que los índices presentan abruptamente variaciones considerables, superiores a 20 nT de magnitud, que se corresponderían con los choques interplanetarios que ocurrieron antes de que la tormenta se desarrolle y de los cuales se habló en la Sección 4.1.2. Posteriormente la perturbación magnética de H^+ alcanza su valor más significativo, pasando de un valor promedio de ~ -9 nT a ~ -124 nT y superando nuevamente los valores de los índices. Luego el Dst y el $SYM-H$ alcanzan sus mínimos (valores en rojo en la Tabla 5.3), y a partir de entonces durante días de la fase de recuperación, los ΔB^{H^+} son menores a los valores de los índices. La Figura 5.8 muestra como en los últimos días del mes de junio, las curvas de los índices se asemejan muy bien, sus valores prácticamente coinciden.

Tabla 5.2

Variaciones magnéticas estimadas (total y por especie de iones), y valores promediados de *Dst*, *Dst** y *SYM-H* en la tormenta geomagnética de marzo de 2015.

| | <i>Dst</i> [nT] | <i>Dst*</i> [nT] | <i>SYM-H</i> [nT] | ΔB [nT] | ΔB^{H^+} [nT] | ΔB^{He^+} [nT] | ΔB^{O^+} [nT] |
|------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 16/03/2015 | 21.000 | 11.212 | 14.500 | -5.325 | -5.231 | -0.064 | -0.029 |
| | 25.500 | 15.557 | 23.750 | -5.729 | -5.637 | -0.062 | -0.029 |
| | 22.600 | 10.827 | 24.600 | -7.211 | -7.081 | -0.096 | -0.033 |
| 17/03/2015 | 23.166 | 7.866 | 22.500 | -7.474 | -7.327 | -0.109 | -0.037 |
| | -55.750 | -77.861 | -65.500 | -43.235 | -37.709 | -1.835 | -3.690 |
| | -85.000 | -106.963 | -89.400 | -14.469 | -13.241 | -0.393 | -0.834 |
| | -157.250 | -171.256 | -148.250 | -27.319 | -23.013 | -1.394 | -2.911 |
| 18/03/2015 | -148.600 | -151.261 | -143.200 | -67.155 | -59.076 | -2.660 | -5.418 |
| | -110.000 | -112.700 | -97.800 | -26.948 | -25.090 | -0.817 | -1.040 |
| | -82.250 | -89.321 | -71.000 | -36.573 | -33.556 | -1.287 | -1.729 |
| | -76.200 | -81.206 | -61.200 | -29.496 | -27.621 | -0.872 | -1.002 |
| | -82.500 | -85.121 | -67.250 | -34.601 | -32.317 | -1.054 | -1.229 |
| 19/03/2015 | -67.400 | -70.453 | -51.600 | -40.130 | -37.393 | -1.312 | -1.424 |
| | -66.400 | -67.587 | -54.600 | -19.300 | -18.488 | -0.475 | -0.336 |
| | -65.000 | -65.942 | -51.000 | -20.233 | -19.444 | -0.455 | -0.333 |
| | -57.600 | -60.420 | -44.400 | -28.401 | -27.019 | -0.739 | -0.643 |

Tabla 5.3

Variaciones magnéticas estimadas (total y por especie de iones), y valores promediados de *Dst*, *Dst** y *SYM-H* en la tormenta geomagnética de junio de 2015.

| | <i>Dst</i> [nT] | <i>Dst*</i> [nT] | <i>SYM-H</i> [nT] | ΔB [nT] | ΔB^{H^+} [nT] | ΔB^{He^+} [nT] | ΔB^{O^+} [nT] |
|------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 21/06/2015 | 0.166 | 1.635 | 0.833 | -10.366 | -10.251 | -0.092 | -0.023 |
| | -1.400 | -0.597 | -5.000 | -9.434 | -9.332 | -0.082 | -0.019 |
| | 1.750 | 2.271 | 1.000 | -8.189 | -8.107 | -0.066 | -0.015 |
| | 22.200 | 13.797 | 27.200 | -11.690 | -11.553 | -0.104 | -0.032 |
| | 17.750 | 8.818 | 21.500 | -9.600 | -9.499 | -0.084 | -0.017 |
| 22/06/2015 | 8.333 | 0.616 | 9.500 | -8.858 | -8.748 | -0.084 | -0.024 |
| | -2.400 | -13.307 | -4.200 | -9.143 | -9.003 | -0.095 | -0.043 |
| | -36.250 | -44.363 | -30.750 | -9.453 | -9.327 | -0.089 | -0.036 |

| | | | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|---------|
| | -77.000 | -112.308 | -51.000 | -141.900 | -124.688 | -5.685 | -11.526 |
| 23/06/2015 | -175.833 | -181.132 | -166.333 | -33.488 | -29.014 | -1.397 | -3.076 |
| | -155.750 | -150.711 | -142.750 | -23.672 | -21.583 | -0.977 | -1.112 |
| | -120.600 | -122.381 | -101.000 | -50.726 | -44.939 | -2.555 | -3.231 |
| | -98.500 | -99.710 | -83.250 | -51.303 | -46.099 | -2.449 | -2.754 |
| 24/06/2015 | -85.000 | -82.347 | -85.333 | -41.155 | -37.855 | -1.810 | -1.490 |
| | -81.600 | -78.101 | -84.000 | -34.912 | -32.436 | -1.436 | -1.040 |
| | -70.500 | -69.214 | -75.500 | -26.916 | -25.440 | -0.941 | -0.534 |
| | -53.600 | -58.950 | -45.800 | -39.898 | -37.138 | -1.633 | -1.126 |
| | -56.500 | -58.909 | -59.750 | -32.406 | -30.477 | -1.215 | -0.714 |

5.5. Correlación entre ΔB de H^+ y los índices geomagnéticos

Las Figuras 5.9 y 5.10 correspondientes a la tormenta del 17 de marzo de 2015 y del 22-23 de junio de 2015 respectivamente, muestran las rectas de regresión como resultado de las correlaciones entre el ΔB^{H^+} con el Dst (grafico a), Dst^* (gráfico b) y $SYM-H$ (gráfico c); además, pueden apreciarse sus coeficientes de correlación.

Para la tormenta de marzo se tienen valores altos de correlación en los tres casos, el coeficiente de correlación (ρ) es prácticamente el mismo, levemente superior a 0.7. No ocurre lo mismo con los valores de la tormenta de junio, el mejor resultado corresponde a la correlación entre el ΔB^{H^+} y el Dst corregido por los efectos de las corrientes de la magnetopausa, con un coeficiente de correlación: $\rho = 0.55$. Sin embargo, es muy inferior respecto a los valores de la tormenta de marzo.

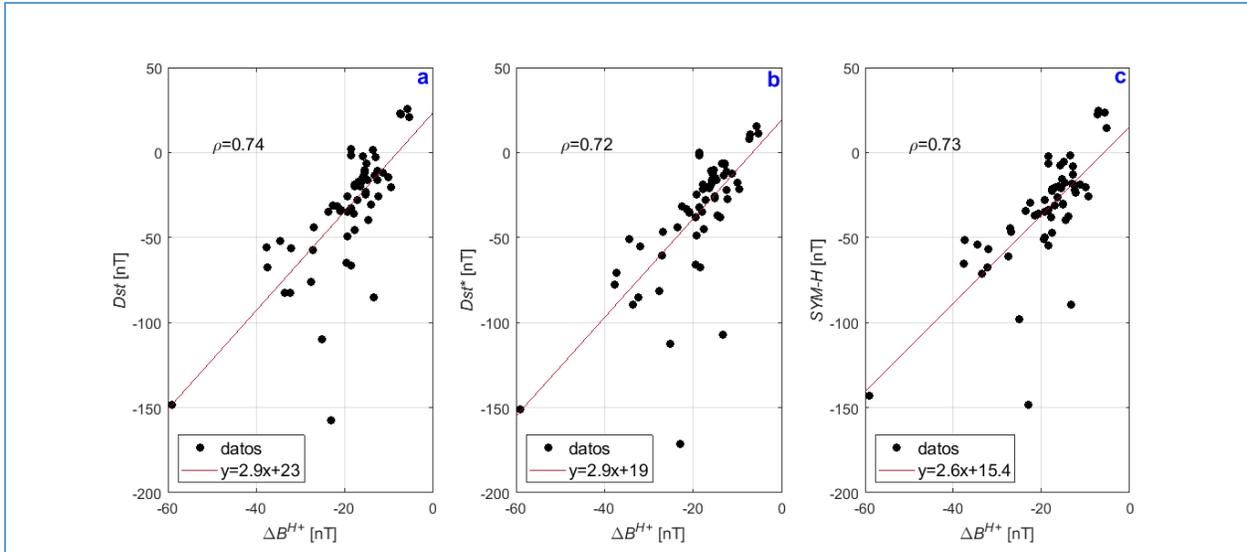


Figura 5.9. Regresión lineal de ΔB^{H+} con Dst (gráfico a), Dst^* (gráfico b), y $SYM-H$ (gráfico c) durante la tormenta geomagnética del 17 de marzo de 2015.

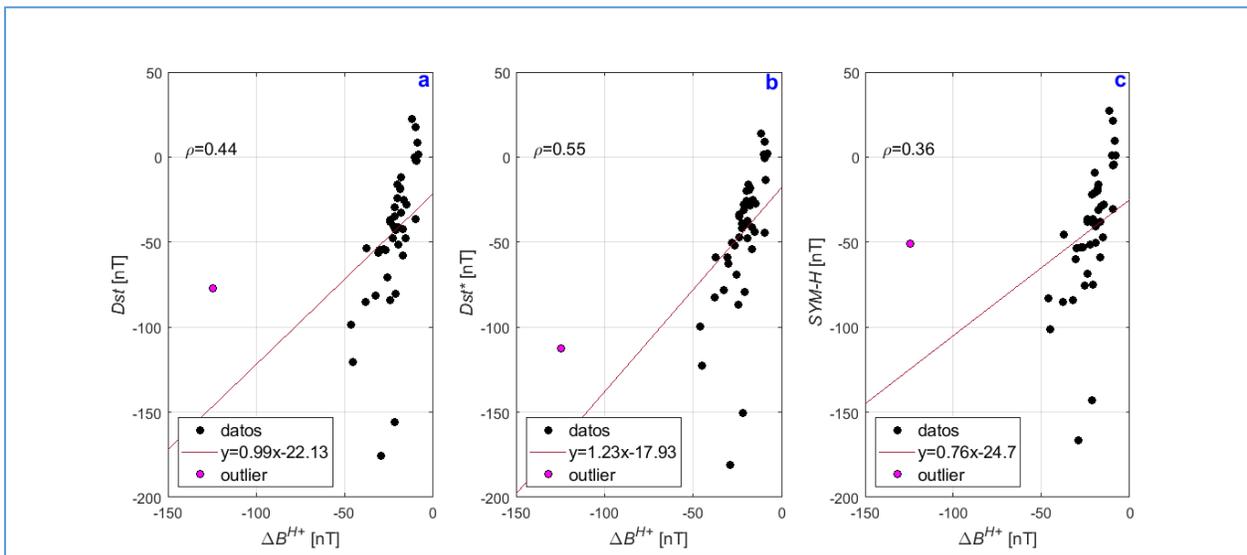


Figura 5.10. Regresión lineal de ΔB^{H+} con Dst (gráfico a), Dst^* (gráfico b), y $SYM-H$ (gráfico c) durante la tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015. Los puntos violetas son los valores considerados anómalos.

Para la tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015, se decidió calcular nuevamente cada recta de ajuste excluyendo el punto indicado en violeta en cada uno de los tres

gráficos de la Figura 5.10, dado que se consideraron puntos anómalos (outliers) por estar distanciados de la nube de correlación que conforman el resto de los valores. Como resultado de este procedimiento se obtuvo la Figura 5.11 donde se observa que los coeficientes de correlación mejoraron notablemente, se muestra una alta correlación lineal de ΔB^{H^+} con el Dst (gráfico a), el Dst^* (gráfico b) y $SYM-H$ (gráfico c). En los tres casos $\rho \cong 0.7$.

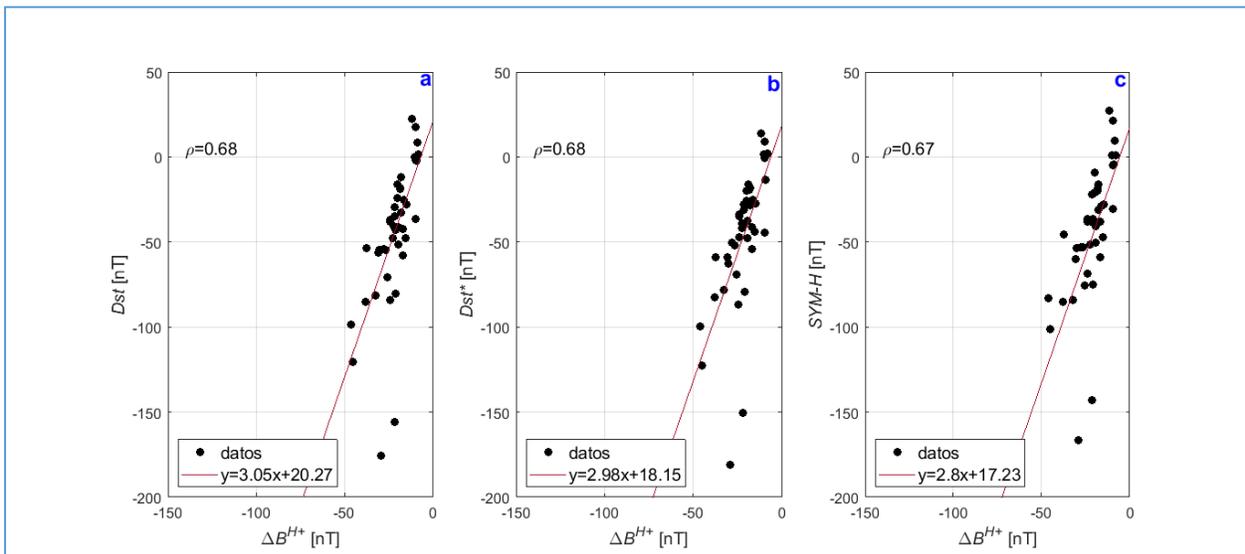


Figura 5.11. Regresión lineal de ΔB^{H^+} con Dst (gráfico a), Dst^* (gráfico b), y $SYM-H$ (gráfico c) durante la tormenta geomagnética del 22-23 de junio de 2015 sin usar los puntos discordantes (puntos violetas) de la Figura 5.10.

Graficando nuevamente las curvas de la Figura 5.8 (Dst , Dst^* , $SYM-H$ y ΔB^{H^+} para la tormenta de junio), pero esta vez sin los puntos discordantes de los gráficos de la Figura 5.10, se obtiene la Figura 5.12. En esta figura se aprecia que los puntos anómalos eran el resultado de correlacionar la mayor perturbación estimada ΔB^{H^+} con los valores correspondientes de los índices geomagnéticos en el momento en que ocurre dicha variación.

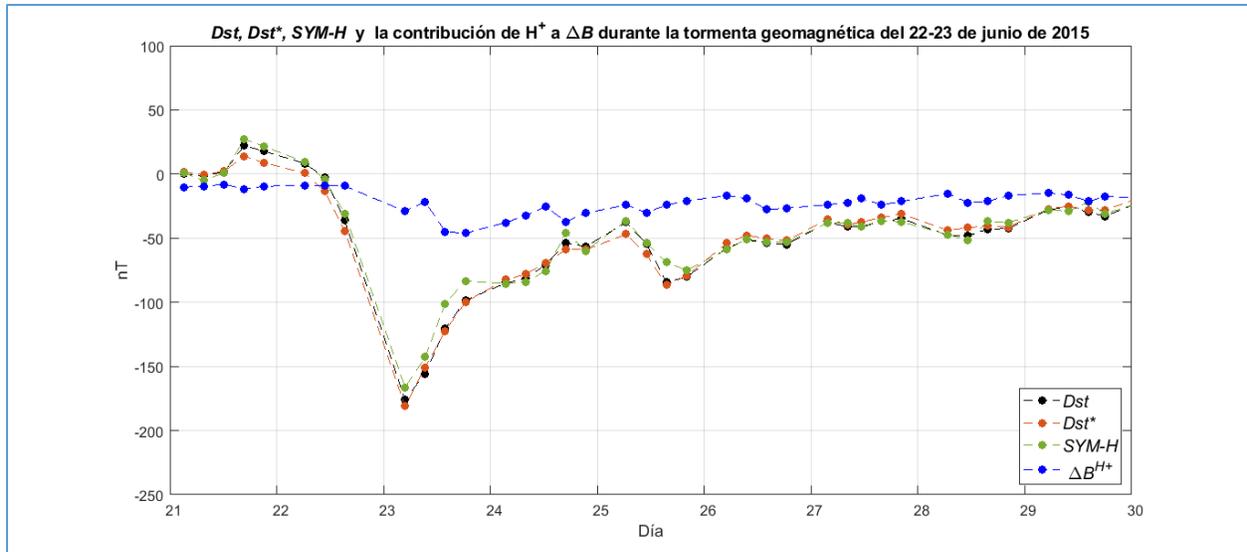


Figura 5.12. Valores estimados ΔB^{H^+} (curva azul) y valores promediados de los índices: Dst (curva negra), Dst corregido por los efectos de las corrientes de la magnetopausa (curva naranja) y $SYM-H$ (curva verde), para la tormenta geomagnética de junio de 2015, sin usar los puntos discordantes (puntos violetas) de la Figura 5.10.

Entonces de la observación de la Figura 5.12 se puede mencionar que la curva del ΔB^{H^+} y las de los índices geomagnéticos se siguen bastante bien, como durante la tormenta de marzo según lo que se observa en la Figura 5.8. Esto coincide con estudios anteriores, por ejemplo el de (Poblet, 2020), en donde se reconoce que el ΔB^{H^+} reproduce muy bien las dos tormentas intensas del 2015.

Capítulo 6

Conclusiones

Los resultados de comparar los análisis realizados a las dos tormentas geomagnéticas más intensas del 2015, revelan varias similitudes entre dichos eventos, las cuales se describen a continuación.

Durante una tormenta geomagnética, la composición iónica de la Corriente Anillo cambia considerablemente (Daglis et al., 1999). Gloeckler et al., (1985) encontraron que en tiempos de calma, la Corriente Anillo consiste principalmente de protones, mientras que en tiempos de tormenta intensa está dominada por iones O^+ . Considerando estas afirmaciones, en los eventos analizados en este trabajo, se verifica que en tiempos de calma los protones más energéticos constituyen la Corriente Anillo. Por otra parte, dado que no hay observaciones disponibles proporcionadas por RBSPICE de O^+ con energías < 140 keV, no es posible confirmar con los resultados obtenidos en este trabajo, la importante contribución que tienen los iones de esta especie con energías < 50 keV según estudios previos, tal es el caso de (Zhao et al., 2015).

Se observa claramente el incremento en los flujos de las especies de iones durante los períodos perturbados. Los flujos omnidireccionales de las tres especies alcanzan sus máximos en la región ecuatorial cercana a la Tierra ($L=2.5-4$). Se producen grandes aumentos en la abundancia de iones He^+ en relación con el ión H^+ y de O^+ en relación con el ión H^+ al momento de las tormentas geomagnéticas. Aun así, se aprecia que los iones H^+ son la especie dominante en los eventos analizados.

Se puede afirmar que las densidades de energía y por ende los contenidos de energía de H^+ , He^+ y O^+ en el interior de la magnetosfera fueron prácticamente constantes antes del inicio

de las tormentas y se incrementaron con la actividad geomagnética. Sin embargo, las contribuciones estimadas de los iones He^+ y O^+ al contenido de energía de la Corriente Anillo fueron muy pequeñas. Los protones contribuyen en una altísima proporción al contenido de energía de la Corriente Anillo.

Como consecuencia de lo mencionado en el párrafo anterior, la variación total ΔB estimada a partir de la relación DPS se debe mayormente a H^+ . Las perturbaciones magnéticas estimadas de He^+ y O^+ son despreciables.

Cuando los índices alcanzan sus mínimos, la diferencia entre el valor promediado del Dst y el del $SYM-H$ es de ~ 10 nT de magnitud, siendo mayor la depresión del Dst . Por otra parte, en ambos eventos, el Dst^* presenta mayores variaciones que el Dst y el $SYM-H$ hasta los primeros días de las fases de recuperación inclusive.

En cuanto a las diferencias observadas entre los eventos, en primer lugar hay que destacar que la tormenta de junio ocurre en un geoespacio más perturbado, horas antes al SSC de la tormenta, en el mismo día, ocurrió una CME y un choque interplanetario el día anterior. Incluso la fase de recuperación fue interrumpida por una CME.

En la tormenta de marzo el aumento en los flujos de H^+ , He^+ y O^+ se da con el inicio de la fase principal y en la tormenta de junio al comienzo de la fase inicial.

La relación DPS predice una correlación negativa entre la variación del campo magnético en superficie y la energía de la Corriente Anillo, con lo cual se esperaría que la energía de la Corriente Anillo se incremente a medida que el Dst y el $SYM-H$ decrecen. Sin embargo, en la tormenta de marzo se observa que el máximo en el contenido de energía de H^+ , se produce con posterioridad al mínimo del Dst . Mientras que en la tormenta de junio, el máximo en el contenido de energía de H^+ , ocurre antes de que el Dst alcance el mínimo. Con lo cual, el Dst

estimado por la fórmula DPS no coincide con el *Dst* observado (derivado de los magnetómetros), y esto se debe en parte, a que el *Dst* observado se encuentra también influenciado por otras corrientes magnetosféricas, y en consecuencia no es una medición exacta de la intensidad de la Corriente Anillo. Además, los flujos medidos no son mediciones globales sino que son mediciones puntuales de una región del espacio determinada.

De los dos eventos, la tormenta de marzo es la que presenta las mejores correlaciones entre el ΔB estimado y cada uno de los índices geomagnéticos. En el caso de la tormenta de junio los coeficientes de correlación mejoran bastante si no se consideran en los cálculos los puntos discordantes, el inconveniente de no considerarlos es que no se trata de puntos cualesquiera, sino que corresponden a la correlación entre la mayor perturbación estimada ΔB^{H^+} con cada uno de los valores de los índices geomagnéticos al momento en que ocurre dicha variación.

Es importante indicar que los contenidos parciales de energía se calcularon basándose en la suposición de que la densidad de energía de la Corriente Anillo es constante en el tiempo magnético local (MLT). Sin embargo, se conoce que la Corriente Anillo es asimétrica especialmente en la fase principal de una tormenta, y el pico en la densidad de energía de la Corriente Anillo generalmente se localiza en el sector de la medianoche (Li et al., 2011). El 17 de marzo de 2015 la sonda RBSP-B atravesó tres veces el interior de la magnetosfera en el sector previo a la medianoche. Incluso se localizaba en el lado nocturno en el momento en que el *Dst* alcanzó su mínimo, tanto en la tormenta de marzo como en la de junio de 2015.

La asimetría de la Corriente Anillo fue estudiada por (Greenspan & Hamilton, 2000), quienes concluyeron que las partículas del sector diurno contribuyen menos al *Dst* que las del lado nocturno (Turner et al. 2001).

Bibliografia

- Akasofu, S., & Chapman, S. (1972). *Solar Terrestrial Physics*. Oxford: Clarendon.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., & Alken, P. (2016). Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 152.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., & Förster, M. (2015). Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 9023-9037.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Hozumi, K., Alken, P., Coisson, P., Hairston, M. R., & Coley, W. R. (2018). Study of the Equatorial and Low-Latitude Electrodynamic and Ionospheric Disturbances During the 22-23 June 2015 Geomagnetic Storm Using Ground-Based and Spaceborne Techniques. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 2424-2440.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Huba, J. D., Doornbos, E., & Van den IJssel, J. (2017). Global ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 11716-11742.
- Baker, D. N., Jaynes, A. N., Kanekal, S. G., Foster, J. C., Erickson, P. J., Fennell, J. F., . . . Wygant, J. R. (2016). Highly relativistic radiation belt electron acceleration, transport, and loss: Large solar storm events of March and June 2015. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 6647-6660.

- Balasis, G., Daglis, I. A., Contoyiannis, Y., Potirakis, S. M., Papadimitriou, C., Melis, N. S., . . . Koutos, C. (2018). Observation of Intermittency-Induced Critical Dynamics in Geomagnetic Field Time Series Prior to the Intense Magnetic Storms of March, June, and December 2015. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 4594-4613.
- Baumjohann, W., Blanc, M., Fedorov, A., & Glassmeier, K.-H. (2010). Current Systems in Planetary Magnetospheres and Ionospheres. *Space Science Reviews*, 152, 99–134.
- Beck, J. G. (2000). A comparison of differential rotation measurements (Invited Review). *Solar Physics*, 191(1):47-70.
- Bothmer, V., & Daglis, I. A. (2007). *Space Weather - Physics and Effects*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Burton, R. K., McPherron, R. L., & Russell, C. T. (1975). An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 80, 4204-4214.
- Chapman, S., & Ferraro, V. C. (1931). A new theory of magnetic storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 36, 77-97.
- Daglis, I. A., Thorne, R. M., Baumjohann, W., & Orsini, S. (1999). The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Reviews of Geophysics*, 407-438.
- Dessler, A. J., & Parker, E. N. (1959). Hydromagnetic theory of geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 2239-2252.
- Fox, N., & Burch, J. L. (2014). *The Van Allen Probes Mission*. New York: Springer.
- Ganushkina, N., Jaynes, A., & Liemohn, M. (2017). Space Weather Effects Produced by the Ring Current Particles. *Space Science Reviews*, 212, 1315–1344.

- Gloeckler, G., Wilken, B., Stridemann, W., Ipavich, F., Hovestadt, D., Hamilton, D. C., & Kremser, G. (1985). First Composition measurement of the bulk of the storm-time ring current (1 to 300 keV/e) with AMPTE/CCE. *Geophysical Research Letters*, 12, 325-328.
- Goldstein, J., Angelopoulos, V., De Pascuale, S., Funsten, H. O., Kurth, W. S., Llera, K., . . . Wygant, J. R. (2016). Cross-scale observations of the 2015 St. Patrick's day storm: THEMIS, Van Allen Probes, and TWINS. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 368-392.
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 5771-5792.
- Greenspan, M. E., & Hamilton, D. C. (2000). A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 105, 5419.
- Guarnieri, F. L., Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, G. A., Grande, M., Soraas, F., & Echer, E. (2006). ICME and CIR storms with particular emphases on HILDCAA events. *ILWS Workshop*.
- Habarulema, J. B., Yizengaw, E., Katamzi-Joseph, Z. T., Moldwin, M. B., & Buchert, S. (2018). Storm Time Global Observations of Large-Scale TIDs From Ground-Based and In Situ Satellite Measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 711-724.
- Hamilton, D. C., Gloeckler, G., Ipavich, F. M., Studemann, W., Wilken, B., & Kremser, G. (1988). Ring Current development during the great geomagnetic storm of February, 1986. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 93, 14343.

- Hurtado de Mendoza, D. (1997). *Estudio teórico y experimental de la inestabilidad de gradiente en la Ionósfera*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2973_HurtadodeMendoza.pdf.
- Jordonova, V. K., Farrugia, C. J., Quinn, J. M., Thorne, R. M., Ogilvie, W. K., Lepping, R. P., . . . Belian, R. D. (1998). Effect of wave-particle interactions on ring current evolution for January 10-11, 1997. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2971-2974.
- Kamide, Y., Baumjohann, W., Daglis, I. A., Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., McPherron, R. I., . . . Vasyliunas, V. M. (1998). Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. *J Geophys Res.*, 17705-17728.
- Korth, A., Friedel, R. H., Mouikis, C. G., Fennell, J. F., Wygant, J. R., & Korth, H. (2000). Comprehensive particle and field observations of magnetic storms at different local times from the CRRES spacecraft. *J. Geophys. Res.*, 105(A8), 18729-18740.
- Krimigis, S. G., McEntire, R. W., Gloeckler, G., Potemra, T. A., Scarf, F. L., & Shelley, E. G. (1985). The magnetic storm of September 4, 1984, a synthesis of ring current spectra and energy densities measured with AMPTE/CCE. *Geophys. Res. Lett.*, 12(5), 329-332.
- Lanzerotti, L. J., & Parker, E. N. (1979). Impacts of ionospheric/magnetospheric process on terrestrial science and technology. En L. J. Lanzerotti, & C. F. Kennel, *Solar System Plasma Physics* (págs. 319-363). New York: vol. III. North-Holland Publishing Company.
- Lemaire, J. F., & Gringauz, K. I. (1998). *The Earth's Plasmasphere*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li, H., Wang, C., & Kan, J. R. (2011). Contribution of the partial ring current to the SYM-H index during magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 116, A11222.

- Liu, Y. D., Huidong, H., Wan, R., Yang, Z., Zhu, B., Liu, Y. A., . . . Richardson, J. D. (2015). Plasma and magnetic field characteristics of solar coronal mass ejections in relation to geomagnetic storm intensity and variability. *The Astrophysical Journal Letters*, 809,L34.
- Lui, A. T., & Hamilton, D. C. (1992). Radial profiles of quiet time magnetospheric parameters. *J. Geophys. Res.*, 97, 19325–19332.
- Lui, A. T., Kamide, Y., & Consolini, G. (2005). *Multiscale Coupling of Sun-Earth Processes*. Amsterdam: Elsevier Science.
- McFadden, L., Weissman, P. R., & Johnson, T. V. (2007). *Encyclopedia of the Solar System*. Elsevier.
- Milan, S. E., Clausen, L. B., Coxon, J. C., Carter, J. A., Walach, M. -T., Laundal, N., . . . Anderson, B. J. (2017). Overview of Solar Wind–Magnetosphere–Ionosphere–Atmosphere Coupling and the Generation of Magnetospheric. *Space Sci Rev*, 206:547–573.
- Mitchell, D. G., Lanzerotti, L. J., Kim, C. K., Stokes, M., Ho, G., Cooper, S., . . . Kerem, S. (2013). Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE). *Space Science Reviews*, 263-308.
- Morozova, A., Barlyaeva, T. V., & Barata, T. (2019). *Variations of TEC over Iberian Peninsula in 2015: effects of geomagnetic storms, solar flares, and solar eclipse*. Coimbra, Portugal: Space Weather.
- O'Brien, T. P., & McPherron, R. L. (2000). An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay. *Journal of Geophysical Research*, 105, 7707-7719.

- Olbert, S., Siscoe, G. L., & Vasyliunas, V. M. (1968). A simple derivation of the Dessler-Parker-Sckopke relation. *Journal of Geophysical Research*, 73(3), 1115–1116.
- Parker, E. N. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *The Astrophysical Journal*, 128, 664.
- Parkinson, W. D. (1983). *Introduction to Geomagnetism*. Scottish Academic Press.
- Pazos, M. M. (2019). Analysis of the effects of geomagnetic storms in the Schumann Resonance station data in Mexico. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105091.
- Pesnell, W. D. (2016). Predictions of solar cycle 24: How are we doing? *Space Weather*, 14, 10-21.
- Poblet, F. L. (2020). *Variación Semianual en flujos magnetosféricos de partículas* (tesis de doctorado). Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. La Plata, Argentina.
- Roederer, J. G., & Zhang, H. (2014). *Dynamics of Magnetically Trapped Particles*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Sandhu, J. K., Rae, I. J., Freeman, M. P., Forsyth, C., Gkioulidou, M., Reeves, G. D., . . . Lam, M. M. (2018). Energization of the Ring Current by Substorms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 8131-8148.
- Sarachaga, M. H., Rodríguez Caderot, G., Rodríguez Bouza, M., Rodríguez Bilbao, I., Sánchez Dulcet, F., Moreno Monge, B., . . . Escayo Menéndez, J. (2014). Estudio de las tormentas geomagnéticas y evaluación de su impacto en el ámbito de las tecnologías e infraestructuras en España y Portugal. *Riesgos naturales*, 18-34.
- Sckopke, N. (1966). A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the earth. *Journal of Geophysical Research*, 71(13), 3125–3130.

- Sugiura, M., & Poros, D. J. (1971). *Provisional hourly values of equatorial Dst for the years 1957 to 1970, Rep. X-645-71-278*. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center.
- Syun-Ichi, A. (2018). A Review of the Current Understanding in the Study of Geomagnetic Storms. *International Journal of Earth Science and Geophysics*, 4:018.
- Turner, N. E., Baker, D. N., Pulkkinen, T. I., Roeder, J. L., Fennell, J. F., & Jordanova, V. K. (2001). Energy content in the storm time ring current. *Journal of Geophysical Research*, 19149-19156.
- Vallat, C., Dandouras, I., Dunlop, M., Balogh, A., Lucek, E., Parks, G. K., . . . Reme, H. (2005). First current density measurements in the ring current region using simultaneous multi-spacecraft CLUSTER-FGM data. *Ann. Geophys.*, 23, 1849–1865.
- Watari, S. (2017). Geomagnetic storms of cycle 24 and their solar sources. *Earth, Planets and Space*, 69,70.
- Williams, D. J. (1980). Ring current composition and sources. En S. Akasofu, *Dynamics of the Magnetosphere* (pág. 407 pp.). Dordrecht: D. Reidel Co.
- Wu, C. C., Liou, K., Lepping, R. P., Hutting, L., Plunkett, S., Howard, R. A., & Socker, D. (2016). The first super geomagnetic storm of solar cycle 24:“The St. Patrick’s Day event (17 March 2015)”. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 151–163.
- Zaho, H., Li, X., Baker, D. N., Fennell, J. F., Blake, J. B., Larsen, B. A., . . . Rodriguez, J. V. (2015). The evolution of ring current ion energy density and energy content during geomagnetic storms based on Van Allen Probes measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 7493-7511.
- Zolesi, B., & Cander, L. R. (2014). *Ionospheric Prediction and Forecasting*. Berlin Heidelberg: Springer.

