

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



Evolución energética y radial del cinturón exterior de Van Allen, durante eventos de aumento de flujo de electrones relativistas en órbita geostacionaria.

Yulissa Carolina Espitia Páez

Profesor Tutor:

Dr. Víctor Pinto

Profesor Cotutor:

Dra. Marina Stepanova

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el grado de Magíster en Ciencia con mención en Física

Santiago – Chile
2025

Resumen

Los cinturones de radiación de Van Allen son regiones del entorno espacial terrestre donde partículas cargadas, principalmente electrones y protones, quedan atrapadas por el campo magnético de la Tierra. Durante episodios de actividad geomagnética intensa, el cinturón externo, compuesto mayoritariamente por electrones, puede experimentar aumentos súbitos en sus flujos, conocidos como eventos de aumento (Radiation Belt Enhancement Events, REE). Estos eventos representan un riesgo para los sistemas satelitales y constituyen un fenómeno clave para comprender la dinámica del clima espacial.

En este trabajo se analizaron 60 eventos REE detectados en la órbita geoestacionaria (GEO) entre 2012 y 2017, con el objetivo de estudiar su evolución radial y energética utilizando datos de los satélites GOES-15 y Van Allen Probes (instrumento REPT). Se evaluó la variación de los flujos máximos post-tormenta en distintos valores de L y canales de energía, caracterizando cómo se distribuyen espacialmente estos eventos y cómo responden en diferentes regiones del cinturón de radiación externo. Los resultados muestran que los eventos REE son más frecuentes y pronunciados en regiones externas ($L > 5$), mientras que hacia regiones internas la ocurrencia y magnitud disminuyen significativamente. Se observó además que el canal de 4 MeV de GOES-15 presenta alta coherencia con los datos multicanal de REPT en la fase post-evento, especialmente para L mayores, lo que permite validar su uso como herramienta complementaria en estudios estadísticos del entorno espacial.

Palabras clave: Cinturones de radiación, Flujos de electrones, Eventos de aumento, Satélite GOES-15, Van Allen Probes, Distribución radial, Electrones relativistas, Clima espacial.

Abstract

The Van Allen radiation belts are regions of the near-Earth space environment where charged particles, mainly electrons and protons, become trapped by the Earth's magnetic field. During periods of intense geomagnetic activity, the outer belt—composed primarily of electrons—can undergo sudden increases in particle fluxes, known as Radiation Belt Enhancement Events (REEs). These events pose a risk to satellite systems and represent a key phenomenon for understanding the dynamics of space weather.

In this work, 60 REE events detected at geostationary orbit (GEO) between 2012 and 2017 were analyzed to study their radial and energetic evolution using data from the GOES-15 satellite and the Van Allen Probes (REPT instrument). The variation of post-storm maximum fluxes was evaluated across different L-shell values and energy channels, characterizing how these events are spatially distributed and how they respond in different regions of the outer radiation belt. The results show that REE events are more frequent and pronounced in outer regions ($L > 5$), while their occurrence and intensity decrease significantly toward inner regions. Additionally, the 4 MeV channel of GOES-15 exhibited strong coherence with the multichannel REPT data in the post-event phase, especially at higher L-shells, validating its use as a complementary tool in statistical studies of the space environment.

Keywords: Radiation belts, Electron fluxes, Enhancement events, GOES-15 satellite, Van Allen Probes, Radial distribution, Relativistic electrons, Space weather.

Dedicatoria

*A mi familia, amigos, pareja, a mi gatito Tito en el cielo y a Taylor Swift.
Gracias por todo.*

Agradecimientos

Esta tesis fue realizada en el marco de los proyectos FONDECYT N° 1211144: "Papel del transporte turbulento y del equilibrio de la presión total en la dinámica de la magnetosfera terrestre" y AIR FORCE OFFICE OF SCIENTIFIC RESEARCH N° FA9550-19-1-0384: "Estudio de la variación de la distribución de la presión del plasma en la magnetosfera durante las tormentas geomagnéticas". Agradezco profundamente el respaldo académico y científico que estos proyectos han proporcionado para el desarrollo de este trabajo.

Quisiera expresar mi especial gratitud a mis profesores guía, quienes no solo me brindaron una orientación constante, sino que también facilitaron los recursos computacionales necesarios para llevar a cabo el análisis de datos. Su apoyo fue clave para alcanzar los objetivos de esta investigación. Asimismo, agradezco a la Universidad de Santiago de Chile y al Programa de Magíster en Ciencias con mención en Física, por ofrecer el entorno formativo y el respaldo institucional que hicieron posible la culminación de este proyecto académico.

Tabla de Contenido

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
1. Introducción	1
1.1. Entorno magnético de la tierra	5
1.2. Campo magnético dipolar y parámetro L	6
1.3. Partículas atrapadas en un campo magnético dipolar e invariantes adiabáticos	10
1.4. Corrientes magnetosféricas e Índices geomagnéticos	13
1.5. Tormentas geomagnéticas y Subtormentas	16
2. Dinámica de los Cinturones de Van Allen	18
2.1. El cinturón exterior de radiación	19
2.2. Eventos de aumento, pérdida y no cambio del flujo de Electrones Relativistas	21
2.3. Mecanismos de Aceleración y Perdida	24
2.3.1. Aceleración y Transporte de Partículas	26
2.3.2. Pérdida de Partículas	27
2.4. Importancia y Limitaciones de los Datos in Situ	28
2.5. Datos satelitales para los Modelados Numéricos	28
3. Obetivos, instrumentación, datos y metodología	32
3.1. Instrumentación	32
3.1.1. MagEIS	34
3.1.2. REPT	35
3.1.3. OMNI	36
	V

3.1.4. GOES y Órbita Geoestacionaria (GEO)	36
3.2. Órbitas de GOES 15 y Van Allen	37
3.3. Procesamiento de datos	38
3.3.1. Selección de eventos de Aumento	39
3.3.2. Cálculo de flujos omnidireccionales	39
3.3.3. Definición del tiempo $t=0$	40
3.3.4. Binning en L y el tiempo	40
3.4. Metodología	42
4. Evolución radial de electrones ultrarrelativistas durante eventos de aumento para Energías de 2 MeV y 4 MeV.	44
4.1. Comparación de los Canales de Energía de 2 MeV y 4 MeV del Satélite GOES-15 .	45
4.2. Eventos de Aumento Observados con el Instrumento REPT	47
4.3. Comparación de la Respuesta de GOES-15 y REPT ante Eventos REE	50
5. Correlación de Flujos Usando REPT y GOES-15 en Función de L para diferentes Canales de Energía.	53
5.1. Porcentaje de ocurrencia de REPT para todas las Energías	54
5.2. Comparación de GOES-15 y REPT para diferentes canales de energía	55
6. Conclusiones y discusión	59
A. Eventos de aumento	61
BIBLIOGRAFÍA	64

Índice de Tablas

1.1. Clasificación de tormentas geomagnéticas basada en el índice Dst. Adaptado de Kotulak et al., 2021.	15
A.1. Lista de eventos de aumento de electrones relativistas utilizados en este estudio. Las fechas corresponden al primer gradiente positivo en los flujos que conduce a un aumento detectado por los satélites GOES (redondeado a la hora más cercana). La tabla también muestra el valor mínimo del índice SYM-H asociado a cada evento, el valor máximo del índice Kp y el conductor del viento solar correspondiente a cada evento (Pinto et al., 2020).	61

Índice de Figuras

1.1. Plasmas en el sistema solar con sus diferentes densidades y temperaturas. Además se agrega parámetro N_D y la longitud de Debye λ_D (Adaptada de Lara, 2024).	1
1.2. Esquema de la magnetosfera terrestre y sus principales regiones adaptada de ILCE, 2023. Se indica la distribución del plasma en función de su energía: en azul (1-10 eV) y en rojo (1-100 eV) (Adaptada de Russell et al., 2016)	2
1.3. Diagramas que ofrecen una vista transversal de la estructura del cinturón de radiación terrestre y su relación con la plasmasfera. A la izquierda se muestra la estructura habitual de los dos anillos que forman el cinturón de Van Allen, mientras que a la derecha se observa el tercer anillo (Mas detalle en la Sección 2.1)(Commissariat, 2013).	3
1.4. Un modelo seccionado de los cinturones de radiación con los dos satélites RBSP sobrevolándolos. Este gráfico también muestra otros satélites cerca de la región de radiación atrapada (Bridgman, 2013).	5
1.5. Intensidad media del campo magnético de la Tierra en la superficie (medida en nanoteslas) entre el 1 de enero y el 30 de junio de 2014 (derecha). La imagen izquierda muestra los cambios en ese campo durante el mismo período (Nature, 2014).	6
1.6. Gráfico que muestra las líneas de campo para valores L de 1.5, 2, 3, 4 y 5. Estas líneas de campo son 1.5, 2, 3, 4 y 5 radios terrestres, respectivamente, desde el centro de la Tierra en el plano del ecuador magnético de la Tierra (es decir, la dirección horizontal) (Golden, 2007).	8
1.7. Movimientos de partículas cargadas en los cinturones de radiación. (Izq.) Giro alrededor de las líneas de campo (v_g). (Centro) Rebote en regiones de mayor intensidad magnética (v_b). (Der.) Deriva por gradientes y curvatura del campo (v_d) (Rancoita et al., 2024).	10
1.8. Deriva y reflexión de partículas en los cinturones de radiación, atrapadas entre puntos espejo a lo largo del campo magnético terrestre. Imagen adaptada de Rancoita et al., 2024.	12
1.9. Frecuencias de giro, rebote y deriva de partículas reflejadas ecuatorialmente en un campo dipolar en función de la capa L para diferentes energías de partículas (Schulz y Lanzerotti, 1974).	13
1.10. La magnetosfera y los sistemas de corrientes magnetosféricas a gran escala. Imagen adaptada de Koskinen y Kilpua, 2022.	14

1.11. Flujo medio de electrones de >2 MeV de SAMPEX a lo largo de dos ciclos solares con índice Dst (línea negra) correlacionado con el límite interior del cinturón de radiación exterior (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013; W. Li y Hudson, 2019).	17
2.1. Descubrimiento de los cinturones de Van Allen. Izquierda: James Van Allen y su equipo con un modelo del Explorer 1. Derecha: Primer esquema de los cinturones de radiación terrestre (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013).	18
2.2. Dinámica del cinturón de radiación exterior observada por las sondas Van Allen en septiembre de 2012. Arriba: Flujos de electrones de 4.5. El eje vertical indica el valor de L, mientras que el eje horizontal muestra el tiempo transcurrido entre el 5 de septiembre y el 15 de octubre, con intervalos de cinco días. La línea blanca marca el instante específico representado en la figura inferior. Abajo: Distribución de los mismos flujos según la latitud magnética, permitiendo observar su evolución desde una perspectiva alternativa. (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013).	20
2.3. Diagramas que proporcionan una vista transversal de la estructura del cinturón de radiación de la Tierra, Arriba: Un diagrama esquemático que muestra la Tierra, los cinturones de radiación exterior e interior. Abajo: Similar a arriba, pero muestra propiedades del triple cinturón de radiación durante el período de septiembre de 2012 (Beatty, 2013).	21
2.4. Evento de aumento de electrones relativistas del 8 de mayo de 2016 observado por el instrumento REPT para diferentes energías. Las líneas rojas cruzadas representan el inicio y fin de la tormenta, mientras que la línea azul cruzada indica el punto en el que el índice Dst alcanzó su valor más negativo (Adaptada de Moya et al., 2017).	22
2.5. Comparación de eventos de flujo de electrones en los cinturones de radiación para dos tormentas geomagnéticas. A la izquierda, el evento del 1 de junio de 2013 muestra una clara disminución del flujo de electrones (evento de pérdida). A la derecha, el evento del 14 de noviembre de 2012 no presenta una disminución significativa (evento sin cambio). Las líneas verticales rojas y azules indican los tiempos de inicio y recuperación de la tormenta, respectivamente. (Adaptada de Moya et al., 2017).	23
2.6. Esquema de la magnetosfera tridimensional que muestra las regiones de convección y difusión, la ubicación de los cinturones de Van Allen y la llegada de un choque interplanetario con un nuevo cinturón de radiación producido por un rápido transporte radial hacia el interior, junto con ondas de frecuencia ultrabaja intensificadas (Mauk et al., 2013).	25

2.7. Pronóstico en tiempo real del cinturón de radiación externo utilizando el modelo VERB, desarrollado por el Space Environment Modeling Group (UCLA). A la izquierda, representaciones tridimensionales del cinturón de radiación externo muestran la intensidad del flujo de electrones relativistas ($\sim 1-2$ MeV) mediante una escala de colores: azul indica flujos bajos y rojo flujos altos. Las trayectorias de los satélites GOES-16, GOES-18 y Arase se indican con líneas punteadas blancas. A la derecha, los paneles muestran: (1) flujos medidos por los satélites, (2) reanálisis del modelo VERB con datos en tiempo real, (3) evolución del viento solar propagado y (4) variación del índice geomagnético Kp.(Y. Shprits et al., 2025).	29
2.8. Comparación entre datos reales de REPT y modelado VERB. La parte superior muestra los flujos de electrones de 1 MeV medidos por el instrumento REPT a bordo de las Van Allen Probes durante un evento de tormenta geomagnética entre el 30 de mayo y el 3 de junio de 2013. En la parte inferior se presenta la salida del modelo VERB, que integra datos observacionales con simulaciones numéricas en tiempo real para 17 de marzo del 2015 (Adaptada de Y. Shprits et al., 2025.	30
3.1. Instrumentos de los satélites de la misión Van Allen Probes. (Extraído de Lara, 2024).	33
3.2. Trayectoria de la misión Van Allen Probes (extraída de Lara, 2024).	33
3.3. Instrumento ECT-MagEIS (Blake et al., 2013).	34
3.4. Instrumento ECT-REPT. (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013).	35
3.5. Instrumento GOES15. (Bowman, 2014).	37
3.6. Órbitas de GOES-15 (azul) y Van Allen Probe-A (rojo). A la izquierda, se muestra la vista esquemática en el plano ecuatorial. A la derecha, la distribución real de posiciones en L y tiempo local magnético (MLT) entre 2012 y 2018. GOES se mantiene en L=6.6, mientras que las sondas Van Allen cubren un rango más amplio en L y MLT (Imagen adaptada de D. N. Baker, Zhao et al., 2019).	38
3.7. Diagrama del proceso de carga, limpieza y combinación de datos OMNI y REPT para el análisis de flujos de electrones y condiciones geomagnéticas.	41
4.1. Esquema de la evolución del flujo para un evento relativista idealizado de aumento de electrones (Azul) y un evento relativista de agotamiento persistente de electrones (Rojo). El parámetro $t = 0$ corresponde al momento en que se aprecia por primera vez la mejora (REE) o cuando se completa la pérdida. Las líneas discontinuas verticales representan el tiempo en que se debe alcanzar el valor umbral para REE y la duración mínima permitida para las pérdidas persistentes (Pinto et al., 2018).	44

4.2. Comparación de dos eventos de aumento en el flujo de electrones observados por el satélite GOES-15 en los canales >2 MeV y >4 MeV. Los paneles (a) y (g) muestran el índice geomagnético SYM-H. Los paneles (b) y (h) corresponden al flujo de electrones >2 MeV, mientras que los paneles (c) y (i) muestran el flujo >4 MeV. Los paneles (d) y (j) presentan la velocidad del viento solar (V_{sw}), (e) y (k) la densidad del viento solar (n_{sw}), y (f) y (l) la intensidad del campo magnético interplanetario (IMF). La línea punteada vertical indica el inicio de la tormenta geomagnética en cada evento.	45
4.3. Relación entre los flujos máximos pre y post evento observados por GOES-15 en los canales >2 MeV (izquierda) y >4 MeV (centro). Las líneas punteadas representan los factores 2 (rojo), 1 (negro) y 0.5 (azul). El panel derecho muestra la correlación entre los flujos post evento de ambos canales.	46
4.4. Comparación de dos eventos de aumento observados por los satélites GOES-15 y Van Allen Probes (REPT) en los canales de 2.1 MeV y 4.2 MeV. A la izquierda se muestra el evento de octubre de 2012, y a la derecha, el de agosto de 2016. En cada conjunto, los paneles (a), (c), (f) y (h) corresponden a los flujos de electrones medidos por GOES-15 para >2 MeV y >4 MeV. Los paneles (b), (d), (g) e (i) muestran los datos del instrumento REPT, representando la evolución temporal y espacial (en L) del flujo de electrones para las mismas energías. Finalmente, los paneles (e) y (j) muestran la evolución del índice geomagnético SYM-H. La línea punteada indica el inicio de la tormenta geomagnética en cada evento.	48
4.5. Distribución de la ocurrencia de eventos de aumento (Enhancement), pérdida (Depletion) y sin cambio (No Change) en función de L para las energías de 2.1 MeV (verde) y 4.2 MeV (morado), medidas con REPT. La clasificación se basa en la razón entre flujos post y pre evento.	49
4.6. Razón post/pre flujo en función de L para las energías de 2.1 MeV (izquierda) y 4.2 MeV (derecha), obtenida con REPT. Se muestran las medianas (puntos negros), el rango intercuartílico (barras de color) y la dispersión total (líneas de error). Las líneas horizontales indican los umbrales de clasificación: aumento ($r > 2$, azul), sin cambio ($0,5 \leq r \leq 2$, negro) y pérdida ($r < 0,5$, rojo).	50
4.7. Correlación entre los flujos de electrones observados por los satélites GOES15 y REPT en los canales de energía de 2 MeV (verde) y 4 MeV (morado). En cada gráfico se incluye el ajuste lineal (línea roja) y el coeficiente de correlación r. Además, se muestra el valor de L correspondiente a cada gráfico	51
4.8. Coeficiente de correlación entre los flujos observados por GOES-15 y REPT en función de L para tres casos: razón post/pre (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha), para las energías de 2.1 MeV (verde) y 4.2 MeV (morado).	52

5.1. Evolución temporal de un evento en octubre de 2014. Los paneles superiores muestran los índices SYM-H y AL, con la línea punteada indicando el inicio de la tormenta geomagnética. Los paneles inferiores presentan los flujos de electrones medidos por REPT en distintos canales de energía, en función del tiempo y L. Los puntos negros indican el L de flujo máximo diario.	53
5.2. Porcentaje de ocurrencia de eventos clasificados como Aumento, Pérdida y Sin cambio en función de L, para ocho canales de energía del instrumento REPT. Cada panel corresponde a un tipo de evento: aumento (Enhancement), pérdida (Depletion) y sin cambio (No change), y cada curva representa una energía distinta	54
5.3. Coeficientes de correlación entre el canal de 2.1 MeV del satélite GOES-15 y los distintos canales de energía de REPT, en función de L. Se presentan tres métricas: razón post/pre-flujo (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha).	56
5.4. Coeficientes de correlación entre el canal de 4.2 MeV del satélite GOES-15 y los distintos canales de energía de REPT, en función de L. Se muestran tres métricas: razón post/pre-flujo (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha).	57

Capítulo 1: Introducción

Un plasma es un gas eléctricamente neutro compuesto predominantemente por partículas cargadas; los roles de las fuerzas eléctricas y magnéticas son fundamentales para comprender su comportamiento (Spjeldvik. y Rothwell, 1985). En el caso de los plasmas espaciales, son gases extremadamente tenues de partículas ionizadas en los que, en promedio, no hay carga neta y al haber muy pocos encuentros cercanos entre partículas en un gas de densidad muy bajo, sólo necesitamos considerar las respuestas de las partículas cargadas a los campos de fuerza en los que se mueven (Chen, 2016; Russell et al., 2016). Calcular estos campos de fuerza puede ser complicado, porque en presencia de interacciones de Coulomb una partícula específica siente los efectos de partículas incluso muy remotas. Afortunadamente, las otras partículas sólo necesitan considerarse en un sentido promedio, y por lo tanto sólo las "interacciones colectivas" de las partículas son importantes (Kulsrud, 2005; Spjeldvik. y Rothwell, 1985).

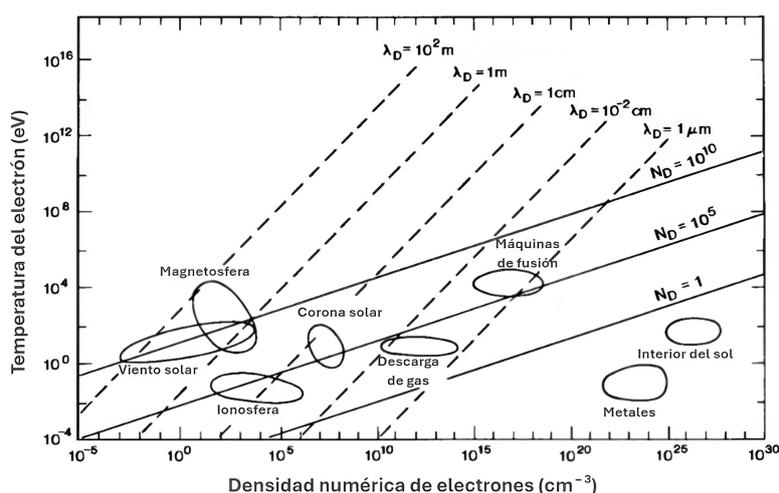


Figura 1.1: Plasmas en el sistema solar con sus diferentes densidades y temperaturas. Además se agrega parámetro N_D y la longitud de Debye λ_D (Adaptada de Lara, 2024).

Dependiendo del grado de equilibrio térmico y las temperaturas típicas de sus componentes los plasmas se clasifican como fríos o calientes. En la Figura 1.1 se observan los distintos tipos de densidades y temperaturas que puede presentar el plasma en el espacio. Regiones como el viento solar, la corona solar y ciertas zonas de la magnetosfera se caracterizan por contener plasma caliente. En estos entornos, tanto electrones como iones tienen temperaturas elevadas, típicamente entre 100 eV y varios keV (1 keV = 1000 eV). Por ejemplo, en la corona solar las temperaturas pueden alcanzar los 100–200 eV (Lara, 2024).

En contraste, el plasma frío se caracteriza por un desequilibrio térmico, los electrones tienen energías de 1 a 10 eV, mientras que los iones permanecen mucho más fríos, con energías del orden de 0.03 a 0.1 eV (lo que equivale a temperaturas cercanas a los 300–1000 K). Este tipo de plasma es común en regiones bajas de la ionosfera terrestre, en las auroras polares y en ciertas zonas de la magnetosfera, donde puede influir en la propagación de señales de radio y en la dinámica de los satélites. La presión dinámica del viento solar, o flujo de momento, presiona los confines del campo magnético, confinándolo a una cavidad magnetosférica que tiene una larga cola formada por dos haces antiparalelos de flujo magnético que se extienden en dirección antisolar (Ripoll et al., 2020; Spjeldvik. y Rothwell, 1985). La magnetosfera terrestre, tal como se muestra en la Figura 1.2, está constituida por plasma frío y caliente, el plasma frío se centra principalmente en la plasmasfera, cerca de la Tierra (Kulsrud, 2005; Spjeldvik. y Rothwell, 1985).

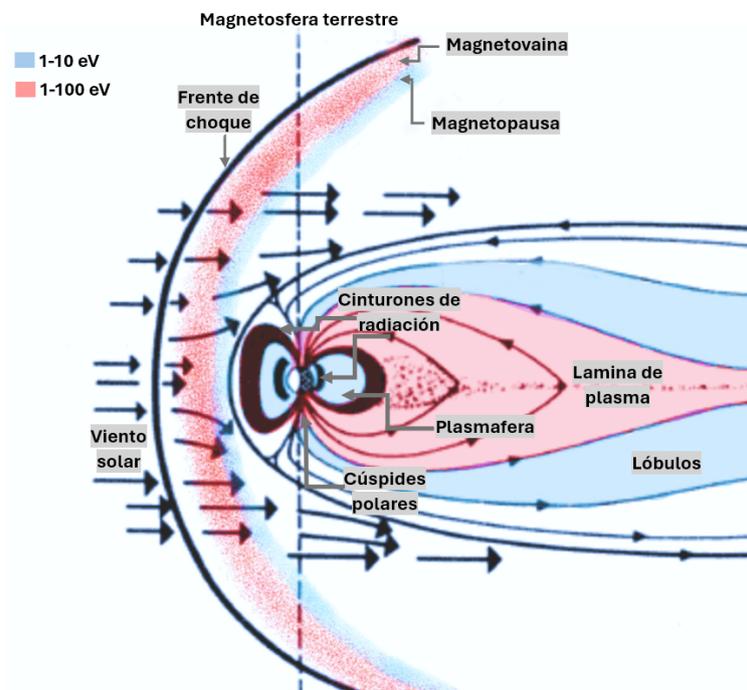


Figura 1.2: Esquema de la magnetosfera terrestre y sus principales regiones adaptada de ILCE, 2023. Se indica la distribución del plasma en función de su energía: en azul (1-10 eV) y en rojo (1-100 eV) (Adaptada de Russell et al., 2016)

Este plasma, de origen ionosférico, se encuentra confinado por las líneas del campo magnético y rota junto con el planeta. Por su baja energía, su influencia se limita a las regiones internas de la magnetosfera, aunque puede ser desplazado o erosionado durante tormentas geomagnéticas severas. La plasmasfera ocupa la región más interna y densa del entorno magnetosférico; a su alrededor se extienden los cinturones de radiación, donde el plasma caliente y los electrones

energéticos predominan. Estas regiones contienen partículas altamente energéticas, como electrones relativistas ($>1\text{MeV}$) y protones, con energías que van desde decenas de keV hasta cientos de MeV (Chen, 2016; Russell et al., 2016). Estas partículas están atrapadas por la configuración dipolar del campo magnético terrestre y siguen trayectorias complejas debido a los procesos de generación, deriva y reflexión en los puntos espejo. El cinturón interior está compuesto principalmente por protones energéticos, mientras que el cinturón exterior es rico en electrones relativistas. En el capítulo 2 Se profundizará sobre la dinámica de los cinturones de radiación en respuesta a perturbaciones del viento solar.

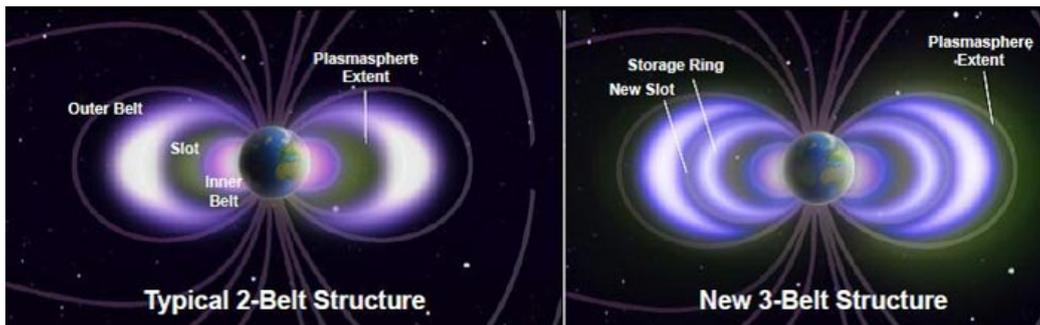


Figura 1.3: Diagramas que ofrecen una vista transversal de la estructura del cinturón de radiación terrestre y su relación con la plasmasfera. A la izquierda se muestra la estructura habitual de los dos anillos que forman el cinturón de Van Allen, mientras que a la derecha se observa el tercer anillo (Mas detalle en la Sección 2.1)(Commissariat, 2013).

La ubicación del cinturón de radiación de la Tierra también depende de la energía de las partículas y su posición radial L (mirar Sección 1.2). Muchos procesos en competencia contribuyen a la formación dinámica y pérdida de electrones en los cinturones, incluidos el transporte radial, la aceleración de ondas locales, la pérdida de partículas a la magnetopausa, la precipitación de partículas a la atmósfera y otros (Herrera et al., 2016; Pulkkinen et al., 2011; Reeves et al., 2003; Tu et al., 2014).

Estos mecanismos en competencia de energización, pérdida y transporte contribuyen en gran medida a generar estructuras complejas mucho más allá de la estructura ideal de dos cinturones (ver Figura 1.3). Estos mecanismos en competencia suelen ocurrir simultáneamente (D. N. Baker, Hoxie et al., 2019; W. Li y Hudson, 2019) y dependen de la energía de los electrones; una descripción precisa de los cinturones de radiación debe tener en cuenta sus efectos combinados.

Comprender cuales son los procesos físicos que gobiernan la dinámica de los cinturones de radiación sigue siendo una de las preguntas abiertas más fundamentales en la física espacial. Responder a esta interrogante de forma completa requiere un enfoque interdisciplinario que combine observaciones in situ, experimentación, teoría y modelación numérica, dado que ningún enfoque por sí solo es suficiente para capturar toda la complejidad del sistema. Estos procesos de aceleración, transporte y pérdida de electrones no solo representan un interés científico para el estudio

de la física del espacio, sino que también tienen implicaciones prácticas, ya que los electrones relativistas pueden causar fallos en los sistemas electrónicos de los satélites, especialmente aquellos ubicados en órbitas medias y geoestacionarias (D. Baker, 2001; Reeves et al., 2003; Turner et al., 2014). Por ello, comprender la dinámica del cinturón de radiación externo es un componente clave en el monitoreo del clima espacial (Newnham et al., 2013; Turunen et al., 2016). A pesar de los avances en la modelación de los cinturones de radiación, los modelos actuales aún presentan limitaciones importantes. Muchos de ellos no logran capturar con precisión la variabilidad espacial y temporal de los flujos de electrones relativistas, especialmente durante eventos extremos (Albert et al., 2009; X. Li et al., 2001; R. M. Thorne, 2010). Un ejemplo representativo es el modelo VERB 3D desarrollado en la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), el cual simula la evolución de la distribución de electrones en función del movimiento de las partículas en las líneas de campo magnético (Y. Shprits et al., 2025). Si bien este modelo ha permitido importantes avances en la comprensión de los procesos de difusión radial, pérdida por precipitación y aceleración local, aún enfrenta desafíos para reproducir de forma precisa la respuesta del cinturón externo bajo condiciones de fuerte perturbación geomagnética. Estas deficiencias pueden deberse a una comprensión incompleta de los mecanismos físicos involucrados, así como a la falta de cobertura observacional continua y de alta resolución en todas las regiones relevantes. En este sentido, el uso de datos satelitales reales sigue siendo fundamental para mejorar la comprensión de estos procesos y validar los modelos existentes.

Entre los satélites que han contribuido significativamente al estudio de los cinturones de radiación se encuentran los Van Allen Probes (Ver Figura 1.4), que brindaron datos de alta resolución entre 2012 y 2019 (Mauk et al., 2013), y el satélite GOES15, cuya ubicación en órbita geoestacionaria lo convierte en una herramienta valiosa para monitorear el comportamiento del flujo de electrones en regiones críticas para los sistemas tecnológicos (Lanzerotti y Baker, 2017; Meredith et al., 2015, 2017; Pinto et al., 2020; Rodríguez et al., 2014). Para esta tesis, se pone especial énfasis en el uso de datos de GOES15 con el fin de estudiar la evolución del cinturón externo durante eventos geomagnéticos perturbados.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal caracterizar la respuesta radial de los flujos de electrones relativistas en el cinturón de radiación externo durante eventos de aumento de electrones relativistas. Se busca identificar y clasificar los eventos en función del comportamiento del flujo de electrones (aumento, pérdida o sin cambio), su dependencia con la energía y la distancia radial (parámetro L).

Para alcanzar este objetivo, se hace uso de datos recopilados por distintas misiones satelitales, entre ellas los instrumentos REPT y MagEIS a bordo de los Van Allen Probes, el satélite GOES-15 en órbita geoestacionaria y los datos interplanetarios del satélite OMNI. La metodología desarrollada incluye la selección de eventos significativos, la normalización de los flujos de electrones, el cálculo de razones post/pre-tormenta, la binarización espacial en L y el análisis de correlación de los diferentes canales de energía de REPT y GOES-15, centrándonos en los canales 2MeV y 4

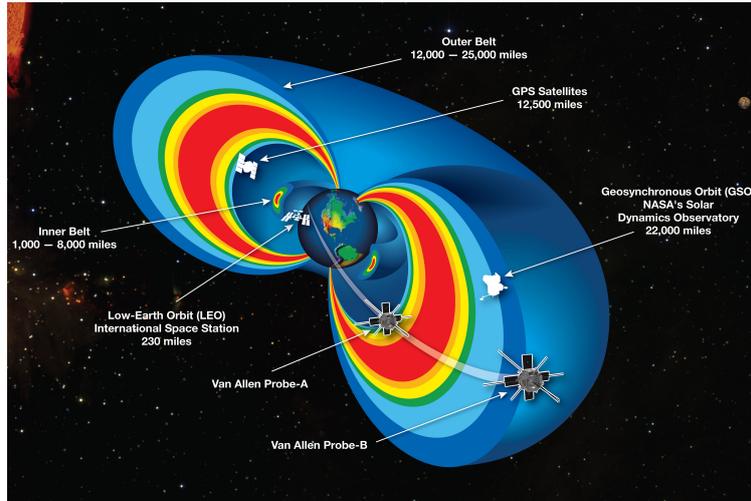


Figura 1.4: Un modelo seccionado de los cinturones de radiación con los dos satélites RBSP sobrevolándolos. Este gráfico también muestra otros satélites cerca de la región de radiación atrapada (Bridgman, 2013).

MeV de GOES-15.

La tesis está estructurada de la siguiente manera: el Capítulo 1 presenta el entorno físico del plasma en la magnetosfera terrestre, incluyendo una revisión de los distintos tipos de movimiento de las partículas atrapadas en las líneas del campo magnético, así como los principales sistemas de corriente magnetosféricas. El Capítulo 2 se enfoca en la dinámica de los cinturones de radiación, abordando los mecanismos de aceleración y pérdida de electrones, su variación según la energía y la ubicación radial. Además, se discuten las limitaciones asociadas al uso de datos in situ para el estudio de estos cinturones y se establecen los objetivos específicos de esta investigación. En el Capítulo 3, se describen la instrumentación utilizada, el origen de los datos y la metodología aplicada, detallando los criterios de selección de eventos, el procesamiento de datos satelitales y los métodos estadísticos empleados. El Capítulo 4 analiza la ocurrencia de eventos REE clasificados en función de L y energía, explorando patrones característicos mediante la razón post/pre de flujo para los canales de 2 MeV y 4 MeV de REPT y GOES-15. El Capítulo 5 está dedicado al análisis de correlación entre los flujos observados por REPT y GOES-15, considerando distintas energías y ubicaciones radiales. Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones generales del estudio y la discusión de los principales resultados obtenidos.

1.1. Entorno magnético de la tierra

El campo magnético terrestre es una de las principales defensas naturales del planeta contra el viento solar y la radiación cósmica. Este campo se origina en el núcleo externo de la Tierra, com-

puesto principalmente de hierro y níquel en estado líquido, cuyas corrientes de convección, junto con la rotación de la Tierra, generan un mecanismo de dínamo que crea y mantiene el campo magnético global (Koskinen y Kilpua, 2022). Este proceso de dínamo terrestre ha estado funcionando durante miles de millones de años, y genera un campo magnético que, en primera aproximación, se comporta como un dipolo alineado aproximadamente con el eje de rotación de la Tierra. El eje del dipolo está inclinado 11° con respecto a la dirección del eje de rotación de la Tierra. El circuito de corriente que da origen al campo magnético se encuentra en el núcleo líquido, a unos 1200–3400 km del centro del planeta (Koskinen y Kilpua, 2022).

A lo largo de las últimas décadas el campo magnético terrestre ha estado sujeto a variaciones temporales y espaciales. Estudios han observado una disminución en la intensidad del campo magnético, especialmente en la región conocida como la Anomalía del Atlántico Sur, donde el campo magnético es inusualmente débil tal como se muestra en las zonas azules de la Figura 1.5 (Goossens, 2003). Esta región es de particular interés porque permite que una mayor cantidad de partículas cargadas energéticas penetren en la atmósfera, lo que representa un desafío para los satélites y otros sistemas en órbita baja terrestre. Además, las variaciones seculares del campo, que incluyen la deriva de los polos magnéticos, son un indicador de los cambios que ocurren en el núcleo terrestre y en el sistema de dínamo que lo genera.

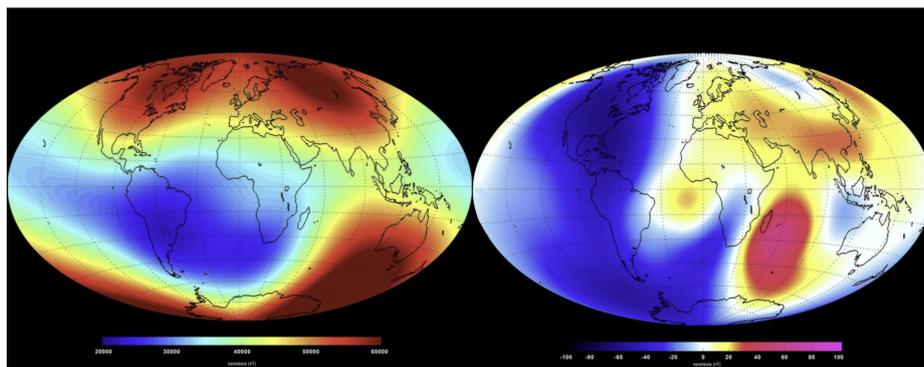


Figura 1.5: Intensidad media del campo magnético de la Tierra en la superficie (medida en nano-teslas) entre el 1 de enero y el 30 de junio de 2014 (derecha). La imagen izquierda muestra los cambios en ese campo durante el mismo período (Nature, 2014).

1.2. Campo magnético dipolar y parámetro L

Se tiene claro que, la interacción del flujo de viento solar con el campo magnético de la Tierra da lugar a una cavidad en el medio interplanetario conocida como la magnetosfera de la Tierra y que dentro de esta cavidad existe una región limitada donde el movimiento de las partículas energéticas está confinado por el campo magnético de la Tierra (Russell et al., 2016; Spjeldvik. y

Rothwell, 1985). Esta región comprende los cinturones de radiación de la Tierra, la cual contiene electrones, protones, helio, carbono, oxígeno y otros. El confinamiento (o atrapamiento) de estas partículas es el resultado de la topología dipolar del campo geomagnético, que se caracteriza por líneas de campo magnético que convergen en latitudes altas hacia los polos, lo que da como resultado una región de intensidad de campo magnético mínima relativa en las proximidades del ecuador geomagnético (Spjeldvik. y Rothwell, 1985). Si un campo eléctrico \mathbf{E} y una inducción magnética \mathbf{B} actúan sobre una partícula con carga q y velocidad \mathbf{v} , la partícula experimenta una fuerza \mathbf{F} , llamada fuerza de Lorentz :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.1)$$

La fuerza magnética ($\mathbf{F} \propto \mathbf{v} \times \mathbf{B}$) modifica la dirección del vector velocidad de la partícula, haciendo que esta gire alrededor del campo magnético \mathbf{B} (Russell et al., 2016). La convergencia de las líneas de fuerza del campo magnético provoca un estrechamiento del ángulo de espiral y, eventualmente, una reflexión de la partícula desde la región de alto campo magnético (punto espejo); por esta razón, el campo magnético de la Tierra es capaz de confinar partículas cargadas, esto crea los cinturones de radiación (Russell et al., 2016), los cuales vimos que están dominados por plasma caliente, compuesto por partículas altamente energéticas, como electrones relativistas y protones, con energías que van desde decenas de keV hasta cientos de MeV. Estas partículas son atrapadas por el campo magnético terrestre en trayectorias complejas debido a la configuración dipolar del campo, experimentando movimientos de gyración, deriva y reflexión (Koskinen y Kilpua, 2022; Spjeldvik. y Rothwell, 1985).

Con una aproximación razonable, el campo magnético de la Tierra en la región del cinturón de radiación puede describirse en términos de un dipolo magnético ubicado cerca del centro de la Tierra. El momento dipolar es $M = 0,312GR_E^3$, y el dipolo está orientado de manera que el polo sur magnético en la superficie terrestre está localizado en el norte de Groenlandia (coordenadas geográficas: 78,5°N, 291° E); en la Tierra, el extremo norte de la aguja de la brújula apunta hacia esta ubicación. La distribución espacial de la intensidad del campo magnético dipolar está dada por (Spjeldvik. y Rothwell, 1985):

$$B = B_E \left(\frac{R}{R_E} \right)^{-3} \frac{[4 - 3 \cos^2 \lambda]^{1/2}}{\cos^6 \lambda} \quad (1.2)$$

donde R es la distancia radial medida desde el centro de la tierra, R_E es el radio de la tierra, $B_E = 0,312G$ es el campo ecuatorial a $R = R_E$ y λ es la latitud magnética. La representación en coordenadas esféricas de un campo magnético dipolar permite calcular fácilmente la ecuación de una línea del campo magnético (Spjeldvik. y Rothwell, 1985). Una línea de campo magnético es

tangente en todas partes a la dirección del campo magnético. Así,

$$r \frac{d\theta}{B_\theta} = \frac{dr}{B_r} \quad (1.3)$$

y

$$d\varphi = 0 \quad (1.4)$$

Integrando la ecuación (1.2), obtenemos la ecuación de una línea de campo magnético:

$$r = r_0 \sin^2 \theta \quad (1.5)$$

donde r_0 es la distancia al cruce ecuatorial de la línea de campo magnético, como se ilustra en la Figura 1.6. Por razones históricas, se volvió usual escribir la ecuación (1.5) en términos de L (con distancia medida en radios planetarios) y la latitud magnética λ (Spjeldvik. y Rothwell, 1985):

$$r = L \cos^2 \lambda \quad (1.6)$$

La distancia donde la línea de campo cruza el ecuador dipolar se expresa a menudo en términos del parámetro L (Koskinen y Kilpua, 2022).

$$L = \frac{r_0}{R_E} \quad (1.7)$$

El parámetro L fue introducido en los primeros días del análisis de datos de Explorer por Carl E. Mcllwain para organizar las observaciones en coordenadas relacionadas con el campo magnético (Russell et al., 2016). En consecuencia, L se conoce como el parámetro L de Mcllwain (Koskinen y Kilpua, 2022) y en la Figura 1.6 se muestra una representación gráfica de este.

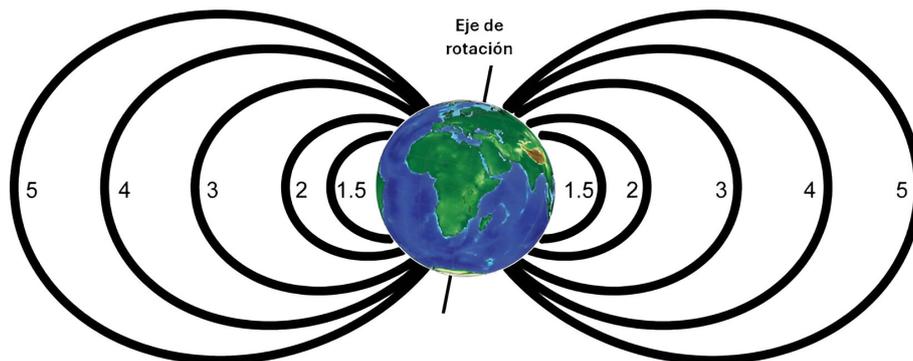


Figura 1.6: Gráfico que muestra las líneas de campo para valores L de 1.5, 2, 3, 4 y 5. Estas líneas de campo son 1.5, 2, 3, 4 y 5 radios terrestres, respectivamente, desde el centro de la Tierra en el plano del ecuador magnético de la Tierra (es decir, la dirección horizontal) (Golden, 2007).

Un parámetro relacionado que se usa con frecuencia para organizar observaciones magnetosféricas de baja altitud es la latitud invariante. Es la latitud donde una línea de campo magnético alcanza la superficie de la Tierra y está dada por:

$$\Lambda = \cos^{-1} \frac{1}{L}^{1/2} \quad (1.8)$$

Así, una línea de campo magnético dipolar que se extiende hasta $4R_E$ en el plano ecuatorial de la magnetosfera mapea a una latitud invariante de 60° en la superficie de la Tierra. Una línea de campo magnético que se extiende hasta $10R_E$ en el plano ecuatorial mapea a una latitud de 71.6° (Koskinen y Kilpua, 2022).

Las porciones más intensas de los cinturones de radiación de la Tierra se encuentran en la parte interna cercana de la magnetosfera, donde el campo magnético es principalmente dipolar. En 1961, Carl McIlwain se dio cuenta de que las observaciones de partículas podrían organizarse fácilmente utilizando las propiedades del movimiento de las partículas en un campo dipolar (Koskinen y Kilpua, 2022; Spjeldvik. y Rothwell, 1985). El ángulo de paso (α) de una partícula cargada en un campo magnético se define como el ángulo entre la velocidad de la partícula y la dirección del campo magnético local. Se expresa como

$$\alpha = \arccos \left(\frac{v_{\parallel}}{v} \right) \quad (1.9)$$

Donde, v_{\parallel} es la componente de la velocidad paralela al campo magnético y v es la magnitud total de la velocidad. El ángulo de paso determina el movimiento de los electrones en los cinturones de radiación, influyendo en su dinámica dentro del campo magnético terrestre (Ripoll et al., 2020). Los electrones relativistas se mueven en espiral alrededor de las líneas del campo magnético con una frecuencia llamada frecuencia de giro de Larmor, mientras que simultáneamente experimentan un movimiento de vaivén entre los polos magnéticos.

Si el ángulo de paso es grande (α cercano a 90°), los electrones quedan atrapados en la magnetosfera y se reflejan en los polos debido al efecto espejo magnético. En cambio, si el ángulo de paso es pequeño (α cercano a 0° o 180°), los electrones pueden precipitarse hacia la atmósfera terrestre, escapando del cinturón de radiación (Koskinen y Kilpua, 2022). Además, los electrones derivan alrededor del planeta en dirección este-oeste debido a la curvatura del campo magnético terrestre. Dado que la distribución angular de los electrones no es uniforme, el flujo medido en un solo ángulo de paso no representa con precisión la población total de electrones en el cinturón de radiación (Pinto et al., 2018).

1.3. Partículas atrapadas en un campo magnético dipolar e invariantes adiabáticos

El movimiento de los electrones en un campo magnético tipo dipolo de estado estacionario se puede describir mediante tres movimientos periódicos: giro alrededor del campo magnético, rebote a lo largo del campo magnético entre los puntos del espejo magnético y deriva de gradiente acimutal de curvatura alrededor de la magnetosfera (Spjeldvik. y Rothwell, 1985). Cada uno tiene un "invariante magnético" asociado que se conserva aproximadamente bajo cambios adiabáticos en el campo magnético, en la Figura 1.7 podemos ver su representación de manera gráfica. Las escalas de tiempo asociadas con el giro, el rebote y la deriva son milisegundos, segundos y decenas de minutos respectivamente (Borovsky y Valdivia, 2018).

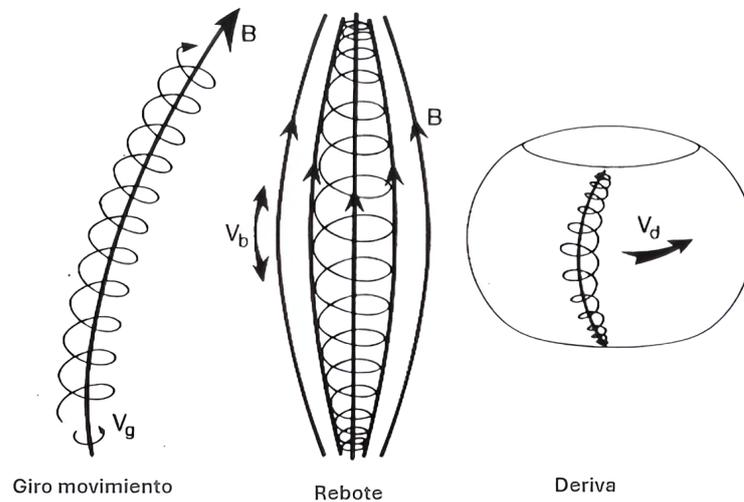


Figura 1.7: Movimientos de partículas cargadas en los cinturones de radiación. (Izq.) Giro alrededor de las líneas de campo (v_g). (Centro) Rebote en regiones de mayor intensidad magnética (v_b). (Der.) Deriva por gradientes y curvatura del campo (v_d) (Rancoita et al., 2024).

El primer tipo de movimiento que tiene una partícula cargada en un campo magnético es un giro alrededor de las líneas de campo. Si el campo magnético es B la frecuencia de giro es $\omega_B = eB/m$ y el radio de giro es $r_B = mv_{\perp}/B_e$ en dónde v_{\perp} es el componente de la velocidad perpendicular al campo magnético y en v_{\parallel} es paralela (Chen, 2016). El primer invariante, μ , está asociado con el movimiento giroscópico alrededor del campo magnético y viene dado por

$$\mu = \frac{p_{\perp}^2}{2m_0B} \quad (1.10)$$

donde m_0 es la masa en reposo, y p_{\perp} es el momento relativista en la dirección perpendicular

al campo magnético, B . Cuando μ se conserva aproximadamente, el movimiento de un electrón puede describirse mediante la teoría del centro guía, que describe el movimiento del girocentro del electrón sin tener en cuenta el movimiento circular alrededor del girocentro (Rancoita et al., 2024). El movimiento del centro guía de un electrón se describe mediante una "capa de deriva" que se asemeja a una sección de la superficie exterior de un toroide. Hay dos invariantes adiabáticos más, uno está relacionado con el movimiento a lo largo de las líneas de campo, entre los puntos del espejo, el llamado movimiento de rebote (Spjeldvik. y Rothwell, 1985). La componente paralela del momento de la partícula se puede escribir como:

$$p_{\parallel} = p \cos \alpha = p \sqrt{1 - \frac{B}{B_m}} \quad (1.11)$$

Una partícula puede moverse a lo largo de una línea de campo hasta que el campo magnético se vuelve igual al campo máximo. Luego girará y se moverá de regreso hacia regiones más débiles. El ángulo de inclinación es mínimo en el ecuador magnético durante cada rebote y se convierte en 90° en puntos de simetría en los hemisferios norte y sur a medida que la partícula penetra en regiones de campo magnético más fuerte (Chen, 2016). Si las variaciones de campo son pequeñas durante un período de rebote de la partícula, el segundo invariante adiabático se expresa como:

$$J_2 = p \int_A^{A'} \sqrt{1 - \frac{B}{B_m}} dl_b \quad (1.12)$$

O también $I = j_2/2B \cong cte$ Esta es una cantidad que se conserva adiabáticamente a lo largo del movimiento de rebote y, para el momento de una partícula dada, está completamente definida por la estructura del campo. Es una propiedad de las configuraciones del campo y también de los puntos de espejo de la partícula y define una superficie o , en la que la partícula permanece mientras se desplaza alrededor de la Tierra (Rancoita et al., 2024). Se mantiene siempre que el campo no cambie apreciablemente durante un período de rebote. En conjunto, el primer y el segundo invariante definen el lugar geométrico de los puntos de espejo de una partícula atrapada que rebota y se desplaza.

El tercer invariante adiabático, esta relacionado con un campo magnético que cambia lentamente, donde los invariantes adiabáticos primero y segundo (generalmente conservados en un campo magnético estático) aún se conservan, el momento de la partícula puede cambiar, pero el flujo magnético en una trayectoria de deriva se conserva.

Está relacionado con el efecto llamado La deriva del gradiente de curvatura, este efecto se debe tanto al gradiente del campo que se aproxima a la Tierra como a la curvatura de las líneas de campo, que producen un movimiento de deriva en el plano perpendicular al eje del dipolo (Rancoita et al., 2024). El primer efecto es que la partícula se encuentra en un campo ligeramente más débil cuando se encuentra en la parte de la rotación más alejada de la Tierra, por lo que el radio de la rotación cambia y esto introduce un desplazamiento lateral en la órbita. La curvatura de la línea de

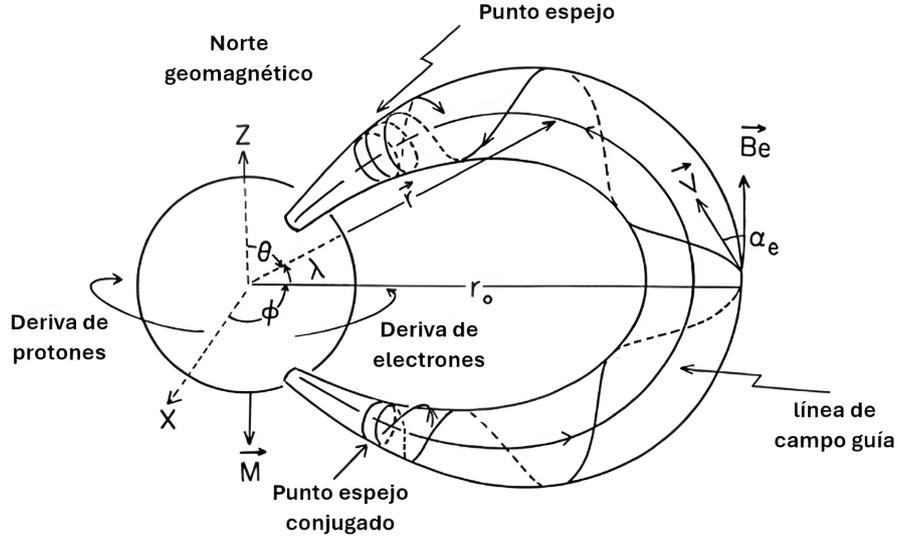


Figura 1.8: Deriva y reflexión de partículas en los cinturones de radiación, atrapadas entre puntos espejo a lo largo del campo magnético terrestre. Imagen adaptada de Rancoita et al., 2024.

campo produce una fuerza centrífuga a la que la partícula responde desplazándose lateralmente (Chen, 2016). De este modo, los electrones son impulsados hacia el este y los protones hacia el oeste. En un campo dipolar, este efecto movería las partículas a la misma distancia de la Tierra (o del centro del dipolo) y serviría simplemente para distribuir las partículas en todas las longitudes. Sin embargo, en el campo real, que no es exactamente dipolar, las trayectorias de deriva no son tan obvias (Chen, 2016):

$$J_3 = \int (q\mathbf{A} + \mathbf{p})d\mathbf{l}_d \cong q\phi \cong cte \quad (1.13)$$

dónde ϕ es el flujo magnético encerrado en la trayectoria de deriva, la Figura 1.8 ilustra los principales efectos de deriva asociados con los diferentes mecanismos de deriva. Por encima de -10 keV, la deriva de la curvatura del gradiente magnético es generalmente más fuerte, y el campo eléctrico estático y los efectos de la gravedad generalmente se descuidan en los estudios de cinturones de radiación (Spjeldvik. y Rothwell, 1985).

La deriva de gradiente-curvatura transporta electrones energéticos hacia el este e iones hacia el oeste. Por lo tanto, habrá una corriente eléctrica neta hacia el oeste que rodeará la Tierra. Esta es la corriente anular extraterrestre (Schulz y Lanzerotti, 1974; Spjeldvik. y Rothwell, 1985). La invariancia se viola si se producen cambios en un tiempo $< \tau_d$, dónde τ_d es el período de deriva. El atrapamiento magnético se produce si los períodos respectivos tienen una jerarquía estricta, por lo que $\tau_g < \tau_b < \tau_d$ dónde τ_g es período de giro y τ_d es el periodo de rebote (Rancoita et al., 2024). Hay que tener en cuenta también que las frecuencias asociadas a cada uno de estos movimientos periódicos son tales que $f_g \gg f_b \gg f_d$. Por esta razón, los tres tipos de

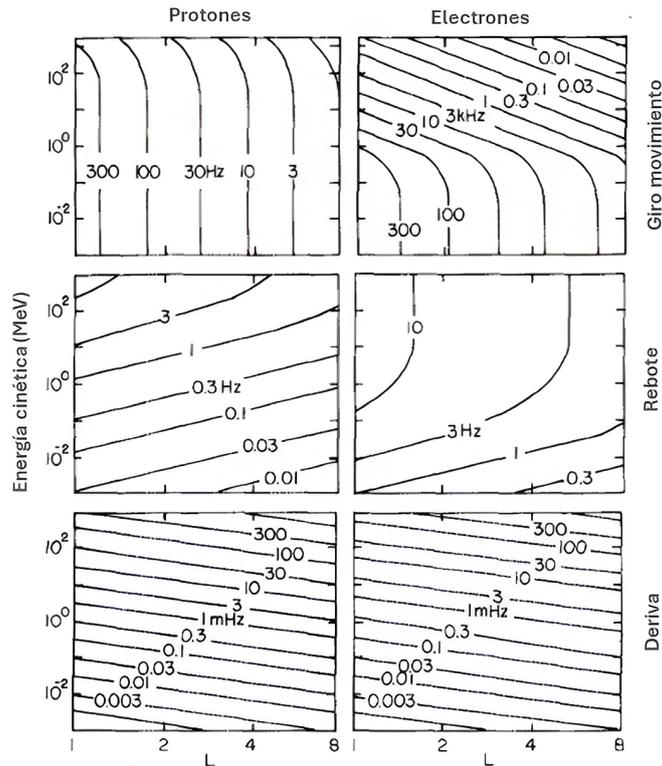


Figura 1.9: Frecuencias de giro, rebote y deriva de partículas reflejadas ecuatorialmente en un campo dipolar en función de la capa L para diferentes energías de partículas (Schulz y Lanzerotti, 1974).

movimientos están en gran medida desacoplados. La Figura 1.9 ilustra los valores numéricos de estas frecuencias fundamentales de movimiento de partículas para protones y electrones en los cinturones de radiación de la Tierra (Schulz y Lanzerotti, 1974).

1.4. Corrientes magnetosféricas e Índices geomagnéticos

La magnetosfera terrestre es la región donde el campo magnético de la Tierra domina el movimiento de partículas cargadas, estableciendo una barrera protectora frente al viento solar (Koskinen y Kilpua, 2022). Su estructura se forma por la interacción entre el geodipolo terrestre ¹ y el viento solar, cuya presión dinámica varía constantemente, generando deformaciones en el campo magnético y dando lugar a sistemas de corrientes magnetosféricas que evolucionan en el tiempo.

Estas corrientes, de gran importancia en la dinámica espacial, se estudian a través de índices geomagnéticos, los cuales han sido utilizados históricamente para caracterizar la actividad geo-

¹ Aproximación del campo magnético terrestre como un dipolo inclinado respecto al eje de rotación, con polos magnéticos y un eje central.

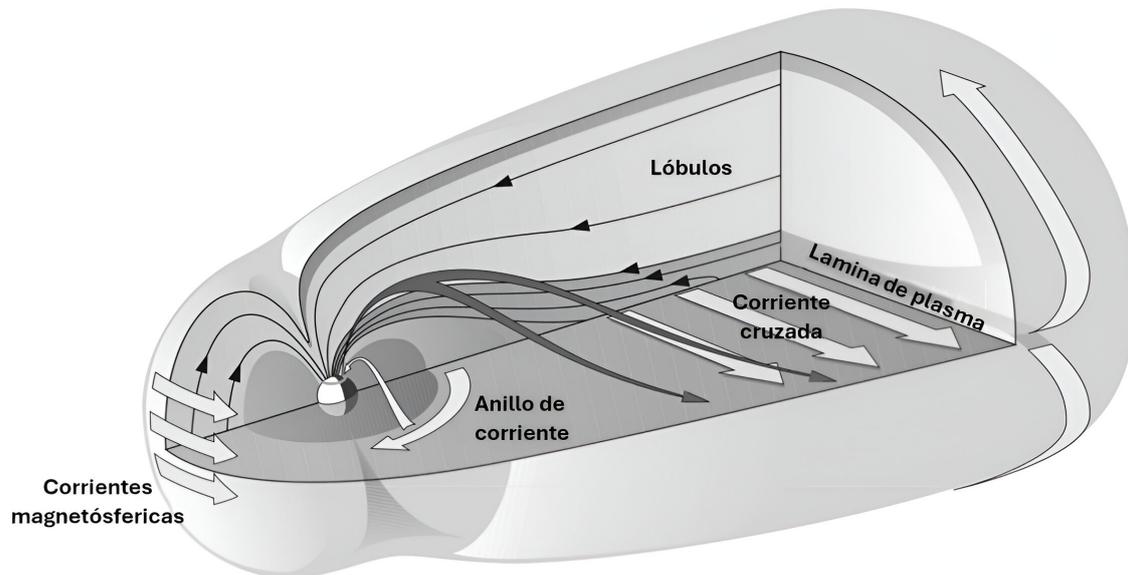


Figura 1.10: La magnetosfera y los sistemas de corrientes magnetosféricas a gran escala. Imagen adaptada de Koskinen y Kilpua, 2022.

magnética (Mayaud, 1980). Dichos índices, calculados a partir de mediciones realizadas por redes globales de magnetómetros terrestres, están disponibles en bases de datos internacionales, como las mantenidas por la Universidad de Estrasburgo. En este trabajo se presentan los principales índices geomagnéticos empleados para evaluar la actividad en la magnetosfera.

Entre ellos, destacan el índice Dst, que mide perturbaciones en la corriente de anillo; el índice Kp, que proporciona una escala global de la actividad geomagnética; y el índice AE, diseñado para analizar la intensidad de los electrojets aurales² (Koskinen y Kilpua, 2022). La magnetosfera está compuesta por distintas regiones, cuya estructura depende del equilibrio entre la presión del viento solar y el campo magnético terrestre, tal como se muestra en la Figura 1.10. La mayor parte de su volumen está ocupada por los lóbulos de la cola magnetosférica, que se extienden en la dirección antisolar y están conectados magnéticamente a los casquetes polares de la Tierra. Estas regiones polares están delimitadas por los óvalos aurales, donde ocurren precipitaciones de partículas energéticas provenientes de la magnetosfera, responsables de las auroras boreales y australes (Koskinen y Kilpua, 2022).

Para caracterizar la intensidad de las corrientes aurales, se emplean los índices de electrojet auroral (AE), calculados a partir de mediciones de magnetómetros en aproximadamente 11 a 12 estaciones situadas bajo el óvalo auroral promedio en el hemisferio norte (Davis y Sugiura, 1966). Dentro de la magnetosfera, la corriente de anillo (RC) juega un papel fundamental en la evolución

²Corriente eléctrica en la ionosfera polar (~90-150 km) causada por la interacción del viento solar con el campo magnético terrestre, relacionada con la actividad auroral.

de tormentas geomagnéticas. Esta corriente fluye en dirección oeste a lo largo del ecuador magnético y su intensidad varía en respuesta a la actividad solar. El índice Dst (Disturbance Storm Time) es utilizado para cuantificar la intensidad de esta corriente y su impacto en la magnetosfera. Se calcula a partir de la variación del componente horizontal del campo magnético (H), medida en cuatro estaciones de baja latitud distribuidas globalmente, con una resolución de una hora (Karinen y Mursula, 2005). Por otro lado, el índice Kp, introducido por Bartels et al., 1939, mide la variabi-

Fecha	Magnitud de la Tormenta	Kp _{máx}	Dst _{mín} [nT]
2011-10-24	Fuerte	7	-79
2012-03-09	Severa	8	-145
2012-11-14	Moderada	6+	-104
2015-03-17	Severa	8-	-223
2015-06-22	Severa	8+	-204
2015-12-20	Fuerte	7-	-155
2016-03-06	Moderada	6+	-98
2017-09-07	Severa	8+	-142

Tabla 1.1: Clasificación de tormentas geomagnéticas basada en el índice Dst. Adaptado de Kotulak et al., 2021.

lidad geomagnética en intervalos de tres horas y es ampliamente utilizado en estudios sobre la actividad espacial. Cada observatorio geomagnético genera su propio índice K, el cual representa la magnitud de las perturbaciones locales del campo magnético. El índice Kp se obtiene como un promedio de los valores K de 13 estaciones de latitudes medias, proporcionando una medida global de la actividad geomagnética. Su escala cuasi-logarítmica varía en pasos de un tercio de unidad, desde 0, 0+, 1-, 1, 1+,..., 8+, 9-, 9, 9-. Debido a su dependencia de observaciones en latitudes medias, Kp es más sensible a la actividad de las corrientes aurales y al desarrollo de subtormentas geomagnéticas, en comparación con el índice Dst. No obstante, su resolución temporal de tres horas impide que capture variaciones rápidas en la magnetosfera (Mayaud, 1980). Un análisis de eventos geomagnéticos recientes durante el ciclo solar 24 se presenta en la Tabla 1.1, donde se detallan algunas tormentas significativas en función de sus valores máximos del índice Kp y mínimos del índice Dst (Kotulak et al., 2021)

Otro componente crucial en la estructura magnetosférica es la corriente de cola cruzada, la cual fluye dentro de la capa de plasma de la cola magnetosférica, cerrándose alrededor de los lóbulos y contribuyendo al equilibrio del sistema (Russell et al., 2016). En regiones más cercanas a los polos, existen configuraciones de campo magnético débil denominadas cúspides polares, las cuales actúan como puntos de entrada para partículas del viento solar. Estas cúspides no se conectan directamente a los polos magnéticos, sino a los óvalos aurales, permitiendo la entrada de partículas hacia la magnetosfera (Koskinen y Kilpua, 2022). En la región ecuatorial, las corrientes

alineadas con el campo (FACs) conectan las corrientes magnetosféricas con las corrientes ionosféricas aurorales, estableciendo una interacción clave en la dinámica geomagnética (Ganushkina et al., 2018). Estas corrientes, junto con las variaciones en la corriente de anillo, afectan significativamente la evolución de la magnetosfera y las perturbaciones registradas en la Tierra.

1.5. Tormentas geomagnéticas y Subtormentas

Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones significativas del campo magnético terrestre, reconocidas desde el siglo XIX, y suelen estar asociadas con eventos de alta actividad solar (Koskinen y Kilpua, 2022). Estas tormentas se caracterizan por una disminución pronunciada del índice Dst y Como se ilustra en la Figura 1.11 , las tormentas, en muchos casos, son períodos de la evolución más dinámica de los cinturones de radiación, lo que indica una intensificación de la corriente de anillo en dirección oeste (X. Li et al., 2017). La magnitud de la tormenta se mide por la negatividad del índice Dst: cuanto más negativo sea el valor, más intensa es la tormenta. No existe un umbral universalmente aceptado para definir cuándo una perturbación geomagnética alcanza el estado de tormenta, lo que hace que la clasificación de eventos débiles pueda ser subjetiva (Koskinen y Kilpua, 2022). En este trabajo, consideramos como tormentas moderadas aquellas con Dst entre -50 y -100 nT, tormentas intensas aquellas con Dst entre -100 y -200 nT, y tormentas severas aquellas con Dst menor a -200 nT, (Borovsky y Shprits, 2017). Además, también utilizamos el índice SYM-H, una medida de 1 minuto derivada de observaciones en estaciones de baja latitud, para caracterizar estas perturbaciones.

El desarrollo de la corriente de anillo durante una tormenta geomagnética no es simétrico, ya que no todos los iones responsables de la corriente siguen trayectorias de deriva cerradas. Una fracción significativa de estas partículas atraviesa la región nocturna de la Tierra y se dirige hacia la magnetopausa diurna, generando una asimetría observable en las mediciones de magnetómetros en diferentes longitudes (Koskinen y Kilpua, 2022). Este fenómeno es evidente en registros obtenidos de estaciones como Honolulu y Kakioka, donde se observa un desarrollo más pronunciado de la fase principal de la tormenta cuando estas estaciones están ubicadas en la región del crepúsculo terrestre. Una vez que la inyección de energía desde el viento solar disminuye, los iones energéticos de la corriente de anillo comienzan a disiparse más rápido de lo que pueden ser reemplazados por nuevas inyecciones desde la cola magnética, lo que lleva a la fase de recuperación de la tormenta (Tsyganenko y Sitnov, 2005).

Desde la perspectiva del cinturón de radiación, las subtormentas magnetosféricas son de gran importancia, ya que inyectan partículas con energías en el rango de decenas a cientos de keV desde la capa de plasma de la cola hacia la magnetosfera interna (Tsyganenko y Sitnov, 2005). Una vez inyectadas, estas partículas se desplazan alrededor de la Tierra, interactuando con el campo magnético y contribuyendo tanto a la corriente de anillo como a las poblaciones de electrones del cinturón de radiación.

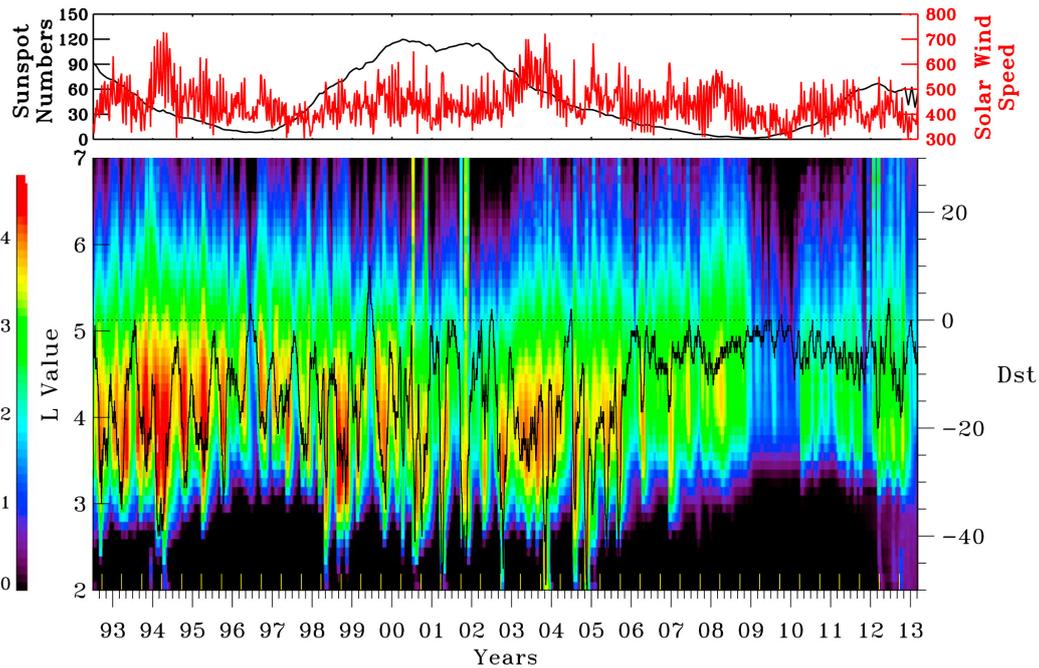


Figura 1.11: Flujo medio de electrones de >2 MeV de SAMPEX a lo largo de dos ciclos solares con índice Dst (línea negra) correlacionado con el límite interior del cinturón de radiación exterior (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013; W. Li y Hudson, 2019).

Estas inyecciones cumplen una doble función: proporcionan partículas que pueden ser aceleradas a energías relativistas, y al mismo tiempo generan ondas electromagnéticas que pueden inducir procesos de aceleración adicional o de pérdida de electrones en el cinturón de radiación (Reeves et al., 2013). Las tormentas geomagnéticas son, en algunos casos, responsables de los cambios en la estructura del cinturón de radiación exterior. Por esta razón, uno de los eventos más estudiados en la literatura es el ocurrido el 1 de marzo de 2013. Durante esta tormenta geomagnética, se observó un aumento significativo en la densidad de electrones energéticos en el cinturón de radiación exterior, acompañado de una intensificación de la radiación.

El índice Dst nos dice qué tan intensa es la tormenta geomagnética, por lo que si se estudia cómo estas tormentas influyen en los cinturones de radiación se podría lograr determinar modelos predictivos que nos ayuden a saber mejor la dinámica de los cinturones de radiación, es por esto que para el 2015, Turner et al. estudiaron 52 tormentas geomagnéticas del máximo solar más reciente y observaron que las respuestas en el tiempo de tormenta de electrones dependen en gran medida tanto de la energía de los electrones como de la capa L, además los electrones relativistas ($\geq \sim 1$ MeV) tenían casi la misma probabilidad de producir eventos de aumento, pérdida y sin cambio en el cinturón exterior (Turner et al., 2015). También mostraron que la capa L de flujo máximo se correlaciona con la magnitud de la tormenta solo para cientos de electrones de keV.

Capítulo 2: Dinámica de los Cinturones de Van Allen

Los cinturones de radiación de Van Allen son regiones del entorno espacial terrestre donde partículas cargadas, principalmente electrones y protones de altas energías, quedan atrapadas debido a la configuración casi dipolar del campo magnético terrestre. Su existencia fue descubierta en 1958 gracias a los datos obtenidos por los contadores Geiger a bordo del satélite Explorer 1, diseñado para estudiar el acceso de los rayos cósmicos a la Tierra (Van Allen et al., 1958). Paralelamente, la nave soviética Sputnik 2, lanzada en noviembre de 1957, realizó mediciones similares (Vernov y Chudakov, 1960). Los electrones altamente energéticos en estos cinturones son conocidos como electrones asesinos debido a su capacidad de inducir fallos en satélites a través de efectos como la carga dieléctrica profunda (D. Baker, 2001; Choi et al., 2011).

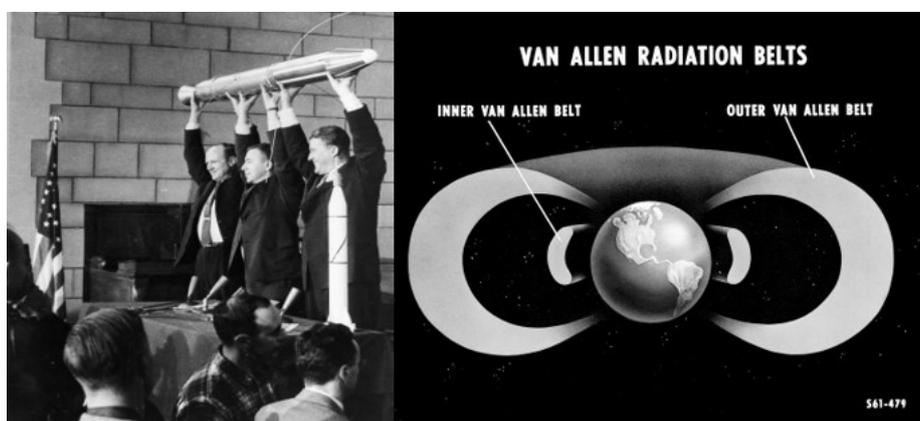


Figura 2.1: Descubrimiento de los cinturones de Van Allen. Izquierda: James Van Allen y su equipo con un modelo del Explorer 1. Derecha: Primer esquema de los cinturones de radiación terrestre (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013).

El cinturón interior, ubicado entre 1 y 3 radios terrestres, está dominado por electrones con energías del orden de cientos de keV y por protones extremadamente energéticos, con energías de hasta cientos de MeV. Más allá de esta región se encuentra la denominada región slot, una zona de baja densidad de partículas cargadas, localizada aproximadamente entre $L \approx 2.5$ y $L \approx 3.0$. Esta región se mantiene relativamente vacía debido a la precipitación eficiente de electrones, inducida principalmente por ondas de tipo plasmaspheric hiss. Reeves et al., 2003 investigaron la evolución de esta zona durante diferentes fases de la actividad geomagnética, demostrando que la región slot no es una estructura estática, sino que puede llenarse temporalmente de electrones relativistas durante tormentas geomagnéticas intensas.

Por otro lado, el cinturón de radiación exterior se extiende típicamente entre 3 y 7 radios terrestres ($1 R_E = 6,370$ km) en el plano ecuatorial y está compuesto principalmente por electrones

de alta energía (0.1–10 MeV) y protones de menor energía (1–100 keV), aunque también se encuentran otras especies iónicas y partículas de menor energía (Ripoll et al., 2020). Sin embargo, esta descripción clásica de los cinturones como estructuras bien definidas y separadas es una simplificación idealizada que solo se mantiene en condiciones geomagnéticas tranquilas. Durante periodos de alta actividad geomagnética, los procesos dinámicos pueden dar lugar a configuraciones más complejas, con la formación de estructuras temporales como cinturones adicionales o la fusión de los cinturones en una única estructura (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013). Además, la distribución espacial de los cinturones depende de la energía de las partículas, lo que añade una capa adicional de variabilidad a su comportamiento (W. Li y Hudson, 2019; Ripoll et al., 2020). En las siguientes secciones, exploraremos en mayor profundidad los procesos físicos que determinan la dinámica del cinturón exterior. En primer lugar, analizaremos los mecanismos de transporte radial, fundamentales para la redistribución de partículas dentro del cinturón. Posteriormente, estudiaremos los procesos responsables del aumento de partículas en el cinturón exterior, así como los mecanismos que conducen a la pérdida de electrones, incluyendo la precipitación en la atmósfera y el escape hacia la magnetopausa. También examinaremos la dependencia de estos procesos con la energía de las partículas y, finalmente, abordaremos la influencia de las tormentas geomagnéticas y las interacciones con el viento solar en la evolución de los cinturones de radiación.

2.1. El cinturón exterior de radiación

Los flujos de electrones en el cinturón de radiación exterior exhiben una alta variabilidad, que se manifiesta tanto en escalas de tiempo cortas como largas. Por ejemplo, la Figura 2.2 muestra los flujos de electrones relativistas en baja altitud observados por la misión SAMPEX (Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer) desde 1993 hasta 2013 (Van Allen et al., 1958). Se puede notar que la intensidad y ubicación de estos flujos presentan fluctuaciones significativas en periodos de días a semanas, pero también muestran una correlación con la actividad solar a largo plazo, reflejada en el número de manchas solares y el ciclo solar de 11 años (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013).

Uno de los hallazgos más relevantes de la misión Van Allen Probes fue la detección de una configuración inusual de los cinturones de radiación: una estructura estable de tres cinturones, la cual persistió durante aproximadamente un mes antes de ser destruida por una tormenta geomagnética tal como se muestra en la Figura 2.3 (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013). Este fenómeno se originó a partir de una disminución parcial del flujo de electrones en la región más externa del cinturón exterior, dejando una estructura remanente en el intervalo $2.8 < L < 3.5$. Posteriormente, se produjo una recuperación de flujos en $L > 4$, lo que generó una separación clara entre ambos cinturones y dio lugar a la formación de una segunda región de ranura dentro del cinturón exterior.

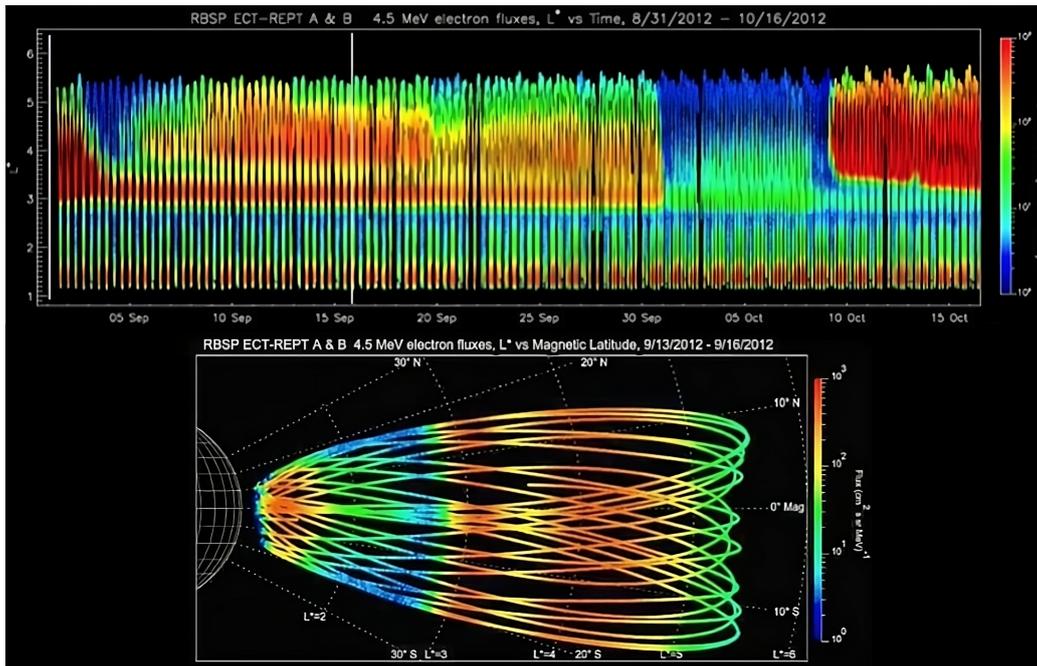


Figura 2.2: Dinámica del cinturón de radiación exterior observada por las sondas Van Allen en septiembre de 2012. Arriba: Flujos de electrones de 4.5. El eje vertical indica el valor de L, mientras que el eje horizontal muestra el tiempo transcurrido entre el 5 de septiembre y el 15 de octubre, con intervalos de cinco días. La línea blanca marca el instante específico representado en la figura inferior. Abajo: Distribución de los mismos flujos según la latitud magnética, permitiendo observar su evolución desde una perspectiva alternativa. (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013).

La Figura 2.2 ilustra este evento excepcional, reportado como la primera observación de un cinturón ultrarelativista remanente (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013; NASA, 2013). La mayoría de los estudios sobre la variabilidad del cinturón de radiación exterior se enfocan en la respuesta de los electrones relativistas a las perturbaciones inducidas por tormentas geomagnéticas (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Henderson et al., 2013; X. Li et al., 2017; Moya et al., 2017; Zhao et al., 2019). Un aspecto fundamental en la evolución de estos flujos es la interacción con el viento solar, el cual actúa como el principal modulador externo de la magnetosfera. No obstante, los efectos del viento solar dependen de una serie de procesos internos que gobiernan la dinámica del cinturón de radiación exterior, tales como el transporte radial, la aceleración local y la precipitación de partículas hacia la atmósfera (Reeves et al., 2013; Ripoll et al., 2020). A continuación, se describen los principales mecanismos responsables del aumento y la pérdida de partículas en el cinturón exterior, resaltando que la contribución de cada proceso puede variar considerablemente de un evento a otro. En general, estos procesos no ocurren de manera aislada, sino que suelen actuar simultáneamente o en rápida sucesión, dando lugar a la compleja evolución observada en

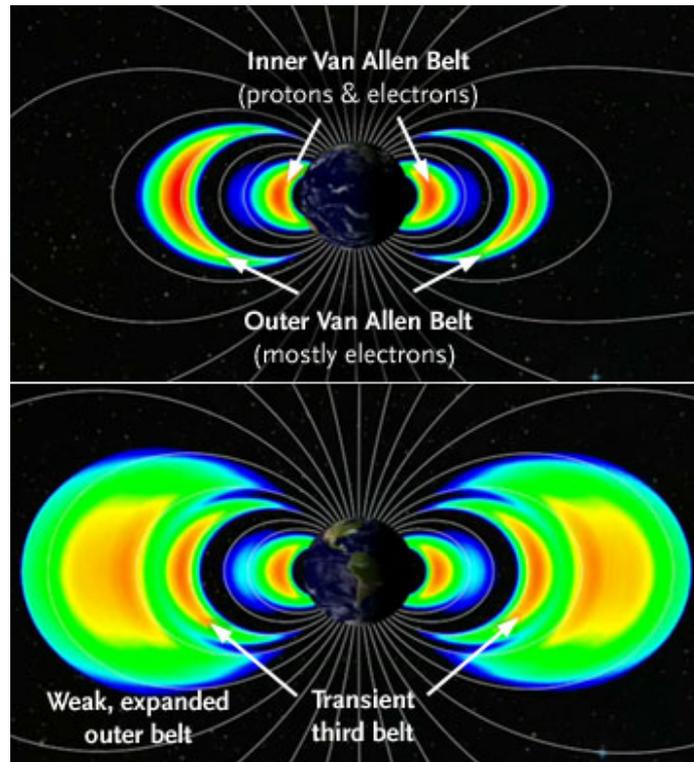


Figura 2.3: Diagramas que proporcionan una vista transversal de la estructura del cinturón de radiación de la Tierra, Arriba: Un diagrama esquemático que muestra la Tierra, los cinturones de radiación exterior e interior. Abajo: Similar a arriba, pero muestra propiedades del triple cinturón de radiación durante el período de septiembre de 2012 (Beatty, 2013).

los cinturones de radiación (Mann et al., 2016). En 2016, Ni et al. investigaron el posicionamiento radial de los electrones del cinturón de radiación en función del índice Dst y los parámetros de control del viento solar, utilizando datos de electrones de 2 a 6 MeV del Explorador de Partículas Solares, Anómalas y Magnetosféricas (SAMPEX). Encontraron que, aunque la variación y el posicionamiento radial de los electrones del cinturón de radiación están claramente asociados con el índice Dst, su penetración profunda en la región de la ranura ($2 < L < 3$) no está directamente correlacionada con el índice Dst (Ni et al., 2016).

2.2. Eventos de aumento, pérdida y no cambio del flujo de Electrones Relativistas

Las tormentas geomagnéticas han sido ampliamente estudiadas en relación con el aumento de electrones relativistas, ya que proporcionan la inyección de energía necesaria para desencadenar procesos en la magnetosfera interior. No obstante, (Reeves et al., 2003) determinaron que solo

aproximadamente el 50 % de las tormentas geomagnéticas generan un incremento en los flujos de electrones en la órbita geoestacionaria. Esto se debe a que, durante estos eventos, los procesos de pérdida pueden intensificarse al mismo tiempo que los mecanismos de aceleración (Pinto et al., 2020). Además, aunque las tormentas geomagnéticas suelen definirse por una caída significativa en el índice Dst (Gonzalez et al., 1994), varios estudios han demostrado que no son un requisito indispensable para la ocurrencia de eventos de aumento (Anderson et al., 2015; H.-J. Kim et al., 2015; Pinto et al., 2018; Schiller et al., 2014; Su et al., 2014)

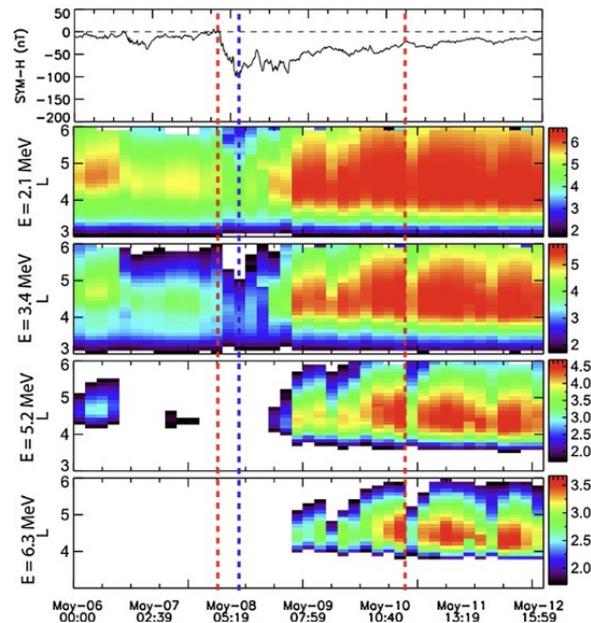


Figura 2.4: Evento de aumento de electrones relativistas del 8 de mayo de 2016 observado por el instrumento REPT para diferentes energías. Las líneas rojas cruzadas representan el inicio y fin de la tormenta, mientras que la línea azul cruzada indica el punto en el que el índice Dst alcanzó su valor más negativo (Adaptada de Moya et al., 2017).

En la Figura 2.4 , se observa un evento de aumento ocurrido el 8 de mayo de 2016, utilizando los flujos de electrones obtenidos por el instrumento REPT. En este caso, el evento se produjo tras una tormenta geomagnética, como se ilustra en la figura. Las líneas rojas cruzadas indican el inicio y el final de la tormenta, mientras que la línea azul cruzada marca el punto de la tormenta en el que el índice Dst alcanzó su valor más negativo. Existen mecanismos de transferencia de energía que, aunque no sean lo suficientemente eficientes como para generar una intensificación de la corriente de anillo (y, por ende, del índice Dst), aún pueden proporcionar la energía necesaria para el incremento en los flujos de electrones (Borovsky y Denton, 2010).

Baker et al. en el 2019 estudiaron eventos de aumento medidos por la sonda Van Allen y el satélite geoestacionario GOES 15 con datos con energías ≥ 0.8 y 2 MeV, desde el 2012 hasta el 2018 (D. N. Baker, Hoxie et al., 2019). Esto con el fin de encontrar resultados acordes a lo que se había

investigado hasta ahora y mirar que tan correlacionados estaban los datos. Encontraron que los valores de flujo medidos por los sensores GOES 15 coincidían muy bien con los sensores de Van Allen Probes cuando las naves espaciales estaban físicamente cerca una de otra, sin embargo a niveles de actividad más bajos, los flujos de electrones $E > 2$ MeV para las sondas Van Allen fueron más típicamente descorrelacionados en $L < 4$.

Este resultado se vuelve a encontrar en el 2020, Pinto et al. analizaron solamente los eventos de aumento que ocurrieron entre el 2012 y 2017 (Pinto et al., 2020). Para $L < 4$, los flujos estaban poco correlacionados con la órbita geoestacionaria, pero también tendían a ser menos variables, de los 60 eventos identificados con GOES 15 para energías de >2 MeV en GEO, encontraron que, a medida que L disminuye es mucho más difícil que existan aumentos en los flujos relativistas por debajo de $L = 3,0$. También encontraron que la tormenta del 17 de marzo de 2015 (Mínimo $Dst = -223$ nT) provocó un aumento para todo $L \geq 2,5$, consistente con el resultado esperado de que solo una actividad geomagnética extremadamente fuerte puede afectar la parte más interna del cinturón de radiación exterior. En todos los casos donde los eventos de aumento mostraron comportamientos diferentes para $L < 4$, se presentan conclusiones variadas que generan preguntas abiertas.

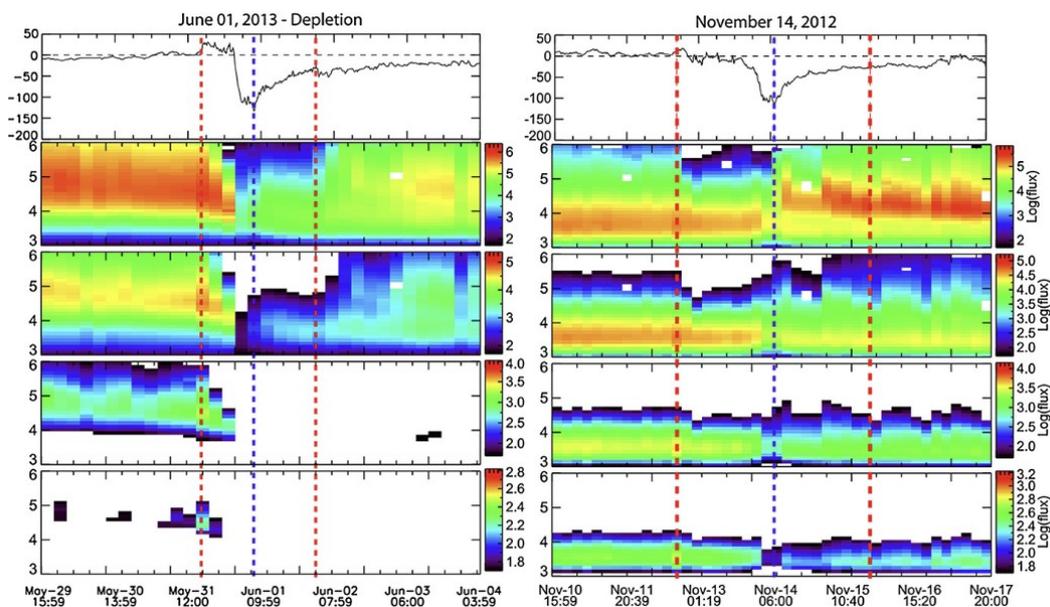


Figura 2.5: Comparación de eventos de flujo de electrones en los cinturones de radiación para dos tormentas geomagnéticas. A la izquierda, el evento del 1 de junio de 2013 muestra una clara disminución del flujo de electrones (evento de pérdida). A la derecha, el evento del 14 de noviembre de 2012 no presenta una disminución significativa (evento sin cambio). Las líneas verticales rojas y azules indican los tiempos de inicio y recuperación de la tormenta, respectivamente. (Adaptada de Moya et al., 2017).

Los electrones en los cinturones de radiación pueden perderse debido a una variedad de procesos. Estas pérdidas pueden ser tanto verdaderas como aparentes, debido a efectos adiabáticos (H.-J. Kim y Chan, 1997). El transporte de partículas puede funcionar como una fuente y un mecanismo de pérdida de partículas. Además, la aceleración de partículas se puede entender tanto como una fuente como una pérdida para electrones de diferentes energías, bajo la premisa de que el número de partículas se mantiene constante localmente (Ripoll et al., 2020). Las pérdidas de electrones de los cinturones de radiación ocurren principalmente debido a la precipitación en la atmósfera o al escape de partículas a través del límite de la magnetopausa (Millan y Thorne, 2007).

En el contexto de estos dos procesos fundamentales, existen numerosos subprocesos que contribuyen a la pérdida total de partículas en los cinturones. No obstante, este estudio no se centrará en las interacciones onda-partícula que provocan dispersión en la atmósfera, ya que existen numerosos trabajos que abordan el tema de las pérdidas y el transporte de electrones en los cinturones de radiación (por ejemplo, Lara, 2024; W. Li et al., 2020; Y. Y. Shprits et al., 2012). Sin embargo, es importante destacar que en algunos eventos no se observa una pérdida significativa de electrones, sino más bien una falta de cambio en los niveles de flujo. Esto puede indicar que, a pesar de las perturbaciones geomagnéticas, el comportamiento de los electrones relativistas en los cinturones de radiación permanece relativamente estable (Moya et al., 2017).

Un ejemplo de esto se observa en la Figura 2.5, donde los datos de noviembre de 2012 muestran un comportamiento de "no cambio" en comparación con los eventos de pérdida registrados en otros períodos (Moya et al., 2017). En la imagen, se observa claramente una diferencia en el comportamiento de los electrones en función de la fase de la tormenta geomagnética, lo que resalta la complejidad de estos fenómenos.

Para el año 2017, Moya et al. estudiaron la probabilidad de aumento, pérdida y ningún cambio en los valores de flujo de electrones, utilizando solo las sondas Van Allen y concluyeron que esto depende en gran medida de L y la energía (Moya et al., 2017). Encontraron que los eventos de aumento estudiados eran más comunes para electrones de ~ 2 MeV en $L \sim 5$, y el número de eventos de aumento de los flujos disminuye al aumentar la energía, a cualquier L determinada. Por lo tanto, considerando el porcentaje de ocurrencia de cada tipo de evento, los aumentos son más probables a energías más altas, y la probabilidad de aumento tiende a crecer al aumentar L , es decir que a L más bajas ($L < 4$) no habían muchos aumentos. Este estudio al igual que muchos más, se centró desde el punto de vista de las tormentas geomagnéticas para estudiar el cambio de los flujos de electrones del cinturón de radiación terrestre (Bingham et al., 2018; Pinto et al., 2018; Turner et al., 2015, 2019).

2.3. Mecanismos de Aceleración y Pérdida

Los paradigmas actuales para la aceleración y el transporte de partículas en el cinturón de radiación exterior ($L \sim 3-6$) incluyen los efectos de numerosos procesos, como el transporte convectivo;

las inyecciones de partículas, ya sea por choques asociados con perturbaciones interplanetarias en viaje o por campos eléctricos y magnéticos inductivos generados durante subtormentas magnetosféricas; la aceleración in situ por interacciones onda-partícula; el transporte radial por interacciones con fluctuaciones de campo de baja frecuencia; y las interacciones con estructuras electrostáticas.

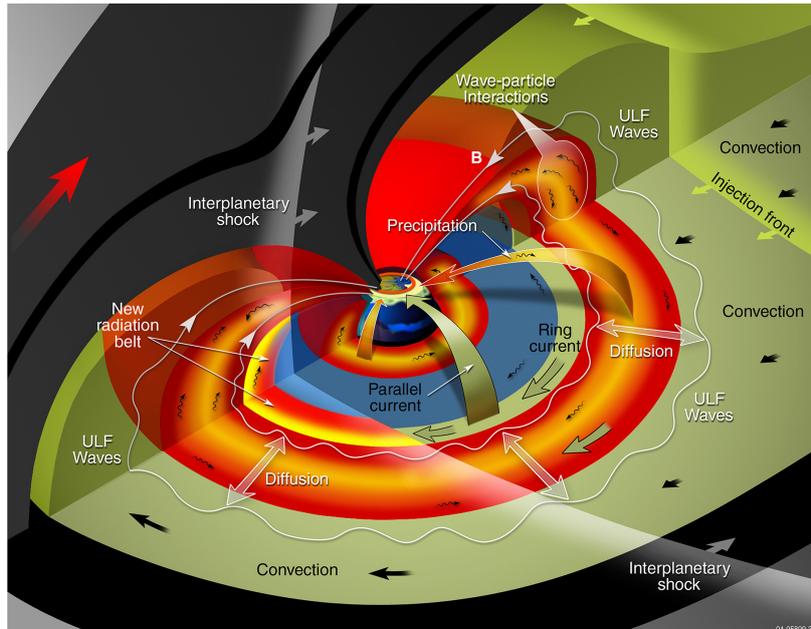


Figura 2.6: Esquema de la magnetosfera tridimensional que muestra las regiones de convección y difusión, la ubicación de los cinturones de Van Allen y la llegada de un choque interplanetario con un nuevo cinturón de radiación producido por un rápido transporte radial hacia el interior, junto con ondas de frecuencia ultrabaja intensificadas (Mauk et al., 2013).

Necesitamos determinar cuantitativamente cuáles de estos procesos son dominantes en los cinturones de radiación (p. ej., Reeves et al., 2013; Turner et al., 2014), tanto estadísticamente como para condiciones externas específicas, como tormentas impulsadas por eyecciones de masa coronal o regiones de interacción corrotatorias, y a escalas espaciales tanto locales como globales (Ripoll et al., 2020). A modo ilustrativo, la Figura 2.6 muestra un esquema integral de la dinámica de partículas en la magnetosfera interna. En ella se evidencian los principales procesos físicos involucrados: las inyecciones de partículas desde la cola magnetosférica, la aceleración por ondas electromagnéticas (chorus, EMIC, hiss), la difusión radial inducida por ondas ULF, la convección del plasma, y la pérdida de partículas tanto por precipitación atmosférica como por escape hacia el espacio interplanetario a través del límite magnetopáusico (Koskinen y Kilpua, 2022).

También se destaca la formación de nuevos cinturones de radiación asociados a shocks interplanetarios, en esta sección solo se mencionaran algunos de estos mecanismos con el fin de informar,

ya que este trabajo se centra en el estudio de datos in situ satelitales y a pesar de que son relevantes para el desarrollo de modelos y teorías, los datos no llegan con información de los procesos que interactúan en la aceleración y pérdida del cinturón de radiación exterior sino que nos proporciona su comportamiento con respecto a la energía y distancia radial.

2.3.1. Aceleración y Transporte de Partículas

El término aceleración hace referencia al proceso mediante el cual una partícula aumenta su energía. En los cinturones de radiación, este fenómeno puede ocurrir tanto de forma local, a través de interacciones con ondas de plasma, como a través de transporte radial, donde las partículas se desplazan hacia regiones de mayor intensidad de campo magnético, ganando energía en el proceso. La fase densidad de fase (PSD) es una herramienta clave en estos estudios, ya que permite analizar la cantidad de partículas por unidad de volumen en el espacio de fase (posición y momento), y su evolución indica si hay aceleración o pérdida.

Una de las principales fuentes de aceleración local en el cinturón externo (entre $L \sim 3$ y $L \sim 7$) son las ondas tipo chorus, que son ondas electromagnéticas generadas en la magnetosfera externa durante periodos de actividad geomagnética. Estas ondas interactúan resonantemente con los electrones a través del fenómeno conocido como resonancia ciclotrónica, transfiriendo energía desde las ondas hacia las partículas (Horne y Thorne, 1998; Summers et al., 2007). Sin embargo, para que este mecanismo funcione, se requiere la presencia de una población de semilla de electrones con energías de cientos de keV, que a su vez provienen de una población fuente de menor energía (del orden de decenas de keV), inyectada durante subtormentas geomagnéticas (Jaynes et al., 2015).

Además de la aceleración local, el transporte radial es otro mecanismo fundamental. Este proceso implica el desplazamiento de partículas a través de líneas de campo magnético debido a interacciones con fluctuaciones de baja frecuencia en los campos eléctrico y magnético, conocidas como ondas ULF (frecuencias Pc3 a Pc5, es decir, del orden de milihertz). Si el movimiento radial es difusivo, y se conservan los invariantes adiabáticos de la partícula, el transporte puede resultar en un incremento de energía a medida que las partículas se acercan a la Tierra (Hudson et al., 2008; Mann et al., 2013). Para modelar este fenómeno se utilizan los llamados coeficientes de difusión radial, pero aún existe debate sobre cuál formulación es la más adecuada, especialmente durante eventos activos. (Ali et al., 2016; Brautigam y Albert, 2000). Estudios recientes han mostrado que ciertos modelos podrían subestimar la difusión cuando se omiten correlaciones entre las fluctuaciones de campo eléctrico y magnético (Lejosne, 2019).

2.3.2. Pérdida de Partículas

Los mecanismos de pérdida representan los procesos por los cuales las partículas escapan del sistema de cinturones de radiación. Existen dos vías principales: pérdida al límite magnetopáusico y precipitación atmosférica.

La pérdida hacia la magnetopausa ocurre cuando esta frontera, que delimita la magnetosfera de la región interplanetaria, se comprime bruscamente debido al aumento de la presión dinámica del viento solar. En estos casos, las órbitas de deriva de los electrones pueden extenderse más allá de la magnetopausa, permitiendo que las partículas escapen al espacio (Y. Y. Shprits et al., 2006; Turner y Ukhorskiy, 2020). Este fenómeno, conocido como sombreado de magnetopausa, es especialmente relevante durante tormentas geomagnéticas intensas.

Por otra parte, la precipitación atmosférica es un proceso donde las partículas son desviadas hacia ángulos de paso que las llevan a colisionar con la atmósfera, perdiendo energía y siendo removidas del sistema. Esta dispersión angular se debe principalmente a interacciones resonantes con diferentes tipos de ondas:

Ondas hiss: presentes dentro de la plasmasfera ($L \lesssim 4$), estas ondas de modo whistler son responsables de la formación de la región "slot" entre los cinturones interno y externo, ya que dispersan partículas continuamente durante condiciones geomagnéticas tranquilas (Meredith et al., 2017; Ripoll et al., 2017)

Ondas chorus: ubicadas fuera de la plasmasfera, también contribuyen a la pérdida de partículas por precipitación, además de su rol en la aceleración. Las chorus pueden provocar eventos intensos de precipitación conocidos como microexplosiones ("microrráfagas"), observados como ráfagas breves de electrones que ingresan a la atmósfera en escalas de milisegundos (Mourenas et al., 2012; Wang y Shprits, 2019).

Ondas EMIC: estas ondas de frecuencia ion ciclótrónica pueden interactuar con electrones de alta energía (hasta varios MeV), causando su pérdida a través de dispersión hacia el cono de pérdida. Aunque son localizadas y de corta duración, pueden tener efectos significativos durante tormentas (Hendry et al., 2019; Usanova et al., 2014). Ondas magnetosónicas y ciclotrónicas (ECH) : tienen un efecto más limitado, pero también pueden contribuir a la pérdida en ciertas condiciones, especialmente en rangos de energía y ángulo de pitch específicos (Albert et al., 2009).

Otro mecanismo relevante, aunque más efectivo en regiones de baja L ($L \sim 1.5$), es la colisión Coulombica. Este proceso ocurre cuando los electrones interactúan con moléculas del aire superior en la atmósfera, perdiendo energía por colisiones elásticas e inelásticas. Aunque históricamente poco considerado, estudios recientes han demostrado que estas interacciones pueden incluso inducir transporte radial debido a la asimetría del campo magnético terrestre, como la que se presenta en la Anomalía del Atlántico Sur (Cunningham et al., 2018).

2.4. Importancia y Limitaciones de los Datos in Situ

Para comprender mejor el origen de los cinturones de Van Allen, en 2012 la agencia espacial estadounidense (NASA) lanzó la misión de las naves espaciales gemelas Van Allen Probes, las cuales tenían el propósito de atravesar esos anillos gigantes de plasma y realizar mediciones detalladas. Permanecieron operativas hasta el año 2019, recopilando datos de alta calidad que constituyen, hasta la fecha, las mediciones in situ más completas realizadas en el entorno de radiación espacial cercano a la Tierra (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013). Debido a que las naves Van Allen Probes ya no se encuentran operativas, muchos trabajos han optado por usar otros instrumentos y modelos matemáticos con el fin de tener mayor conocimiento sobre el comportamiento de los electrones del anillo de radiación. Una alternativa, son los satélites en órbita geostacionaria, los cuales tienen la característica de que orbitan la Tierra a una altitud aproximada de $L \sim 6.6$ (se dicen que son geostacionarios porque el satélite se mueve alrededor de la Tierra a la misma velocidad angular que la rotación de la Tierra sobre su eje, lo que resulta en que el satélite parezca permanecer fijo sobre un punto en la superficie terrestre)(Anderson et al., 2015; D. N. Baker, Hoxie et al., 2019; Ni et al., 2016; Pinto et al., 2020).

A pesar de los avances significativos en la observación y modelación de los cinturones de radiación, sigue siendo un reto identificar con precisión cuáles son los mecanismos dominantes de aceleración, transporte y pérdida de partículas bajo distintas condiciones geomagnéticas (Glocer et al., 2009). Esta dificultad se debe, en gran medida, a las limitaciones inherentes a los datos satelitales. Aunque misiones como Van Allen Probes, GOES, THEMIS, Arase y otras han proporcionado observaciones sin precedentes del entorno espacial terrestre, estas mediciones siguen siendo puntuales en el espacio y el tiempo. Por lo tanto, no es posible, únicamente con los datos in situ, determinar de manera concluyente la naturaleza completa de los procesos que ocurren de forma simultánea en diferentes regiones de la magnetosfera (Engebretson et al., 2015; Schiller et al., 2017).

2.5. Datos satelitales para los Modelados Numéricos

Para complementar estas observaciones, se han desarrollado modelos numéricos que permiten extrapolar la información limitada y reconstruir la dinámica global de los cinturones. Uno de estos, es el Versatile Electron Radiation Belt (VERB), desarrollado por el grupo de investigación Space Environment Modeling Group de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA). Este modelo ha sido descrito en trabajos de D. A. Subbotin y Shprits, 2009 y Y. Y. Shprits et al., 2015, y se basa en la resolución de la ecuación de Fokker-Planck para la densidad del espacio de fase (PSD) de electrones, considerando mecanismos de difusión en energía, pitch angle y radial (Ripoll et al., 2019). Este enfoque permite simular la evolución temporal y espacial de los electrones relativistas bajo diversas condiciones del entorno espacial, y ha sido validado mediante múltiples comparacio-

nes con datos satelitales (Y. Y. Shprits et al., 2015; Sillanpää et al., 2017; D. A. Subbotin y Shprits, 2009; D. A. Subbotin et al., 2011).

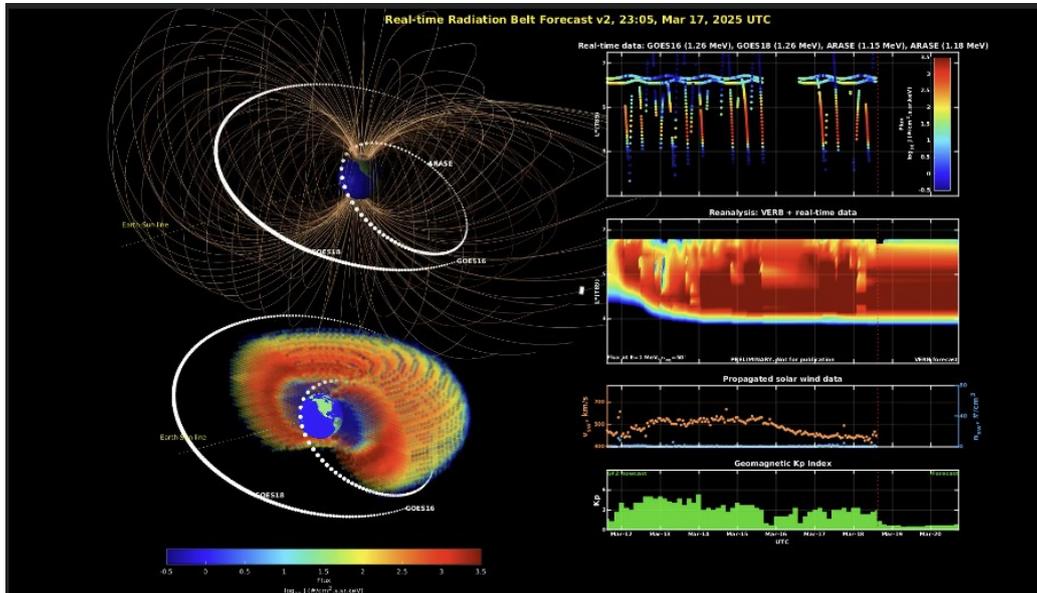


Figura 2.7: Pronóstico en tiempo real del cinturón de radiación externo utilizando el modelo VERB, desarrollado por el Space Environment Modeling Group (UCLA). A la izquierda, representaciones tridimensionales del cinturón de radiación externo muestran la intensidad del flujo de electrones relativistas ($\sim 1\text{--}2$ MeV) mediante una escala de colores: azul indica flujos bajos y rojo flujos altos. Las trayectorias de los satélites GOES-16, GOES-18 y Arase se indican con líneas punteadas blancas. A la derecha, los paneles muestran: (1) flujos medidos por los satélites, (2) reanálisis del modelo VERB con datos en tiempo real, (3) evolución del viento solar propagado y (4) variación del índice geomagnético Kp.(Y. Shprits et al., 2025).

La Figura 2.7 muestra una representación visual de la salida del modelo VERB utilizando datos en tiempo real de los satélites GOES16, GOES18 y Arase. La imagen combina múltiples niveles de información: en la parte inferior izquierda, se visualiza la distribución tridimensional del flujo de electrones energéticos alrededor de la Tierra; en la parte superior derecha se muestran los datos observados por los satélites; al centro, la reconstrucción del modelo VERB que incorpora estos datos para simular la evolución del cinturón externo; y en la parte inferior derecha, las condiciones del viento solar y el índice geomagnético Kp, que son utilizados como condiciones de entrada del modelo (D. Subbotin et al., 2010). Esta visualización ilustra de manera clara cómo los datos in situ, aunque limitados, son esenciales para alimentar y validar simulaciones que permiten estudiar la evolución global de los cinturones de radiación en condiciones reales. No obstante, incluso los modelos más avanzados presentan limitaciones. En la Figura 2.8, donde se observa un corte del modelo VERB en función del tiempo y el número cuántico adiabático μ , se evidencian zonas donde los datos modelados son inconsistentes o están ausentes (Meredith et al., 2012).

Estas regiones pueden estar asociadas a la falta de datos de entrada, a errores en la propagación del modelo, o a procesos físicos no bien representados en las parametrizaciones actuales. Este tipo de vacíos en la simulación resalta la necesidad de mejorar la calidad y cobertura de las observaciones satelitales, así como de perfeccionar los modelos numéricos para que puedan capturar con mayor precisión la complejidad del entorno magnetosférico.

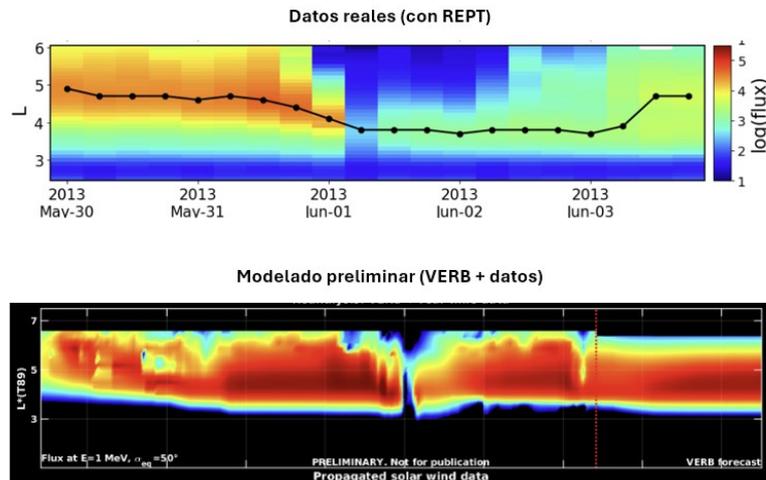


Figura 2.8: Comparación entre datos reales de REPT y modelado VERB. La parte superior muestra los flujos de electrones de 1 MeV medidos por el instrumento REPT a bordo de las Van Allen Probes durante un evento de tormenta geomagnética entre el 30 de mayo y el 3 de junio de 2013. En la parte inferior se presenta la salida del modelo VERB, que integra datos observacionales con simulaciones numéricas en tiempo real para 17 de marzo del 2015 (Adaptada de Y. Shprits et al., 2025).

Las evaluaciones cuantitativas realizadas con métricas dedicadas nos permiten entender las condiciones de entrada y los valores de salida esperados para los cuales un modelo tiene capacidades de rendimiento altas o bajas. Se han utilizado diferentes métricas estadísticas a través del campo de la física del cinturón de radiación y se han aplicado a los flujos de electrones de los cinturones de radiación (unidireccionales u omnidireccionales) (Ripoll et al., 2020). Estas métricas pueden basarse en el error de pronóstico (diferencia entre el modelo y la referencia), en un error de pronóstico relativo (diferencia normalizada entre el modelo y la referencia) o en un índice de precisión (ratio del modelo con la referencia). La media o mediana de estas cantidades se calcula en una escala lineal o logarítmica (base 10) (Morley et al., 2018; Pinto et al., 2018).

Entre las principales métricas de flujo del cinturón de radiación, destacamos el error porcentual absoluto medio (p. ej., K.-C. Kim et al., 2012; Ripoll et al., 2017; Tu et al., 2013) y el porcentaje de precisión simétrica mediana y la razón de precisión mediana (p. ej., Glauert et al., 2018; Ripoll et al., 2019, en esta colección). Desde su implementación, los satélites GOES han desempeñado un papel fundamental en la monitorización del entorno espacial cercano a la Tierra, particularmente

en la órbita geoestacionaria (GEO). Estos satélites, operados por NOAA, han proporcionado datos invaluable sobre los flujos de electrones en el cinturón de radiación externo durante más de dos décadas. El instrumento Energetic Particle Sensor (EPS) a bordo de los GOES 8 al 15 incluye canales integrales para electrones con energías superiores a 0.6, 2.0 y 4.0 MeV, siendo el canal >2 MeV el más utilizado por su rol operativo en alertas de carga interna en satélites (Boudouridis et al., 2020; Rodríguez et al., 2025). Sin embargo, los canales >0.6 y >4 MeV han sido históricamente subutilizados debido a problemas de calibración y a la sensibilidad del canal de 4 MeV a protones de alta energía (Panametrics, 1995).

En este contexto, el trabajo de Rodríguez et al., 2025 representa un avance significativo al realizar la primera calibración cruzada de los canales >0.6 MeV (E1) y >4 MeV (E3) del GOES con los datos de alta resolución del instrumento MPS-HI a bordo de GOES-17. Utilizando análisis tipo bowtie, modelos directos y técnicas de inversión espectral, los autores concluyen que las caracterizaciones de los satélites GOES 13–15 son más precisas que las de sus predecesores (GOES 8–12), y que, con ajustes adecuados, los datos de los canales E1 y E3 pueden ser empleados con confianza en estudios cuantitativos. Este hallazgo no solo permite reinterpretar con mayor fidelidad las observaciones pasadas, sino que también amplía el rango energético de análisis del cinturón de radiación utilizando series temporales extensas (Meredith et al., 2015; Rodríguez et al., 2025).

Capítulo 3: Obetivos, instrumentación, datos y metodología

En este marco, la presente tesis se propone aportar al entendimiento del comportamiento del cinturón de radiación externo durante eventos de aumento en el flujo de electrones relativistas, tomando como base los datos proporcionados por los satélites GOES-15 y Van Allen Probes (REPT). En particular, se busca caracterizar la evolución espacial de estos eventos observados en la órbita geoestacionaria (GEO), mediante el análisis de la razón entre los flujos post-tormenta y pre-tormenta, en función de la energía y de la posición radial L.

Este enfoque tiene como objetivo evaluar la utilidad del canal de 4 MeV del satélite GOES-15 como herramienta para describir estadísticamente la respuesta del cinturón de radiación externo durante eventos de aumento, comparando sus mediciones con las de los distintos canales de energía del instrumento REPT. A partir de este propósito general, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿En qué medida los datos obtenidos por satélites en órbita GEO permiten anticipar la evolución del anillo de radiación externo durante eventos de aumento?*

Para abordar esta pregunta, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la evolución temporal de los flujos de electrones relativistas con energías de 2 MeV y 4 MeV observados en GEO durante eventos de aumento.
- Caracterizar la respuesta del satélite GOES-15 frente a los datos de las sondas Van Allen (REPT) para energías de 2 y 4 MeV, con el fin de evaluar la consistencia y representatividad de las mediciones en la órbita GEO.
- Comparar la respuesta del satélite GOES-15 en sus canales de 2 MeV y 4 MeV con las mediciones de REPT a lo largo de distintos canales energéticos y regiones radiales, evaluando el grado de correlación energética y espacial entre ambos instrumentos.

A continuación, se ofrece una descripción detallada de la misión Van Allen Probes junto con la instrumentación utilizada para la recopilación de datos fundamentales en el estudio de la variabilidad del flujo de electrones relativistas durante tormentas geomagnéticas. Asimismo, se expone la metodología aplicada en el tratamiento de los datos, con el objetivo de obtener correlaciones y examinar los resultados en el contexto de la dinámica de los cinturones de radiación.

3.1. Instrumentación

Para estudiar la dinámica de los electrones relativistas en el cinturón de radiación exterior, utilizamos datos recopilados por el Telescopio Relativista Electrón-Protón (Relativistic Electron-Proton Telescope, REPT (D. N. Baker, Kaneal, Hoxie, Batiste et al., 2013) y el Espectrómetro de Iones

Magnéticos (Magnetic Electron Ion Spectrometer, MagEIS (Blake et al., 2013) a bordo de las Son-
das Van Allen (Mauk et al., 2013), operativas entre 2012 y 2019, Estos instrumentos formaron
parte del conjunto de partículas energéticas, composición y plasma térmico (Energetic particle,
Composition, and Thermal plasma, ECT (Lara, 2024; Spence et al., 2013).

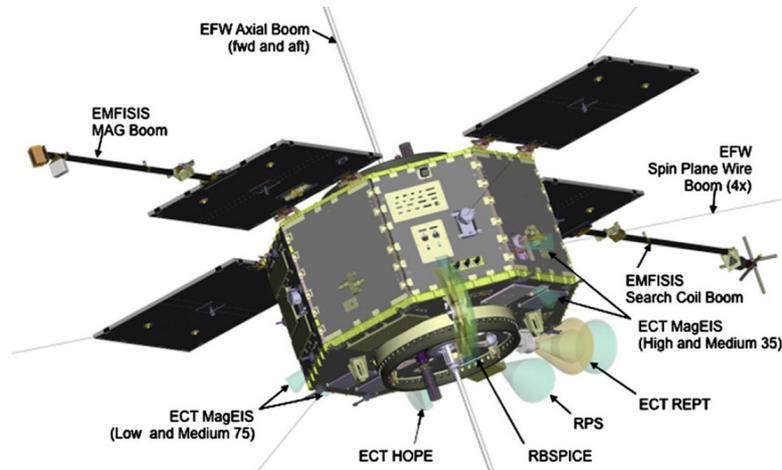


Figura 3.1: Instrumentos de los satélites de la misión Van Allen Probes. (Extraído de Lara, 2024).

La misión contó con dos satélites idénticos, RBSP-A y RBSP-B, diseñados para medir electrones,
protones, iones, campos magnéticos y ondas en los cinturones de radiación. En la Figura 3.1, se
muestra el satélite RBSP con sus instrumentos. Ambos satélites seguían una órbita elíptica de
transferencia geostacionaria, con una inclinación de 10° respecto a la eclíptica (ver Figura 3.2).
Su período orbital era de aproximadamente 9 horas, con un perigeo de $1.1 R_E$ y un apogeo de $5.8 R_E$
(Lara, 2024). Gracias a su configuración, la misión permitió medir simultáneamente diferentes
regiones del cinturón de radiación, posibilitando estudios tanto locales como globales sobre su
evolución espacial y temporal.

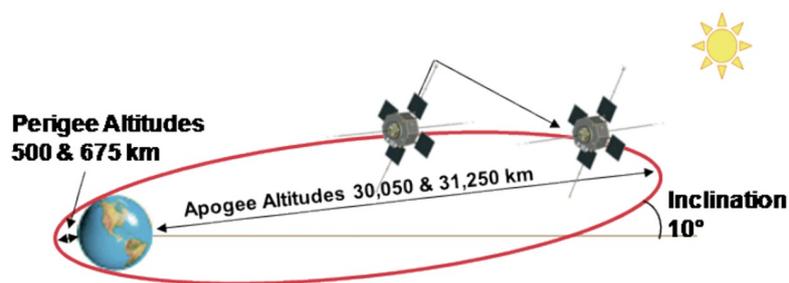


Figura 3.2: Trayectoria de la misión Van Allen Probes (extraída de Lara, 2024).

3.1.1. MagEIS

El instrumento MagEIS tal como se muestra en la Figura 3.3 fue diseñado para medir los flujos de electrones, protones y diferentes especies de iones en el cinturón de radiación (Blake et al., 2013). En este estudio, nos enfocamos en la medición de electrones relativistas, cuyos flujos son expresados en unidades de $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ (Lara, 2024; Moya et al., 2017; Pinto et al., 2020).



Figura 3.3: Instrumento ECT-MagEIS (Blake et al., 2013).

MagEIS estaba compuesto por cuatro espectrómetros magnéticos a bordo de cada satélite de la misión Van Allen Probes, diseñados para cubrir distintos rangos de energía: un espectrómetro para energías bajas (20 keV - 240 keV), dos para energías medias (80 keV - 1200 keV) y uno para energías altas (800 keV - 4800 keV) (Blake et al., 2013). Los espectrómetros de baja energía, uno de media energía y el de alta energía estaban orientados a 75° con respecto al eje de giro del satélite, mientras que el segundo espectrómetro de energía media se encontraba a 35° respecto al mismo eje (Lara, 2024).

Los electrones ingresaban a través de un colimador con un campo de visión de $10^\circ \times 20^\circ$. La apertura de entrada era de $2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ en las cámaras de baja y media energía, y de $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ en la de alta energía. Una vez dentro, los electrones eran detectados en cámaras con un campo magnético uniforme, el cual los desviaba en un giro de 180° , con un radio de curvatura dependiente de su velocidad de entrada. Esto permitía su impacto en detectores específicos para cuantificar su energía (Lara, 2024). El campo magnético en las cámaras variaba según el rango de energía: 550 G para baja energía, 1600 G para media y 4800 G para alta energía. Además, la eficiencia de detección de MagEIS, representada por su factor geométrico, dependía de la energía, variando entre $0,04 \text{ cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{keV}$ y $8,26 \text{ cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{keV}$ (Blake et al., 2013).

3.1.2. REPT

El instrumento REPT que se muestra en la Figura 3.4, fue diseñado para medir los flujos de electrones en el rango de 1.6 MeV a más de 19 MeV, y de protones desde 17 MeV hasta más de 100 MeV en los cinturones de radiación (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013). En este estudio, nos enfocamos en los flujos de electrones, medidos en unidades de $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{MeV}^{-1}$.



Figura 3.4: Instrumento ECT-REPT. (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013).

El diseño de REPT consistía en una pila de detectores de estado sólido, compuesta por dos detectores de silicio frontales de 20 mm de diámetro y siete posteriores de 40 mm (Spence et al., 2013). Para la medición de electrones y protones energéticos en las regiones interna y externa de los cinturones, se estableció un factor geométrico de $0.2 \text{ cm}^2\cdot\text{sr}$, definido por un campo de visión cónico de 32° . Estos detectores generaban una corriente eléctrica proporcional a la energía de la partícula incidente. Además, REPT contaba con un colimador de berilio para filtrar partículas de menor energía y una carcasa protectora para minimizar la radiación penetrante y la radiación de frenado (Bremsstrahlung). La resolución energética era de $\Delta E/E = 0.25$, distribuida en 11 canales de energía. El instrumento estaba orientado perpendicularmente al eje de giro de la nave, lo que permitía la medición de electrones en casi todas las direcciones del campo magnético (D. N. Baker, Kanekal, Hoxie, Batiste et al., 2013; Lara, 2024).

En este estudio, utilizamos datos de flujo de electrones en 8 canales de energía, desde 1.8 MeV hasta 7.6 MeV, correspondientes a electrones ultra-relativistas. La resolución temporal de las mediciones es de aproximadamente 11 segundos. Además, para cada instante de tiempo y cada canal de energía, se analizaron datos distribuidos en distintos ángulos de pitch, abarcando un rango de 5° a 175° (Lara, 2024; Pinto et al., 2020).

3.1.3. OMNI

El conjunto de datos OMNI (actualmente OMNI-2) contiene una resolución horaria, de 1 minuto y de 5 minutos del campo magnético del viento solar y de las propiedades del plasma obtenidas de muchas naves espaciales en órbita geocéntrica, en órbita alrededor del punto de Lagrange L1 225RE frente a la Tierra, entre otros. Desde la creación de los conjuntos de datos de minutos en 1995, los principales contribuyentes al conjunto de datos OMNI han sido las naves espaciales ACE, Wind e IMP 8. En los últimos años, se han añadido datos de Geotail y GOES. El conjunto de datos también contiene índices de actividad geomagnética (AE, Dst, etc.) y números de manchas solares.

El procesamiento de los datos incluye el cambio de tiempo a la nariz de choque de proa de la Tierra. El desplazamiento del tiempo se basa en la suposición de que los valores del campo magnético del viento solar observados por una nave espacial en un momento y lugar determinados se encuentran en una superficie plana que convecciona con el viento solar, y que los mismos valores se verán en un lugar diferente en el momento en que el frente de fase barre sobre ese lugar. comúnmente conocida como "propagación balística". Los detalles específicos sobre el procesamiento de datos y la disponibilidad se pueden encontrar en el sitio web de OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) Para esta tesis, utilizaremos principalmente los datos OMNI resueltos en 1 minuto, excepto cuando ciertas cantidades no estén disponibles, por ejemplo, el índice Dst y Kp solo están disponibles en resolución horaria.

3.1.4. GOES y Órbita Geoestacionaria (GEO)

El Satélite Ambiental Operacional Geoestacionario (GOES) es el principal monitor ambiental de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para el estudio de la Tierra y el espacio. Desde 1974, estos satélites han operado en órbita geoestacionaria (GEO), a aproximadamente $R \approx 6R_E$ de altitud (D. N. Baker, Zhao et al., 2019; Pinto et al., 2020).

La órbita geoestacionaria es una órbita circular situada a aproximadamente 35,786 km sobre el ecuador terrestre. En esta órbita, un satélite tiene un período orbital igual al período de rotación de la Tierra (~24 horas), lo que significa que permanece fijo con respecto a un punto en la superficie terrestre. Los electrones relativistas en GEO representan un riesgo significativo para satélites de comunicación y navegación, ya que pueden inducir cargas electrostáticas en los componentes electrónicos y provocar fallas en los sistemas (Pinto et al., 2018). Generalmente, dos satélites GOES operan simultáneamente: GOES-Este, ubicado a 75° de longitud oeste sobre el ecuador, y GOES-Oeste, situado a 135° de longitud oeste. A partir del GOES-8, estos satélites han estado equipados con el Monitor del Entorno Espacial (SEM), el cual incluye un magnetómetro de flujo de tres ejes, un detector de partículas energéticas y un detector de rayos X blandos. Las generaciones más recientes, desde el GOES-13 en adelante, incorporan además un detector de partículas de energía media.

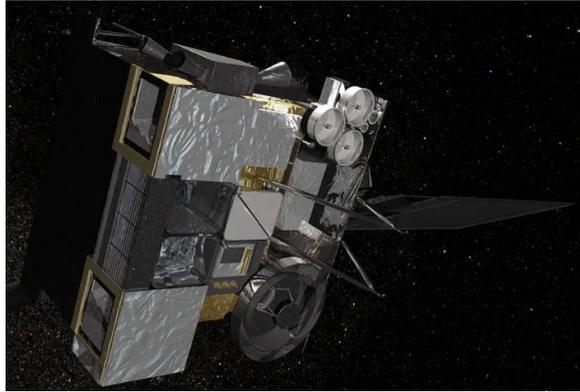


Figura 3.5: Instrumento GOES15. (Bowman, 2014).

En esta tesis, utilizamos datos de flujos de electrones con energías superiores a 2 MeV, obtenidos del instrumento Energetic Proton, Electron and Alpha Detector (EPEAD) a bordo del GOES-15 (2012-2017) como se muestra en la Figura 3.5, con una resolución temporal de 5 minutos (Bowman, 2014). Además del EPEAD, el GOES-15 cuenta con una cámara multispectral de cinco canales para imágenes en luz visible e infrarrojo, un sondeador atmosférico para mediciones de temperatura y humedad, una cámara de rayos X solares para la detección de fulguraciones, y diversos instrumentos para monitorear la magnetosfera, la radiación de fondo cósmica y partículas cargadas (Rodríguez et al., 2014).

3.2. Órbitas de GOES 15 y Van Allen

La Figura 3.6 muestra una comparación entre las órbitas del satélite geostacionario GOES-15 y la sonda Van Allen Probe-A. A la izquierda se observa una vista esquemática de las trayectorias orbitales en el plano ecuatorial. La órbita de GOES-15, representada en azul, es circular y se encuentra sobre el ecuador terrestre, a una distancia fija de aproximadamente $L = 6,6R_E$, correspondiente a una órbita geostacionaria. En cambio, las sondas Van Allen, representadas en rojo, siguen órbitas altamente elípticas e inclinadas alrededor de 10° respecto al plano ecuatorial, cubriendo un rango de distancias radiales que va desde $L \sim 1.1$ hasta $L \sim 5.8$. A lo largo del tiempo, la línea de ápsides de estas órbitas precesa, lo que permite que las sondas muestreen una gran variedad de regiones en torno a la Tierra. Al tener en cuenta la inclinación orbital, los valores de L muestreados pueden incluso extenderse regularmente más allá de $L \sim 7$ (D. N. Baker, Zhao et al., 2019).

La imagen de la derecha en la Figura 3.6 representa cómo se distribuyen las posiciones reales de observación en coordenadas de tiempo local magnético (MLT) frente a L , durante el periodo comprendido entre el 1 de septiembre de 2012 y el 1 de septiembre de 2018. El MLT, o *Magnetic*

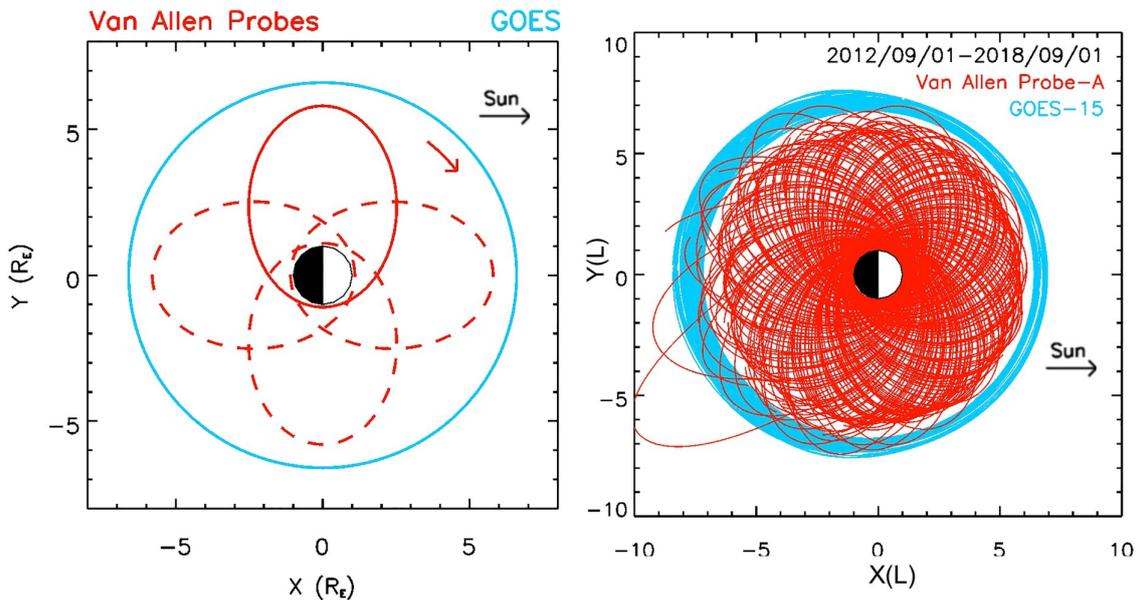


Figura 3.6: Órbitas de GOES-15 (azul) y Van Allen Probe-A (rojo). A la izquierda, se muestra la vista esquemática en el plano ecuatorial. A la derecha, la distribución real de posiciones en L y tiempo local magnético (MLT) entre 2012 y 2018. GOES se mantiene en $L=6.6$, mientras que las sondas Van Allen cubren un rango más amplio en L y MLT (Imagen adaptada de D. N. Baker, Zhao et al., 2019).

Local Time, es una medida análoga al tiempo solar pero referida al campo magnético terrestre. Por ejemplo, $MLT = 12$ corresponde al mediodía magnético (el lado del planeta que mira hacia el Sol), mientras que $MLT = 0$ representa la medianoche magnética (el lado opuesto al Sol). En esta representación, se observa que las sondas Van Allen (en rojo) cubren una gran extensión tanto en L como en MLT, proporcionando una cobertura global de la magnetosfera. En cambio, GOES-15 (en azul) se mantiene estable en $L = 6.6$, pero su posición en MLT varía de forma diaria debido a la rotación de la Tierra y a la forma asimétrica de la magnetosfera. Durante el día, la compresión de la magnetosfera por el viento solar permite que el satélite registre información útil incluso de regiones con valores de L menores, mientras que por la noche la magnetosfera se expande. Esta deformación diurna hace que, a pesar de estar fijo en una órbita geoestacionaria, GOES pueda captar variaciones que ocurren en otras regiones del cinturón de radiación.

3.3. Procesamiento de datos

A continuación, se detalla el procesamiento de los datos obtenidos del instrumento REPT, utilizando la lista de fechas identificadas a partir de los datos de GOES en el estudio de Pinto et al., 2020,

donde se detectaron 60 eventos de aumento en el cinturón de radiación utilizando GOES 15.

3.3.1. Selección de eventos de Aumento

Para identificar eventos de aumento en los flujos de electrones relativistas en órbita geoestacionaria (REE). Se basa en los criterios definidos en estudios previos (Pinto et al., 2020), que establecen condiciones específicas para considerar que ha ocurrido un evento de aumento: El flujo de electrones relativistas (> 2 MeV) debe aumentar desde menos de $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ hasta más de $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ en menos de 2 días. Además, el flujo promedio diario debe mantenerse por encima de $10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ durante al menos 3 días.

Este criterio se ha establecido para distinguir los aumentos reales de flujo de los efectos puramente adiabáticos, que son transitorios y reversibles cuando el índice Dst se recupera, según lo descrito por H.-J. Kim y Chan, 1997. La necesidad de un aumento de al menos un orden de magnitud en los flujos y la exigencia de un período prolongado de flujos elevados buscan garantizar que se detecten únicamente eventos genuinos de aumento en los electrones relativistas, descartando efectos temporales inducidos por cambios en la estructura de la magnetosfera.

Para identificar estos eventos, se emplean datos obtenidos del instrumento Energetic Proton, Electron and Alpha Detector (EPEAD) a bordo del satélite GOES 15, según lo reportado por Rodriguez et al., 2014. Estos datos consisten en mediciones del flujo de electrones relativistas con una resolución temporal de 5 minutos, permitiendo un análisis detallado de las variaciones en los flujos de partículas de alta energía en GEO, con esta clasificación se analizaron eventos con GOES 15 desde el 1 de septiembre de 2012 hasta el 31 de diciembre de 2017, aplicando los criterios previamente definidos lo que permitió identificar un total de 60 eventos de aumentos en los flujos de electrones.

3.3.2. Cálculo de flujos omnidireccionales

En particular, la medida del flujo de electrones puede variar significativamente según el ángulo de paso, definido como el ángulo entre la velocidad del electrón y la dirección del campo magnético local. Dado que los electrones atrapados en los cinturones de radiación siguen trayectorias en espiral alrededor de las líneas del campo magnético terrestre, sus flujos medidos dependen de la geometría de la observación (Lyons et al., 1972; Y. Y. Shprits et al., 2006).

Para obtener valores representativos e independientes de la orientación del detector, se calcula el flujo omnidireccional, el cual promedia los flujos en todos los ángulos de paso, asegurando una representación más global de la distribución de electrones en la magnetosfera. Se define como:

$$J_{\text{omni}} = \frac{1}{2} \int_0^\pi J(\alpha) \sin \alpha, d\alpha \quad (3.1)$$

donde $J(\alpha)$ representa el flujo de electrones medido en un ángulo de paso dado. Este procedimiento es especialmente importante cuando se comparan mediciones de diferentes satélites, ya que garantiza que los valores obtenidos reflejen la distribución total de electrones en la magnetosfera y no solo la fracción que se encuentra en una dirección específica (Millan y Thorne, 2007).

3.3.3. Definición del tiempo $t=0$

Para cada evento, se determinó un tiempo $t = 0$ como el último tiempo antes de que se detecte la tendencia general de aumento de flujos, es decir para cada evento, el tiempo $t= 0$ se define como el último instante antes de que comience una tendencia clara de aumento en los flujos de electrones relativistas. En términos prácticos, esto significa que el período $-1 < t < 0$ días (es decir, en el último día antes de $t=0$) corresponde al momento en el que se detecta el flujo promedio diario más bajo del evento. Una vez pasado $t=0$, los flujos comienzan a aumentar de forma continua en los siguientes 2 a 3 días, hasta alcanzar el umbral de flujo definido como un evento de aumento.

Este criterio de selección de $t=0$ es distinto al enfoque tradicionalmente utilizado en estudios previos, donde el inicio del evento se define en función del mínimo del índice geomagnético Dst o SYM-H, el cual refleja la intensidad de una tormenta geomagnética. La razón detrás de este planteamiento se fundamenta en estudios previos que han demostrado que no es estrictamente necesario que ocurra una tormenta geomagnética intensa para que se observe un evento REE. En particular, se ha establecido que una tormenta geomagnética definida por un Dst mínimo menor a -50 nT (Pinto et al., 2020) no es un requisito obligatorio para la aparición de eventos de mejora de electrones relativistas en GEO. Investigaciones recientes han confirmado que estos eventos pueden presentarse incluso en ausencia de tormentas geomagnéticas significativas (Anderson et al., 2015; H.-J. Kim et al., 2015; Pinto et al., 2018; Schiller et al., 2014). Esto sugiere que, si bien las tormentas geomagnéticas pueden desempeñar un papel en la dinámica de los electrones relativistas en el cinturón de radiación externo, otros mecanismos físicos también pueden ser responsables del transporte y aceleración de estas partículas, incluso en condiciones geomagnéticamente más tranquilas.

3.3.4. Binning en L y el tiempo

Los datos se agruparon en intervalos de $\Delta L=0.1$, lo que significa que todas las mediciones fueron clasificadas dentro de bins discretos de tamaño 0.1 en la coordenada L-shell, que representa una medida de distancia en el cinturón de radiación respecto a la Tierra. Para mejorar la calidad y confiabilidad de los datos, se combinaron las mediciones de las dos sondas gemelas Van Allen Probes (RBSP-A y RBSP-B). La combinación de estos datos ofrece varias ventajas, una de ellas es que hay mayor cobertura espacial y temporal. Una vez combinados los datos de ambas sondas, se implementó una nueva clasificación en dos dimensiones, considerando tanto la evolución temporal como la ubicación espacial de los flujos de electrones.

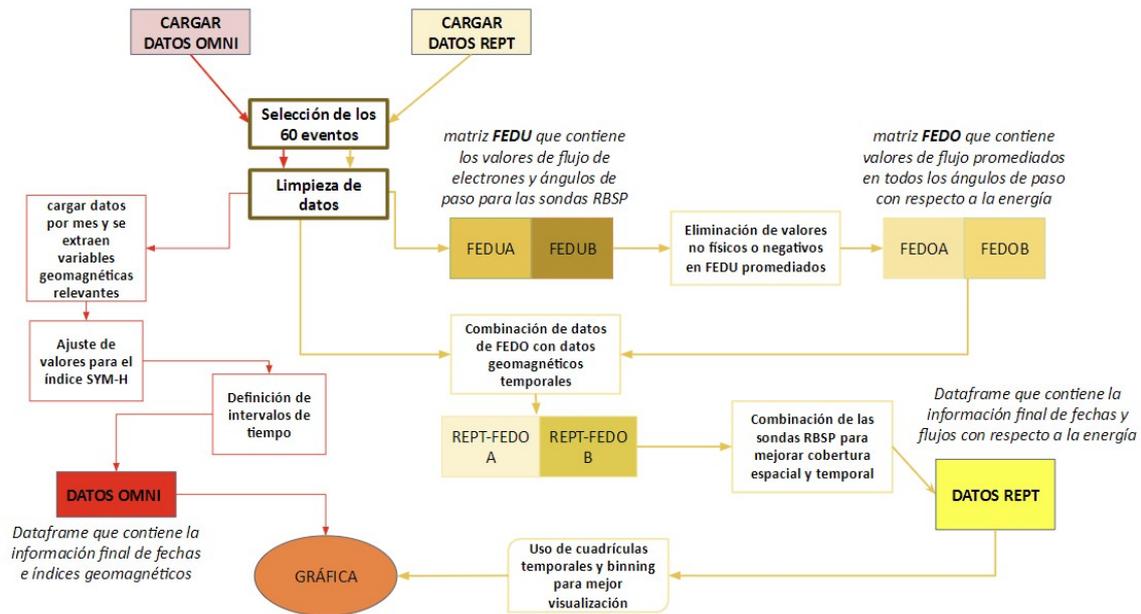


Figura 3.7: Diagrama del proceso de carga, limpieza y combinación de datos OMNI y REPT para el análisis de flujos de electrones y condiciones geomagnéticas.

Para la agrupación temporal, se aplicó un binning en tiempo con intervalos de $\Delta t=6$ horas. Es decir, los valores de flujo se promediaron dentro de bloques de 6 horas, lo que ayuda a reducir la dispersión de datos individuales, suavizando variaciones transitorias que pueden no ser relevantes para el análisis general. Mientras que para la agrupación espacial, se mantuvo el binning en L con $\Delta L=0.1$, lo que significa que todas las mediciones dentro de cada intervalo de L se agruparon y promediaron para proporcionar una representación más clara del comportamiento de los electrones en función de la distancia radial dentro del cinturón de radiación.

Este procedimiento garantiza una cobertura continua sobre todo $2,5 < L < 6,0$ pero reduce la resolución temporal a cuatro puntos por día. Para determinar las mejoras en el cinturón exterior durante cada evento, seguimos la definición más tradicional de evaluar si los flujos máximos en el intervalo de tiempo $12 < t < 96$ h ($t = 0$ se define por los eventos GOES) son al menos el doble de los flujos máximos durante el intervalo $-72 < t < -12$ h para cada capa L entre $2,5 < L < 6,0$ (Moya et al., 2017; Reeves et al., 2003; Turner et al., 2015).

Para evitar resultados espurios debido a oscilaciones en flujos bajos, también requerimos que el flujo máximo después de $t = 0$ para una capa L particular sea mayor que los valores del percentil 25% calculados a partir de toda la misión Van Allen Probes. En el procesamiento de los datos OMNI, primero se cargan los archivos mensuales y se extraen las variables geomagnéticas más relevantes. Luego, se ajustan los valores del índice SYM-H y se establecen los intervalos de tiempo

para organizar la información. Este procedimiento, junto con el tratamiento de los datos REPT, se ilustra en la Figura 3.7

3.4. Metodología

El objetivo principal de este estudio es analizar los flujos de electrones relativistas en el cinturón de radiación terrestre durante un periodo que abarca desde el 1 de septiembre de 2012 hasta el 31 de diciembre de 2017. A través de este análisis, se busca comprender la dinámica de los flujos de electrones en respuesta a eventos de tormentas geomagnéticas, utilizando datos provenientes de los satélites GOES y REPT.

1. **Selección de eventos:** Se identificaron un total de 60 eventos de aumento en los flujos de electrones, utilizando los datos proporcionados por el satélite GOES. Estos eventos fueron seleccionados siguiendo criterios previamente definidos, centrados en las variaciones significativas en los flujos de partículas relativistas en el cinturón de radiación externo. En el Anexo A se encuentra la lista correspondiente a estas fechas.
2. **Análisis de la razón post/pre de flujo :** La razón post/pre de flujo es un indicador utilizado para analizar los cambios en los flujos de partículas antes y después de un evento, como una tormenta geomagnética. Matemáticamente, se define como:

$$r = \frac{f_{post}}{f_{pre}} \quad (3.2)$$

Donde, f_{post} es el flujo máximo de partículas (electrones en este caso) observado en un período definido después del evento y f_{pre} es el flujo máximo de partículas observado en un período definido antes del evento (Pinto et al., 2020). Esta razón nos ayuda a clasificar por eventos, el tipo de datos que se tiene, es decir:

- Si $r > 2$: Se considera un aumento en los flujos, indicando que el flujo de partículas post-evento es significativamente mayor que el flujo pre-evento.
 - Si $r < 0.5$: Se considera una disminución en los flujos, indicando que los flujos han disminuido notablemente después del evento.
 - Si $0.5 \leq r \leq 2$: Se interpreta como sin cambio significativo, ya que los flujos pre y post evento son similares.
3. **Cálculo de la ocurrencia de los eventos:** Otra forma de analizar estadísticamente el comportamiento de los cinturones de radiación, es calcular el porcentaje de ocurrencia de cada tipo de evento. Esto proporciona información sobre la probabilidad de ocurrencia de un evento de tormenta que mejore, disminuya o no produzca respuesta de los flujos de electrones MeV del cinturón exterior (Moya et al., 2017). Para un conjunto de eventos:

$$ocurrencia(\%) = \frac{\#de\ eventos\ de\ un\ tipo\ específico}{\#de\ eventos\ total\ realizados} \times 100\% \quad (3.3)$$

El análisis de ocurrencias permite identificar patrones y tendencias en el comportamiento de los flujos de partículas. Por ejemplo, puede mostrar en qué regiones del cinturón de radiación (según L) o en qué rangos de energía los eventos de aumento son más comunes, o si ciertas regiones son más propensas a disminuciones o permanecen estables (Pinto et al., 2020). Esto ayuda a comprender cómo las condiciones geomagnéticas y los procesos internos afectan a los electrones relativistas en el cinturón

4. **Análisis de correlación entre GOES-15 y REPT para los canales de 2 MeV y 4 MeV:** Se examinó la relación entre los flujos de electrones detectados por GOES-15 en los canales de 2 MeV y 4 MeV y los datos multienergía de REPT, en función de la posición radial L. Este análisis permitió identificar niveles de coherencia en la respuesta de ambos instrumentos ante eventos REE, y evaluar la consistencia espacial y energética de las observaciones en distintas regiones del cinturón externo.
5. **Evaluación integral de la correlación GOES-15 vs. REPT en múltiples canales de energía:** Se extendió el análisis de correlación a todos los canales energéticos de REPT, comparándolos con los flujos del canal de 4 MeV de GOES-15. Este enfoque permitió caracterizar con mayor resolución la relación entre ambos satélites a lo largo del cinturón de radiación, identificando cómo varía la respuesta conjunta según la energía y la ubicación radial, con implicancias para la validación del canal de GOES como indicador confiable en estudios estadísticos del entorno espacial.
6. **Conclusión del análisis:** Este análisis tiene como objetivo proporcionar una comprensión más profunda de la respuesta de los cinturones de radiación a los eventos de aumento de flujos de electrones relativistas (REE), identificando cómo varía su ocurrencia e intensidad en función de la energía y la ubicación radial L. Asimismo, se busca evaluar la coherencia entre los datos proporcionados por los satélites GOES-15 y Van Allen Probes, con especial atención al desempeño del canal de 4 MeV de GOES-15 como herramienta complementaria para el estudio estadístico y predictivo de estos eventos.

Capítulo 4: Evolución radial de electrones ultrarrelativistas durante eventos de aumento para Energías de 2 MeV y 4 MeV.

En la Sección 3.2, se menciona que los eventos REE en la órbita geoestacionaria (GEO) se definen como períodos prolongados durante los cuales los flujos de electrones se recuperan de una caída abrupta y superan un umbral mínimo. Por ejemplo, NOAA emite advertencias cuando el flujo en GEO excede los $10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. En este estudio seguimos la definición utilizada por Pinto et al., 2020, que considera un evento de aumento como un incremento en el flujo de electrones desde menos de $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ hasta más de $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ en menos de dos días, y que mantiene un flujo promedio diario superior a $10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ durante al menos tres días.

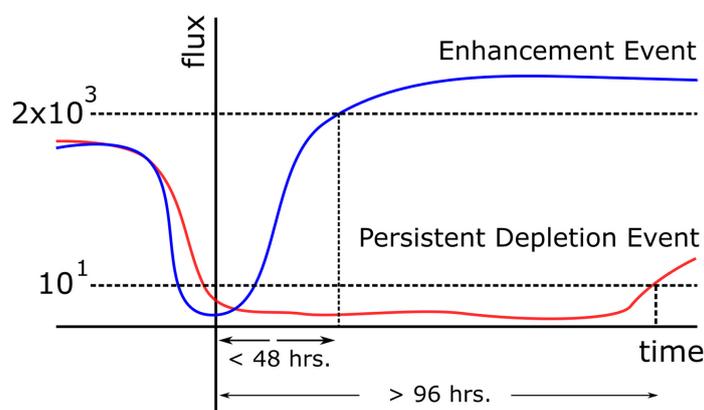


Figura 4.1: Esquema de la evolución del flujo para un evento relativista idealizado de aumento de electrones (Azul) y un evento relativista de agotamiento persistente de electrones (Rojo). El parámetro $t = 0$ corresponde al momento en que se aprecia por primera vez la mejora (REE) o cuando se completa la pérdida. Las líneas discontinuas verticales representan el tiempo en que se debe alcanzar el valor umbral para REE y la duración mínima permitida para las pérdidas persistentes (Pinto et al., 2018).

La Figura 4.1 muestra un esquema de la evolución del flujo electrónico para los aumentos (azul) y pérdidas (rojo). Para cada evento se definió un tiempo $t = 0$ como el último instante antes de que se detecte una tendencia general de aumento en los flujos, dado que el intervalo $-1 < t < 0$ días representa el mínimo del flujo promedio diario en el periodo de estudio, y el flujo promedio diario para $t > 0$ aumenta continuamente durante los siguientes 2 a 3 días hasta alcanzar el umbral definido para un evento REE.

4.1. Comparación de los Canales de Energía de 2 MeV y 4 MeV del Satélite GOES-15

La Figura 4.2 presenta una comparación temporal de los flujos de electrones detectados en los canales de 2 MeV y 4 MeV durante dos eventos seleccionados. Se observa que, en ciertos casos, ambos canales responden de forma simultánea al evento geomagnético (Evento 2012/10/09), reflejando un aumento conjunto en los flujos (panel b y c). Sin embargo, también es evidente que en algunos periodos los incrementos de flujo no coinciden (Evento 2016/08/25), mostrando diferencias tanto en la magnitud como en la sincronización temporal de los picos observados en cada canal (panel h y i). Esta falta de alineación sugiere que los electrones de mayor energía pueden presentar una dinámica diferenciada frente a los procesos de aceleración y pérdida, posiblemente debido a su sensibilidad distinta a las condiciones del viento solar o a las características locales del campo magnético.

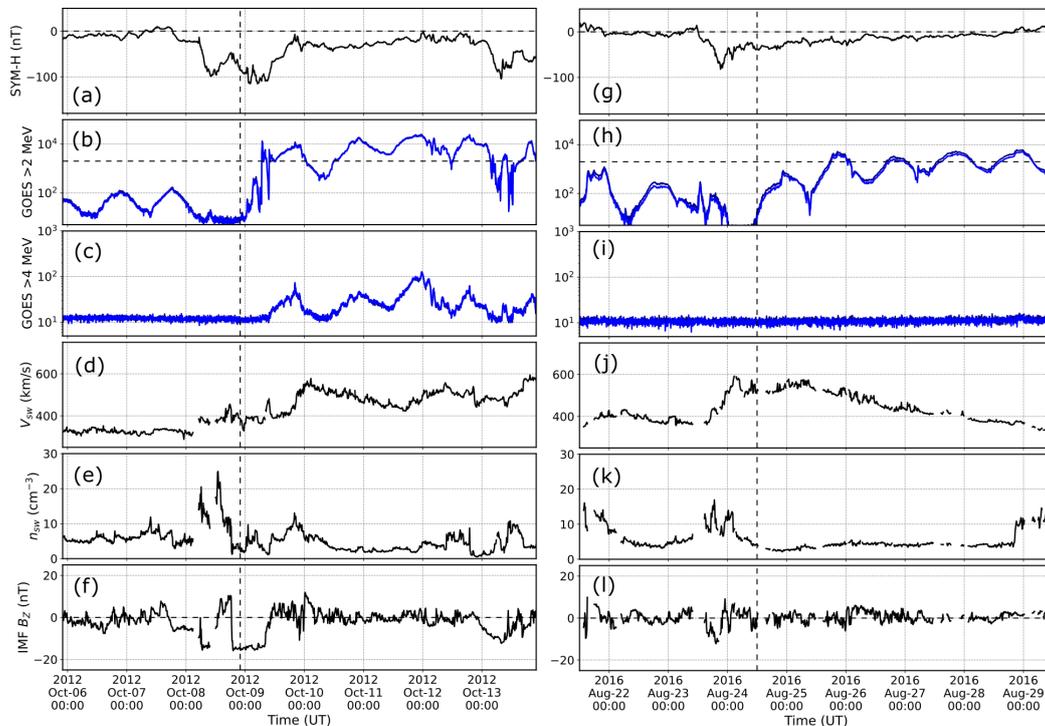


Figura 4.2: Comparación de dos eventos de aumento en el flujo de electrones observados por el satélite GOES-15 en los canales >2 MeV y >4 MeV. Los paneles (a) y (g) muestran el índice geomagnético SYM-H. Los paneles (b) y (h) corresponden al flujo de electrones >2 MeV, mientras que los paneles (c) y (i) muestran el flujo >4 MeV. Los paneles (d) y (j) presentan la velocidad del viento solar (V_{sw}), (e) y (k) la densidad del viento solar (n_{sw}), y (f) y (l) la intensidad del campo magnético interplanetario (IMF). La línea punteada vertical indica el inicio de la tormenta geomagnética en cada evento.

Estas discrepancias subrayan la necesidad de un análisis detallado del canal de 4 MeV. Aunque el canal de 2 MeV ha sido ampliamente utilizado en estudios previos como referencia para identificar eventos de aumento de electrones (por ejemplo, Reeves et al., 2003; Turner et al., 2015), el canal de 4 MeV permite estudiar el comportamiento de electrones más energéticos, cuya evolución podría estar gobernada por mecanismos adicionales o más selectivos de aceleración, como por ejemplo, la interacción con ondas de tipo chorus o ULF (Ultralow Frequency) (Lara, 2024; Wang y Shprits, 2019). Estudios recientes han comenzado a evaluar más sistemáticamente el canal de 4 MeV. Por ejemplo, el trabajo de Rodríguez et al., 2025 analizó la calibración y precisión de las mediciones del canal de >4 MeV en los satélites GOES 13–15, encontrando mejoras significativas en comparación con generaciones anteriores de satélites GOES, lo cual fortalece su uso como fuente confiable para caracterizaciones del entorno espacial. A pesar de que la Figura 4.2 ilustra claramente que los canales de 2 MeV y 4 MeV no siempre muestran una respuesta coincidente, a continuación se realiza un estudio más completo del canal de 4 MeV. La Figura 4.3 presenta una evaluación estadística de la relación entre los flujos máximos pre y post tormenta registrados por GOES-15 en los canales de 2 MeV (izquierda) y 4 MeV (centro), así como la correlación directa entre los flujos post tormenta de ambos canales (derecha).

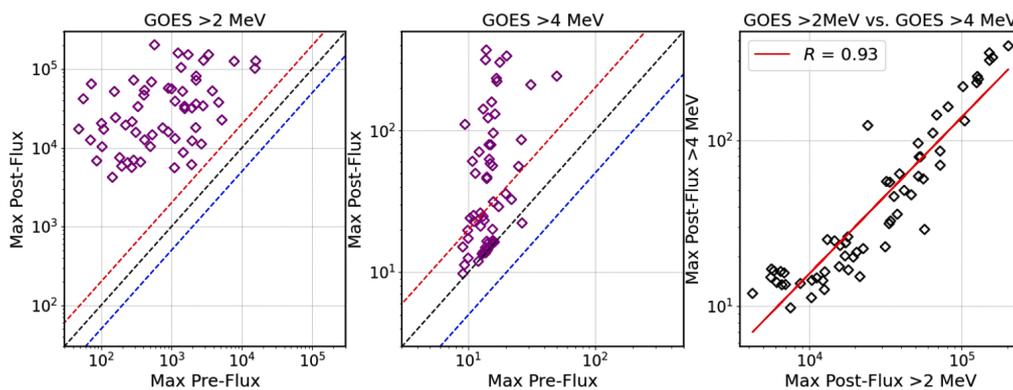


Figura 4.3: Relación entre los flujos máximos pre y post evento observados por GOES-15 en los canales >2 MeV (izquierda) y >4 MeV (centro). Las líneas punteadas representan los factores 2 (rojo), 1 (negro) y 0.5 (azul). El panel derecho muestra la correlación entre los flujos post evento de ambos canales.

En los dos primeros paneles se evidencia que, en la mayoría de los eventos analizados, el flujo post tormenta supera al flujo pre tormenta, lo cual indica una recuperación y posterior aumento de los electrones relativistas, característica típica de eventos REE. Sin embargo, esta tendencia es mucho más pronunciada para el canal de 2 MeV, donde los aumentos abarcan varios órdenes de magnitud, mientras que en el canal de 4 MeV los incrementos son más contenidos.

Esta diferencia puede atribuirse a que los electrones de mayor energía (4 MeV) requieren condiciones más específicas para su aceleración eficiente, como la interacción con ondas de tipo chorus o

ULF, y son más susceptibles a mecanismos de pérdida, como la precipitación atmosférica o la interacción con el campo magnético terrestre, lo que limita su aumento durante eventos de tormenta geomagnética (W. Li y Hudson, 2019). En el tercer panel se muestra una correlación directa entre los flujos post tormenta de ambos canales, revelando una fuerte relación lineal con un coeficiente de correlación de $R = 0.93$. Este alto valor indica que, aunque los electrones de 4 MeV presentan comportamientos particulares en ciertos eventos (como se discutió en la figura anterior), existe en general una correspondencia significativa entre los flujos de ambos canales. Este resultado es especialmente relevante, ya que respalda la consistencia del canal de 4 MeV como indicador de la dinámica de los electrones relativistas y refuerza su utilidad como complemento al canal de 2 MeV en estudios estadísticos de largo plazo.

4.2. Eventos de Aumento Observados con el Instrumento REPT

Se utilizaron los datos de REPT como base comparativa para evaluar la efectividad del satélite GOES-15 en la detección y caracterización de eventos de aumento de electrones. La Figura 4.4 presenta dos eventos de aumento observados por REPT en los canales de 2.1 MeV y 4.2 MeV, (paneles b, d, g y i) junto con los datos correspondientes del canal de 2 MeV y 4 MeV del satélite GOES-15 para comparación (paneles a, c, f y h) y el índice geomagnético SYM-H para caracterizar el estado del entorno magnético durante los eventos (paneles e y j). Los paneles de REPT permiten visualizar la evolución espacial del flujo en función de L, mostrando que los eventos afectan principalmente a las regiones comprendidas entre $L = 4$ y $L = 6$, aunque con diferencias en la intensidad y el rango afectado según el evento y la energía.

Una diferencia notable entre ambos eventos es el comportamiento del índice SYM-H: en el evento de la izquierda (paneles a–e) se registra una caída abrupta del SYM-H, característica de una tormenta geomagnética intensa, mientras que en el evento de la derecha (paneles f–j) el entorno magnético se mantiene relativamente estable. Esto evidencia que no todos los eventos de aumento de electrones ocurren como respuesta directa a tormentas geomagnéticas. De hecho, los flujos elevados pueden sostenerse durante varios días o incluso semanas, aun en ausencia de perturbaciones geomagnéticas severas.

La Figura 4.5 muestra la distribución espacial (en función de L) del porcentaje de ocurrencia de las 60 fechas obtenidas con GOES 15 pero estudiadas con el instrumento REPT es por esto que para estas fechas se hace una clasificación de eventos como aumento (Enhancement), pérdida (Depletion) y sin cambio (No Change), para las energías de 2.1 MeV y 4.2 MeV. Esta clasificación se basa en la relación entre los flujos máximos post-evento y pre-evento, utilizando como umbrales: $r > 2$ para aumento, $r < 0.5$ para pérdida, y $0.5 \leq r \leq 2$ para sin cambio. En el panel izquierdo se observa que la ocurrencia de eventos de aumento crece notablemente con L, alcanzando valores cercanos al 100% en $L > 5.5$ para 2.1 MeV y alrededor del 85% para 4.2 MeV. Esto indica que las regiones más externas del cinturón de radiación son las más propensas a experimentar au-

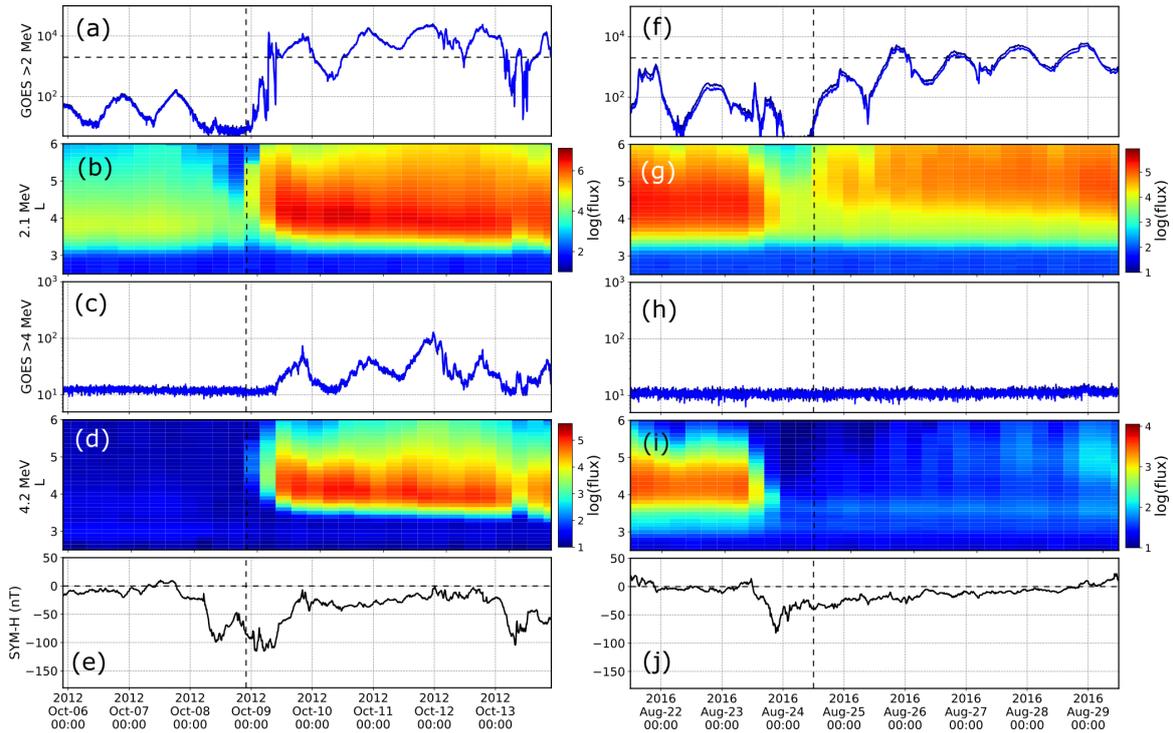


Figura 4.4: Comparación de dos eventos de aumento observados por los satélites GOES-15 y Van Allen Probes (REPT) en los canales de 2.1 MeV y 4.2 MeV. A la izquierda se muestra el evento de octubre de 2012, y a la derecha, el de agosto de 2016. En cada conjunto, los paneles (a), (c), (f) y (h) corresponden a los flujos de electrones medidos por GOES-15 para >2 MeV y >4 MeV. Los paneles (b), (d), (g) e (i) muestran los datos del instrumento REPT, representando la evolución temporal y espacial (en L) del flujo de electrones para las mismas energías. Finalmente, los paneles (e) y (j) muestran la evolución del índice geomagnético SYM-H. La línea punteada indica el inicio de la tormenta geomagnética en cada evento.

mentos sostenidos en los flujos relativistas, en concordancia con el hecho de que allí los procesos de aceleración, como la interacción con ondas chorus, son más eficientes (Ripoll et al., 2019). La menor ocurrencia relativa para 4.2 MeV también sugiere que los electrones más energéticos requieren condiciones más específicas para ser acelerados hasta niveles detectables, tal como han señalado investigaciones sobre la energía dependiente de estos procesos (Reeves et al., 2016).

El panel central corresponde a los eventos de pérdida, donde se nota un comportamiento complementario: las pérdidas ocurren con mayor frecuencia en regiones intermedias, entre $L \approx 3.0$ y $L \approx 4.5$, especialmente para la energía de 4.2 MeV. Este patrón puede estar asociado a procesos de pérdida como la precipitación inducida por ondas EMIC (Engebretson et al., 2015; Hendry et al., 2019L) o la difusión radial hacia el borde del cinturón (R. M. Thorne et al., 2013T). Además, se ha documentado que estas pérdidas son más intensas y frecuentes en electrones de mayor energía, debido a su mayor vulnerabilidad frente a estos mecanismos (Zhang et al., 2021).

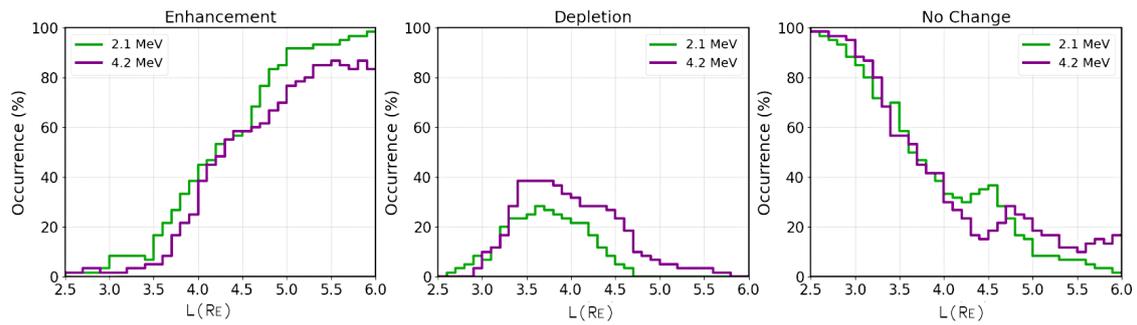


Figura 4.5: Distribución de la ocurrencia de eventos de aumento (Enhancement), pérdida (Depletion) y sin cambio (No Change) en función de L para las energías de 2.1 MeV (verde) y 4.2 MeV (morado), medidas con REPT. La clasificación se basa en la razón entre flujos post y pre evento.

En el panel derecho, los eventos clasificados como sin cambio muestran una alta ocurrencia en las regiones más internas del cinturón, especialmente por debajo de $L=3.5$, con valores cercanos al 100% para ambas energías. Esto sugiere que, en estas zonas, los flujos relativistas son poco sensibles a las perturbaciones externas, probablemente debido a una combinación de menor eficiencia de los mecanismos de aceleración y mayor estabilidad del entorno magnético (Reeves et al., 2003; Reeves et al., 2016).

Sin embargo, en el rango de $L = 4$ a $L = 5$, se observa una caída local en la ocurrencia de eventos sin cambio, más marcada en la energía de 4.2 MeV. Esta disminución está directamente relacionada con el aumento en la proporción de eventos de pérdida registrados en ese mismo rango de L (como se aprecia en el panel central). Es decir, en lugar de permanecer sin variaciones, los flujos en esta región tienden a decrecer tras el evento, lo que disminuye la clasificación como "sin cambio". Este resultado es consistente con estudios previos que indican que las regiones intermedias del cinturón externo son más susceptibles a procesos de pérdida, (Millan y Thorne, 2007) o la difusión radial impulsada por procesos de onda-partícula (Turner et al., 2014).

La Figura 4.6 muestra el comportamiento del ratio de aumento (enhancement ratio) en función de L para las energías de 2.1 MeV (izquierda) y 4.2 MeV (derecha), utilizando los datos de REPT. Este ratio se define como la razón entre el flujo máximo posterior al evento y el flujo máximo previo, lo cual permite cuantificar el nivel relativo de aumento de electrones para cada ubicación radial. En cada bin de L, se representa una caja con el rango intercuartílico (25%–75%), las barras de error corresponden al rango total, y el punto negro indica la mediana de los valores.

Se muestra con claridad cómo los eventos de aumento tienden a ser más intensos en las regiones externas del cinturón de radiación, especialmente a partir de $L \gtrsim 4.5$, donde los valores medianos del ratio superan consistentemente el umbral de 2 (línea azul punteada). Esta tendencia es coherente con la figura anterior (Figura 4.5), donde se observó una alta ocurrencia de eventos de aumento en L altas para ambas energías.

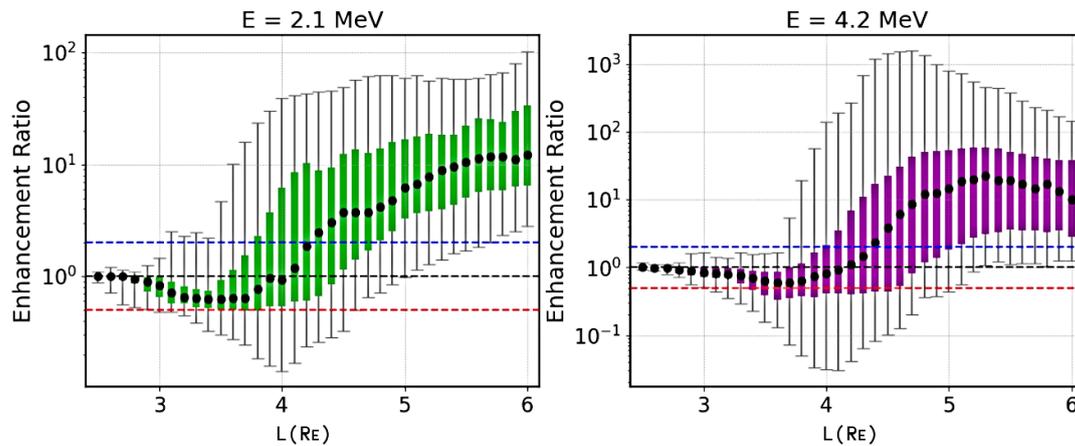


Figura 4.6: Razón post/pre flujo en función de L para las energías de 2.1 MeV (izquierda) y 4.2 MeV (derecha), obtenida con REPT. Se muestran las medianas (puntos negros), el rango intercuartílico (barras de color) y la dispersión total (líneas de error). Las líneas horizontales indican los umbrales de clasificación: aumento ($r > 2$, azul), sin cambio ($0,5 \leq r \leq 2$, negro) y pérdida ($r < 0,5$, rojo).

Asimismo, en regiones internas (por debajo de $L \approx 3.5$), los valores del ratio permanecen cercanos a 1 o por debajo, lo que respalda la clasificación previa de "sin cambio" en esas zonas. Es importante destacar que aunque ambos canales presentan una tendencia similar, los aumentos para 4.2 MeV son menos intensos en promedio y con mayor dispersión, lo cual refleja que los electrones más energéticos requieren condiciones más específicas para experimentar una aceleración eficiente. Además, la amplitud de las barras de error en esta energía sugiere una mayor variabilidad evento a evento, lo que podría estar asociado a la diversidad de mecanismos y condiciones que afectan a estas partículas.

4.3. Comparación de la Respuesta de GOES-15 y REPT ante Eventos REE

A continuación, se presentan las correlaciones entre los flujos de electrones observados por los satélites GOES15 y REPT con un enfoque particular en las energías de 2 MeV y 4 MeV, tal como se muestra en la Figura 4.7. Cada gráfico presenta el ajuste lineal (línea roja) y el coeficiente de correlación r . Los datos muestran una relación lineal moderada, los flujos en distintas energías responden de manera similar a las condiciones del entorno espacial, lo que permite correlacionar los datos de diferentes satélites que operan en diferentes ubicaciones y configuraciones. Los coeficientes de correlación obtenidos (0.81 para $L=5.5$, 0.77 para $L=5.0$, 0.87 para $L=4.5$, etc.) indican una relación significativa entre los flujos observados por GOES15 y REPT, con una mayor correlación en L mayores y menor a medida que disminuye L.

Estos resultados coinciden con investigaciones previas, como las de Pinto et al., 2020, quienes

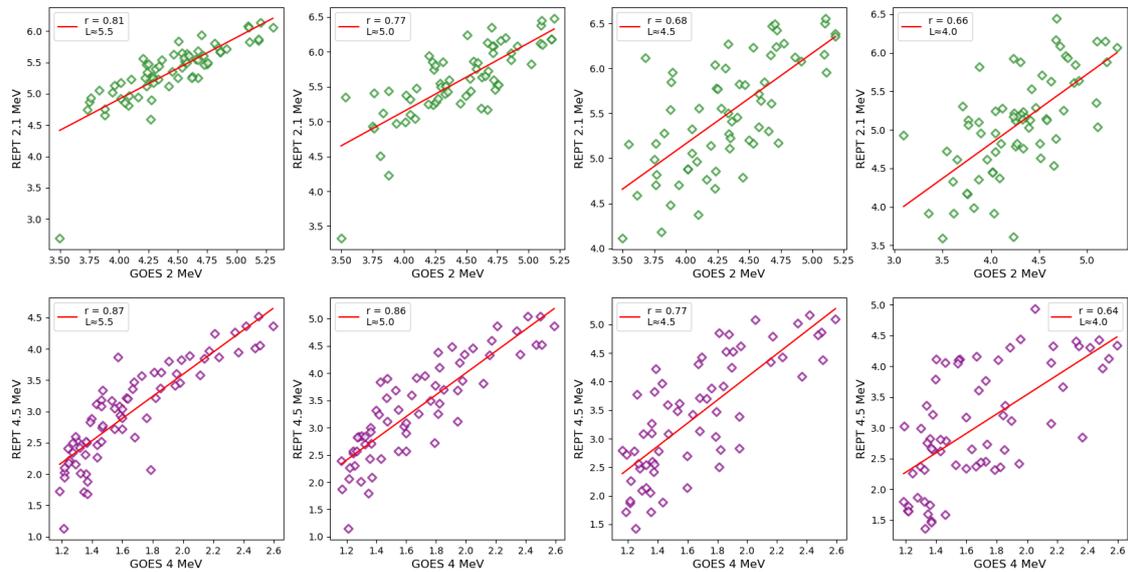


Figura 4.7: Correlación entre los flujos de electrones observados por los satélites GOES15 y REPT en los canales de energía de 2 MeV (verde) y 4 MeV (morado). En cada gráfico se incluye el ajuste lineal (línea roja) y el coeficiente de correlación r . Además, se muestra el valor de L correspondiente a cada gráfico

analizaron la relación entre los datos de GOES y REPT, observando una buena correlación de los flujos de electrones en determinadas regiones del cinturón de radiación, especialmente dentro de ciertos rangos de L . La correlación entre los flujos medidos por GOES15 y REPT resulta especialmente relevante, ya que permite continuar estudiando la dinámica de los electrones en los cinturones de radiación utilizando los datos de GOES, incluso después de que los satélites REPT dejaron de estar operativos. Es fundamental determinar hasta qué punto los datos de GOES15 pueden ser representativos del comportamiento observado anteriormente con instrumentos más especializados como REPT.

Es por esto que se tiene la Figura 4.8, la cual muestra el comportamiento del coeficiente de correlación entre los flujos de electrones medidos por GOES-15 y REPT en función de todos los rangos de L . La figura se divide en tres paneles, cada uno correspondiente a un caso distinto del evento: la razón post/pre (izquierda), el flujo máximo antes del evento (centro) y el flujo máximo después del evento (derecha). Las diferencias entre los tres paneles reflejan no solo la influencia de la etapa del evento analizada, sino también la respuesta diferenciada de cada energía frente a los procesos dinámicos del cinturón de radiación. Para la energía de 2.1 MeV, se observa un crecimiento sostenido del coeficiente de correlación con L en los tres casos, pero con mayor regularidad en los flujos pre y post evento. Esto indica que los electrones de menor energía responden de forma más estable a las condiciones del entorno, y que tanto GOES-15 como REPT capturan esta evolución

de forma coherente en L medias y altas. Por otro lado, para la energía de 4.2 MeV, los resultados revelan aspectos clave. En el caso del flujo post-evento, la correlación alcanza niveles muy altos (cercanos a 0.9) a partir de $L \gtrsim 4.5$, lo que muestra una excelente concordancia entre GOES y REPT en la detección de aumentos sostenidos de electrones relativistas más energéticos en las regiones externas del cinturón. Sin embargo, en el caso del ratio post/pre y del flujo pre-evento, la correlación es más baja en L internas e intermedias, lo que sugiere que el canal de 4.2 MeV es más sensible a las condiciones locales, y que la variabilidad espacial y temporal del flujo a esa energía es mayor.

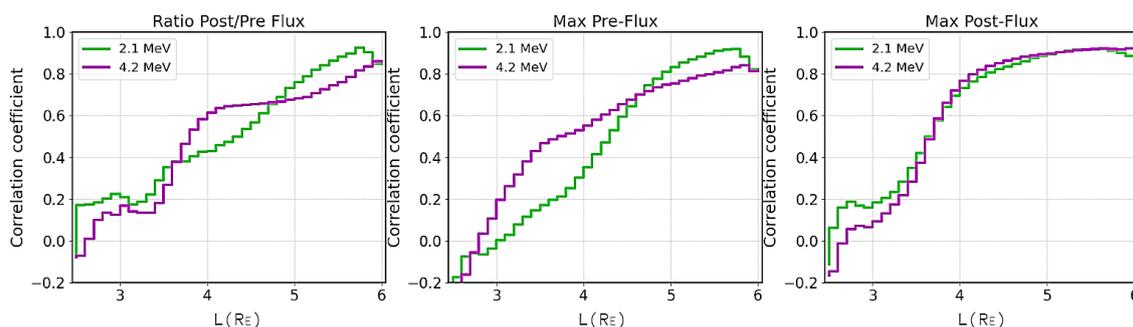


Figura 4.8: Coeficiente de correlación entre los flujos observados por GOES-15 y REPT en función de L para tres casos: razón post/pre (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha), para las energías de 2.1 MeV (verde) y 4.2 MeV (morado).

Esto es esperable, ya que el satélite GOES-15 se encuentra limitado a una única ubicación fija en órbita geoestacionaria, mientras que REPT realiza un muestreo radial a lo largo del cinturón. Esta diferencia en cobertura espacial afecta particularmente las comparaciones para los electrones más energéticos, cuya distribución puede variar significativamente con L y con el tiempo. Como resultado, la coherencia entre ambos instrumentos disminuye en regiones alejadas de la órbita GEO. Estos resultados no solo refuerzan la validez del canal de 4 MeV de GOES-15 en estudios de electrones relativistas, sino que también evidencian cuándo y dónde puede ser usado con mayor confiabilidad: principalmente en las regiones externas del cinturón ($L > 4.5$) y durante la fase post evento, cuando el flujo ha sido reorganizado por mecanismos de aceleración dominantes. Esta caracterización es fundamental para mejorar el uso combinado de datos multienergía y multiinstrumento en la investigación del cinturón de radiación.

Capítulo 5: Correlación de Flujos Usando REPT y GOES-15 en Función de L para diferentes Canales de Energía.

El instrumento REPT, a bordo de los satélites Van Allen Probes, permite medir flujos de electrones relativistas en múltiples canales de energía, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para estudiar la dinámica del cinturón de radiación externo. En la Figura 5.1, se observa la evolución temporal de los flujos para cuatro canales energéticos distintos (1.8, 2.1, 2.6 y 3.4 MeV), mostrando diferencias claras tanto en la intensidad como en la ubicación radial L de los máximos. Esta variabilidad energética refleja que el comportamiento del cinturón puede depender fuertemente del nivel de energía considerado, y por tanto, resulta esencial contar con una resolución espectral adecuada para entender su evolución.

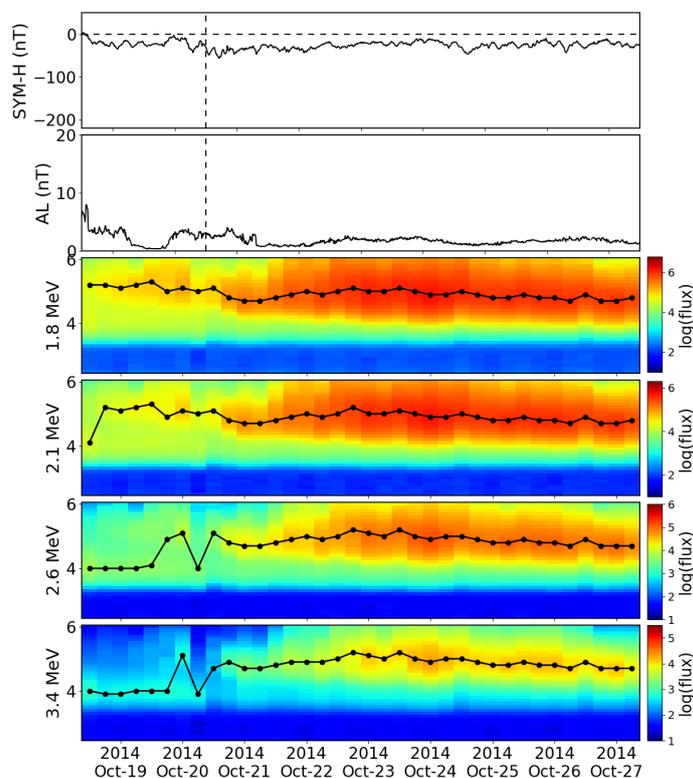


Figura 5.1: Evolución temporal de un evento en octubre de 2014. Los paneles superiores muestran los índices SYM-H y AL, con la línea punteada indicando el inicio de la tormenta geomagnética. Los paneles inferiores presentan los flujos de electrones medidos por REPT en distintos canales de energía, en función del tiempo y L. los puntos negros indican el L de flujo máximo diario.

A partir de estos datos detallados proporcionados por REPT, es posible evaluar qué tan bien se correlacionan los flujos observados en cada canal energético con los registros del satélite GOES-15, el cual ofrece dos canales principales en torno a 2 MeV y 4 MeV. Esta comparación resulta especialmente relevante, dado que GOES-15, al encontrarse en órbita geoestacionaria, es una fuente continua de monitoreo, mientras que REPT proporciona una cobertura más amplia en L pero con menos continuidad temporal. Determinar hasta qué punto los flujos registrados por ambos instrumentos son comparables permite no solo validar observaciones cruzadas, sino también establecer los límites de aplicabilidad de los datos de GOES en estudios espectrales y espaciales más complejos del entorno radiativo terrestre.

5.1. Porcentaje de ocurrencia de REPT para todas las Energías

La Figura 5.2 muestra la distribución porcentual de ocurrencia de eventos REE clasificados como Aumento, Pérdida y Sin cambio en función de L, para los ocho canales de energía disponibles en el instrumento REPT. En términos generales, los eventos de Aumento (Enhancement) presentan un patrón creciente con L. La ocurrencia es baja en las regiones internas ($L < 3.0$), pero a partir de $L \approx 3.5$ las curvas comienzan a elevarse con rapidez, alcanzando valores cercanos al 100% para $L > 5.5$ en varios canales. Este comportamiento indica que los procesos de aceleración responsables de los REE tienden a ser más efectivos en las regiones externas del cinturón de radiación. En contraste, el panel de Pérdida (Depletion) muestra un perfil más concentrado y simétrico, con un claro máximo en la región media del cinturón, entre $L \approx 3.5$ y $L \approx 4.5$, y un descenso rápido hacia ambos extremos. Esta distribución sugiere que las pérdidas se producen principalmente en zonas donde pueden dominar procesos como la precipitación inducida por ondas o la difusión radial hacia regiones internas.

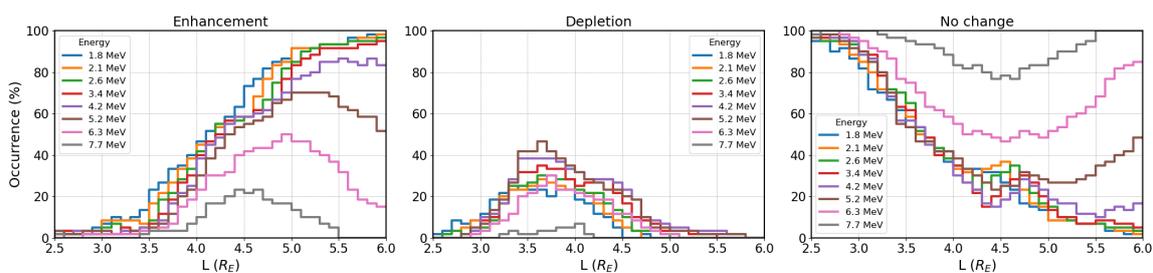


Figura 5.2: Porcentaje de ocurrencia de eventos clasificados como Aumento, Pérdida y Sin cambio en función de L, para ocho canales de energía del instrumento REPT. Cada panel corresponde a un tipo de evento: aumento (Enhancement), pérdida (Depletion) y sin cambio (No change), y cada curva representa una energía distinta

Por último, los eventos clasificados como Sin cambio (No change) son más frecuentes en las regiones más internas del cinturón ($L < 3.2$), con ocurrencias superiores al 80% para casi todos los

canales. A medida que se incrementa L , esta categoría pierde presencia en los canales de menor energía, aunque se mantiene dominante en los canales más energéticos, incluso en regiones externas donde predominan los aumentos en otras energías. Al analizar en detalle la evolución con la energía, se observa un comportamiento coherente para los canales de 1.8, 2.1, 2.6 y 3.4 MeV. Estos presentan curvas similares, tanto en aumento como en pérdida y sin cambio, con una transición clara: predominan los Sin cambio en regiones internas, los Aumentos en regiones externas, y tienen una contribución intermedia a las Pérdidas en la zona central del cinturón. Esta regularidad sugiere que estos canales responden de manera robusta y bien caracterizada ante los REE, y que reflejan el comportamiento típico del cinturón externo reportado en la literatura.

Sin embargo, a partir del canal de 5.2 MeV (curva café), se comienza a evidenciar un cambio importante en la respuesta energética. En el panel de Aumento, esta energía inicialmente sigue el mismo crecimiento que los canales más bajos, pero a partir de $L \approx 4.8$, su curva se desvía y muestra una saturación más temprana, sin alcanzar el 100% de ocurrencia como las energías menores. Esto sugiere que a partir de esta energía, los mecanismos de aceleración comienzan a perder eficiencia o se vuelven más selectivos. En el panel de Pérdida, el canal de 5.2 MeV resulta especialmente relevante, ya que es el que alcanza el máximo de ocurrencia entre todas las energías, con un pico cercano al 45% en $L \approx 3.7$. Esta prominencia indica que los electrones con esta energía son particularmente susceptibles a mecanismos de pérdida durante los REE. Finalmente, en el panel de Sin cambio, la curva de 5.2 MeV desciende más lentamente que las energías más bajas, manteniéndose relativamente alta incluso en $L > 4.5$, lo cual refuerza la idea de que este canal representa una energía de transición: lo suficientemente alta para escapar de los patrones típicos de aumento, pero aún vulnerable a procesos de pérdida.

La diferencia más marcada se observa en el canal de 7.7 MeV (curva gris), que se comporta de manera completamente distinta al resto. En el panel de Aumento, la ocurrencia es baja en todo el rango de L , con una leve elevación hasta $L \approx 4.5$ y una rápida caída posterior, sin superar el 30%. En Pérdida, su contribución es prácticamente nula, lo que indica que este canal no muestra respuesta significativa ante los procesos de pérdida más comunes. En cambio, en el panel de Sin cambio, el canal de 7.7 MeV domina casi todo el rango de L , manteniéndose constantemente por encima del 80%. Este comportamiento sugiere que los electrones ultra-relativistas en este canal son mucho más estables frente a las perturbaciones típicas de los REE, o bien que las condiciones necesarias para su aceleración o pérdida no se alcanzan con frecuencia durante los eventos analizados.

5.2. Comparación de GOES-15 y REPT para diferentes canales de energía

La Figura 5.3 presenta los coeficientes de correlación entre el canal de 2.1 MeV del satélite GOES-15 y todos los canales de energía del instrumento REPT, en función de L , para tres métricas distintas: la razón de flujos post/pre-evento (panel izquierdo), el flujo máximo pre-evento (panel central) y el flujo máximo post-evento (panel derecho). En el panel izquierdo, que muestra la correlación

basada en la razón de flujos post/pre, se observa una evolución creciente del coeficiente de correlación con la L para casi todos los canales de energía. A bajas L ($L < 3.5$), las correlaciones son en general débiles o incluso negativas, lo que indica una pobre correspondencia entre los flujos registrados por GOES-15 y REPT en estas regiones internas. Sin embargo, a medida que se avanza hacia $L \approx 4.0$ y más allá, la coherencia entre ambos instrumentos mejora notablemente, alcanzando valores de correlación de hasta 0.8 para las energías más bajas. Esto sugiere que la relación entre los flujos pre y post evento se manifiesta de forma más consistente en las regiones externas del cinturón, donde los eventos REE suelen tener mayor impacto.

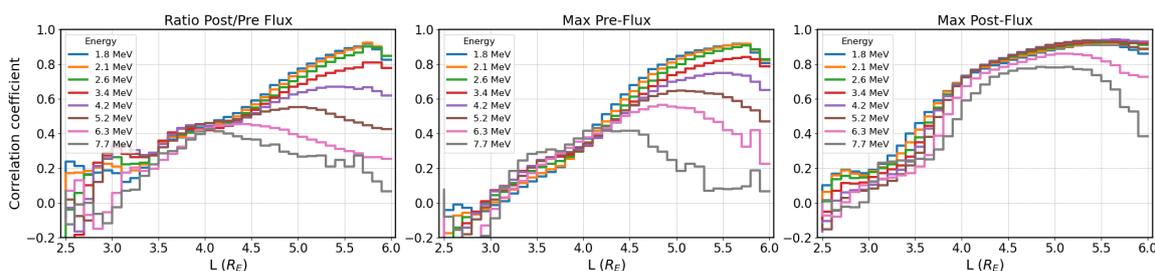


Figura 5.3: Coeficientes de correlación entre el canal de 2.1 MeV del satélite GOES-15 y los distintos canales de energía de REPT, en función de L. Se presentan tres métricas: razón post/pre-flujo (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha).

El panel central, correspondiente al flujo máximo pre-evento, muestra un patrón similar, aunque las correlaciones son en general más bajas que en el caso de la razón post/pre. Esto podría deberse a que las condiciones pre-evento son más variables y están menos dominadas por una señal común detectable entre ambos satélites. No obstante, se conserva la tendencia de incremento con L, destacando nuevamente una mayor coherencia en las regiones externas.

Por otro lado, el panel derecho, que muestra la correlación entre los flujos máximos post-evento, revela un comportamiento notablemente diferente. Aquí, las curvas presentan una evolución más suave, menos dispersa entre energías, y alcanzan coeficientes de correlación significativamente más altos en general. Para muchas energías, la correlación supera 0.9 en $L > 5.0$, lo cual indica una excelente correspondencia entre GOES y REPT durante la fase posterior al evento. Este comportamiento más uniforme sugiere que los flujos post-evento tienden a estabilizarse de manera consistente a través de diferentes regiones y energías, lo que favorece una mayor coherencia interinstrumental. A diferencia de los flujos pre-evento, que están más influenciados por condiciones locales y antecedentes recientes del entorno espacial, el flujo post-evento parece reflejar una respuesta más estructurada y común a nivel global en el cinturón de radiación.

Al observar con mayor detalle el comportamiento según la energía, se identifica una respuesta bastante coherente para los canales más bajos (1.8, 2.1 y 2.6 MeV), que mantienen altas correlaciones con GOES-15 en todos los paneles, especialmente en regiones externas. Esta consistencia se debe en parte a la cercanía espectral con el canal de 2.1 MeV de GOES, lo cual favorece una

buena correspondencia en magnitud y dinámica. A partir de la energía de 3.4 MeV comienzan a notarse desviaciones importantes. En los paneles de razón post/pre y de flujo pre-evento, la correlación se reduce progresivamente, en especial hacia $L > 5.0$, indicando que las energías más altas comienzan a comportarse de manera diferente respecto al canal de referencia. Esta separación se acentúa aún más en las energías de 4.2 y 5.2 MeV, donde la correlación con GOES disminuye notablemente en las fases pre y en la relación post/pre, lo que indica que el canal de 2.1 MeV ya no representa adecuadamente la dinámica de estos electrones más energéticos. No obstante, en el flujo post-evento, incluso estas energías conservan una buena correlación, lo que refuerza la idea de que los aumentos sostenidos posteriores al evento tienden a alinear el comportamiento de los flujos, aun cuando su dinámica previa haya sido divergente.

Finalmente, los canales de 6.3 y 7.7 MeV muestran un comportamiento marcadamente distinto. En los dos primeros paneles, las correlaciones se mantienen bajas o incluso erráticas en todo el rango de L , lo que refleja tanto diferencias instrumentales como físicas: estos electrones ultra-relativistas no responden de la misma manera ante los REE, y su dinámica puede estar gobernada por procesos menos eficientes o más específicos. Sin embargo, en el flujo post-evento, ambas energías logran mantener una correlación moderada en $L > 5.0$, aunque claramente por debajo de las energías más bajas. Esta persistencia de la señal post-evento aun en energías altas sugiere que, si bien GOES 15 no puede representar con precisión la variación relativa ni el nivel pre-evento de estos flujos, sí capta parte de su aumento sostenido tras la fase principal del REE.

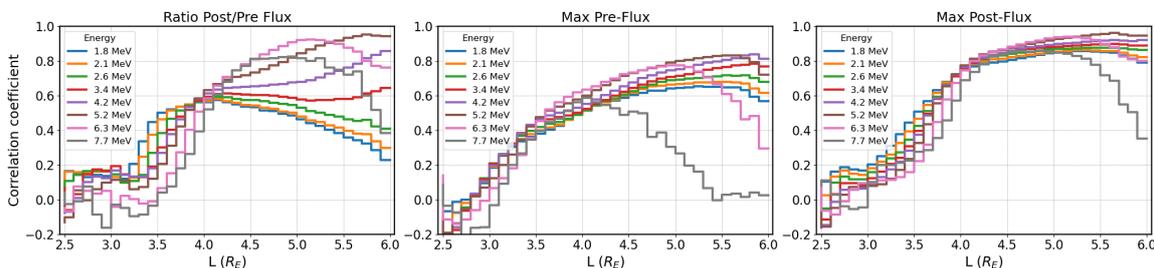


Figura 5.4: Coeficientes de correlación entre el canal de 4.2 MeV del satélite GOES-15 y los distintos canales de energía de REPT, en función de L . Se muestran tres métricas: razón post/pre-flujo (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha).

La Figura 5.4 presenta los coeficientes de correlación entre el canal de 4.2 MeV del satélite GOES-15 y los canales de energía del instrumento REPT, utilizando las mismas tres métricas de comparación que en la figura anterior: razón post/pre-flujo (izquierda), flujo máximo pre-evento (centro) y flujo máximo post-evento (derecha). En comparación con la figura anterior, donde se usaba como referencia el canal de 2.1 MeV, se observa un cambio significativo en el patrón general de correlación.

En el panel de razón post/pre, se nota una inversión en el comportamiento relativo: ahora las energías medias y altas (como 3.4, 4.2 y 5.2 MeV) presentan correlaciones más altas y sostenidas en

$L > 4.0$, mientras que las energías más bajas, que antes dominaban en coherencia con GOES 2.1 MeV, muestran aquí correlaciones más débiles o descendentes. En el flujo pre-evento, el cambio es similar: las energías intermedias tienden a mantenerse mejor correlacionadas, con valores más altos y estables a lo largo del cinturón, mientras que las energías más bajas disminuyen en comparación con la figura anterior. El panel post-evento, aunque sigue mostrando correlaciones altas en todos los canales como ya se había observado, revela una mayor convergencia entre las curvas, especialmente para las energías de rango medio. Esto sugiere que al utilizar un canal de mayor energía como referencia, la señal post-evento tiende a alinearse mejor con el comportamiento de REPT en energías medias y altas, lo que refuerza la estabilidad de este parámetro como indicador global del evento.

En cuanto a los canales más energéticos, 6.3 MeV (rosa) y 7.7 MeV (gris), su comportamiento es diferente en los tres paneles respecto a la figura anterior. En la correlación de razón post/pre, ambos canales presentan una evolución más suave y alcanzan valores significativamente más altos, especialmente alrededor de $L=5.0$, donde antes mostraban correlaciones bajas o ruidosas. En la fase pre-evento, la caída abrupta observada anteriormente se atenúa para 6.3 MeV pero no tanto para 7.7 MeV, sin embargo presentan una mejor correlación. Este comportamiento conjunto confirma que al utilizar un canal de GOES más cercano energéticamente, como el de 4.2 MeV, la coherencia con los canales con mayor energía de REPT mejora significativamente, permitiendo una mejor representación de su dinámica en todas las fases del evento.

Capítulo 6: Conclusiones y discusión

Este trabajo se centró en la caracterización de la evolución radial de los electrones ultrarrelativistas durante eventos de aumento REE, a partir de datos obtenidos por los satélites GOES-15 y REPT, con énfasis en el análisis de los canales energéticos de 2 MeV y 4 MeV. El objetivo fue evaluar la utilidad del canal de 4 MeV de GOES-15 en la identificación y caracterización de REE, así como determinar su correspondencia con mediciones de REPT en distintos rangos de L y energías.

Uno de los principales aportes de este trabajo fue confirmar que, aunque el canal de 2 MeV de GOES ha sido tradicionalmente utilizado como referencia en múltiples estudios (Reeves et al., 2003; Turner et al., 2015), el canal de 4 MeV también ofrece información valiosa y complementaria. En particular, se encontró que los flujos de electrones medidos en este canal presentan una fuerte correlación con los del canal de 2 MeV durante la fase post-tormenta (con coeficiente de correlación $R \approx 0.93$), lo que sugiere que ambos responden coherentemente a los mecanismos de aceleración que actúan tras un evento de aumento. No obstante, también se observó que la magnitud y el momento de respuesta pueden diferir entre ambos canales, reflejando la mayor selectividad del canal de 4 MeV ante ciertas condiciones del entorno espacial.

Esta observación concuerda con estudios recientes como el de Rodríguez et al., 2025, donde se evaluó la calibración y desempeño del canal de 4 MeV en los satélites GOES 13–15, concluyendo que este canal posee una precisión significativamente mejorada respecto a generaciones anteriores, con diferencia en que en este trabajo se prioriza no solo la evaluación instrumental del canal de 4 MeV de GOES-15, sino su validación funcional como proxy en estudios estadísticos de dinámica del cinturón de radiación, mediante una comparación detallada con datos multicanal de REPT y un enfoque centrado en la evolución radial y energética del flujo.

El análisis con REPT permitió caracterizar la distribución espacial de los REE en distintos canales de energía. Se observó que los eventos de aumento tienden a concentrarse en regiones externas del cinturón ($L > 5.0$), mientras que las pérdidas ocurren predominantemente en zonas intermedias ($L \approx 3.5\text{--}4.5$), y las regiones más internas ($L < 3.0$) presentan una alta estabilidad, clasificándose en su mayoría como "sin cambio". Esta estructura espacial fue coherente entre múltiples canales energéticos, aunque se evidenció una transición energética clara: a partir de ~ 5.0 MeV, los electrones mostraron una menor respuesta ante los REE, y en el canal de 7.7 MeV se observó una notable insensibilidad tanto a los mecanismos de aceleración como de pérdida. Este patrón sugiere que los electrones ultra-relativistas requieren condiciones excepcionales para ser significativamente modulados, o que sus escalas temporales de evolución no son capturadas adecuadamente en los eventos considerados.

Además, este estudio se desarrolló siguiendo como guía el marco metodológico y conceptual propuesto en el trabajo de Pinto et al., 2020, el cual caracterizó la respuesta radial del cinturón externo

a partir de eventos de aumento en GEO. El presente análisis no solo confirma varios de los patrones descritos por Pinto et al., como la alta coherencia para $L > 5$ y la menor variabilidad en regiones internas, sino que también extiende sus hallazgos incorporando energías más altas (como 4.2 MeV) y realizando un análisis comparativo detallado entre canales instrumentales, estableciendo condiciones de confiabilidad para el uso de GOES-15 en ausencia de REPT.

La comparación entre los flujos registrados por GOES-15 y REPT reveló correlaciones particularmente fuertes en la fase post-evento para energías de hasta 4.2 MeV, especialmente en las regiones externas ($L > 4.5$), donde los mecanismos de aceleración como la difusión radial y la interacción con ondas chorus son más eficientes. En contraste, las correlaciones en la fase pre-evento fueron más débiles y variables, especialmente para energías altas, lo que sugiere una mayor sensibilidad a las condiciones locales y una menor coherencia espacial entre ambos instrumentos en ese intervalo. Estos resultados refuerzan lo planteado por estudios como los de Ripoll et al., 2019, quienes argumentan que la respuesta del cinturón externo ante tormentas geomagnéticas no solo depende de la intensidad de la perturbación, sino también del historial previo de condiciones de fondo, la estructura de las poblaciones electrónicas y la disponibilidad de mecanismos de aceleración.

Como líneas futuras de investigación, se propone complementar el estudio actual mediante el análisis de las ondas electromagnéticas que interactúan con los electrones en el cinturón de radiación, utilizando los datos del instrumento EMFISIS a bordo de las sondas Van Allen. Esto permitiría identificar qué tipos de ondas están presentes durante los eventos de aumento y en qué regiones del cinturón se producen estas interacciones. Con ello, se podría avanzar en la determinación de los mecanismos físicos que dominan los procesos de aceleración, pérdida y transporte de electrones relativistas, fortaleciendo la interpretación de los resultados observacionales obtenidos en esta tesis. Finalmente, se recomienda aplicar herramientas estadísticas más robustas, como análisis multivariado, clasificación supervisada y métodos de aprendizaje automático (machine learning), para mejorar la capacidad predictiva en la identificación de eventos de aumento. Estos enfoques permitirían construir modelos que incorporen múltiples variables físicas (como la evolución de los índices geomagnéticos, parámetros del viento solar, densidad del plasma y flujos previos) y establecer relaciones no lineales o patrones ocultos que son difíciles de detectar con métodos convencionales. La combinación de estos modelos con los resultados empíricos presentados aquí, permitiría una validación cruzada que fortalecería el desarrollo de herramientas operacionales de pronóstico del clima espacial con impacto directo en la protección de satélites y sistemas tecnológicos en órbita.

Anexo A: Eventos de aumento

Este anexo presenta la Tabla A.1, la cual contiene todas las fechas correspondientes a eventos de aumento de electrones relativistas identificados a partir de los datos del satélite GOES-15. Para cada uno de estos eventos se incluye el valor mínimo del índice SYM-H, el valor máximo del índice Kp y el conductor interplanetario asociado. Estos eventos fueron seleccionados para analizar la respuesta del entorno magnetosférico ante variaciones en las condiciones del viento solar.

Tabla A.1: Lista de eventos de aumento de electrones relativistas utilizados en este estudio. Las fechas corresponden al primer gradiente positivo en los flujos que conduce a un aumento detectado por los satélites GOES (redondeado a la hora más cercana). La tabla también muestra el valor mínimo del índice SYM-H asociado a cada evento, el valor máximo del índice Kp y el conductor del viento solar correspondiente a cada evento (Pinto et al., 2020).

Event Date	Min SYM-H	Max Kp	Driver
2012-10-08/22:00:00	-116	6.7	CME
2013-03-01/18:00:00	-76	5.0	CIR
2013-04-25/12:00:00	-52	5.0	CIR
2013-06-22/08:00:00	-27	4.3	CIR
2013-07-10/08:00:00	-57	4.7	CME
2013-08-05/00:00:00	-56	4.7	CIR
2013-08-16/04:00:00	-54	5.3	CIR
2013-09-01/04:00:00	-42	4.0	CIR
2013-09-19/08:00:00	-31	4.0	CIR
2013-10-15/11:00:00	-52	4.3	CIR
2014-04-24/15:00:00	-28	3.3	-
2014-08-29/09:00:00	-90	4.7	CME
2014-10-21/12:00:00	-57	5.0	CIR
2014-11-15/12:00:00	-51	4.3	CIR
2014-12-07/12:00:00	-34	4.7	CIR
2015-02-02/12:00:00	-52	5.0	CIR
2015-03-18/04:00:00	-234	7.7	CME
2015-04-16/12:00:00	-88	6.0	CIR
2015-05-13/09:00:00	-98	5.7	CIR
2015-06-08/17:00:00	-105	6.0	CIR

Continúa en la siguiente página

Event Date	Min SYM-H	Max Kp	Driver
2015-08-16/00:00:00	-94	6.0	CME
2015-11-03/18:00:00	-67	5.3	CIR
2015-12-01/14:00:00	-45	5.0	-
2016-01-21/15:00:00	-95	5.7	CIR
2016-02-16/17:00:00	-58	5.3	CIR
2016-03-07/09:00:00	-110	6.3	CME
2016-03-15/08:00:00	-62	5.3	CIR
2016-04-03/09:00:00	-66	5.0	CIR
2016-04-13/10:00:00	-70	5.0	CME
2016-05-02/12:00:00	-56	5.7	CIR
2016-05-08/13:00:00	-105	6.3	CIR
2016-06-25/00:00:00	-40	3.7	CIR
2016-07-08/09:00:00	-36	4.7	CIR
2016-08-03/12:00:00	-63	5.0	CIR
2016-08-24/12:00:00	-83	5.3	CIR
2016-09-01/14:00:00	-74	6.0	CIR
2016-09-27/06:00:00	-51	5.7	CIR
2016-10-13/19:00:00	-114	6.3	CME
2016-10-25/12:00:00	-81	6.3	CIR
2016-11-12/13:00:00	-55	4.7	CME
2016-11-25/01:00:00	-53	5.3	CIR
2016-12-08/14:00:00	-33	4.3	CIR
2016-12-22/06:00:00	-52	6.0	CIR
2017-01-05/12:00:00	-47	4.0	CIR
2017-01-31/21:00:00	-48	5.0	CIR
2017-03-01/18:00:00	-74	5.7	CIR
2017-03-22/09:00:00	-46	5.3	CIR
2017-04-20/18:00:00	-48	5.7	CME + CIR
2017-05-20/09:00:00	-44	4.3	CIR
2017-06-17/12:00:00	-38	5.0	CIR
2017-07-16/17:00:00	-67	6.0	CME
2017-08-05/06:00:00	-35	4.3	CIR
2017-08-18/08:00:00	-36	4.7	CIR

Continúa en la siguiente página

Event Date	Min SYM-H	Max Kp	Driver
2017-09-01/08:00:00	-64	5.3	CIR
2017-09-15/04:00:00	-44	5.7	CME
2017-09-28/00:00:00	-74	6.7	CIR
2017-10-12/09:00:00	-49	5.0	CIR
2017-11-07/23:00:00	-89	6.3	CIR
2017-12-05/14:00:00	-47	5.0	CIR
2017-12-17/15:00:00	-34	4.7	CIR

Bibliografía

- Albert, J. M., Meredith, N. P., & Horne, R. B. (2009). Three-dimensional diffusion simulation of outer radiation belt electrons during the 9 October 1990 magnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *114*(A9), 2009JA014336. <https://doi.org/10.1029/2009JA014336>
- Ali, A. F., Malaspina, D. M., Elkington, S. R., Jaynes, A. N., Chan, A. A., Wygant, J., & Kletzing, C. A. (2016). Electric and magnetic radial diffusion coefficients using the Van Allen probes data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*(10), 9586-9607. <https://doi.org/10.1002/2016JA023002>
- Anderson, B. R., Millan, R. M., Reeves, G. D., & Friedel, R. H. W. (2015). Acceleration and loss of relativistic electrons during small geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, *42*(23). <https://doi.org/10.1002/2015GL066376>
- Baker, D. N., Kanekal, S. G., Hoxie, V. C., Batiste, S., Bolton, M., Li, X., Elkington, S. R., Monk, S., Reukauf, R., Steg, S., Westfall, J., Belting, C., Bolton, B., Braun, D., Cervelli, B., Hubbell, K., Kien, M., Knappmiller, S., Wade, S., ... Friedel, R. (2013). The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Instrument on Board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft: Characterization of Earth's Radiation Belt High-Energy Particle Populations. *Space Science Reviews*, *179*(1-4), 337-381. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9950-9>
- Baker, D. N., Kanekal, S. G., Hoxie, V. C., Henderson, M. G., Li, X., Spence, H. E., Elkington, S. R., Friedel, R. H. W., Goldstein, J., Hudson, M. K., Reeves, G. D., Thorne, R. M., Kletzing, C. A., & Claudepierre, S. G. (2013). A Long-Lived Relativistic Electron Storage Ring Embedded in Earth's Outer Van Allen Belt. *Science*, *340*(6129), 186-190. <https://doi.org/10.1126/science.1233518>
- Baker, D. N., Zhao, H., Li, X., Kanekal, S. G., Jaynes, A. N., Kress, B. T., Rodriguez, J. V., Singer, H. J., Claudepierre, S. G., Fennell, J. F., & Hoxie, V. (2019). Comparison of Van Allen Probes Energetic Electron Data With Corresponding GOES-15 Measurements: 2012–2018. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(12), 9924-9942. <https://doi.org/10.1029/2019JA027331>
- Baker, D. N., Hoxie, V., Zhao, H., Jaynes, A. N., Kanekal, S., Li, X., & Elkington, S. (2019). Multi-year Measurements of Radiation Belt Electrons: Acceleration, Transport, and Loss. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(4), 2588-2602. <https://doi.org/10.1029/2018JA026259>
- Baker, D. (2001). Satellite Anomalies Due to Space Storms. En I. A. Daglis (Ed.), *Space Storms and Space Weather Hazards* (pp. 285-311). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6_11
- Bartels, J., Heck, N. H., & Johnston, H. F. (1939). The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, *44*(4), 411-454. <https://doi.org/10.1029/TE044i004p00411>
- Beatty, K. (2013). Earth Briefly Gains Third Radiation Belt.
- Bingham, S. T., Mouikis, C. G., Kistler, L. M., Boyd, A. J., Paulson, K., Farrugia, C. J., Huang, C. L., Spence, H. E., Claudepierre, S. G., & Kletzing, C. (2018). The Outer Radiation Belt Response to the Storm Time Development of Seed Electrons and Chorus Wave Activity During CME and CIR Driven Storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *123*(12). <https://doi.org/10.1029/2018JA025963>
- Blake, J. B., Carranza, P. A., Claudepierre, S. G., Clemmons, J. H., Crain, W. R., Dotan, Y., Fennell, J. F., Fuentes, F. H., Galvan, R. M., George, J. S., Henderson, M. G., Lalic, M., Lin,

- A. Y., Looper, M. D., Mabry, D. J., Mazur, J. E., McCarthy, B., Nguyen, C. Q., O'Brien, T. P., ... Zakrzewski, M. P. (2013). The Magnetic Electron Ion Spectrometer (MagEIS) Instruments Aboard the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft. *Space Science Reviews*, 179(1-4), 383-421. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9991-8>
- Borovsky, J. E., & Denton, M. H. (2010). Magnetic field at geosynchronous orbit during high-speed stream-driven storms: Connections to the solar wind, the plasma sheet, and the outer electron radiation belt. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A8), 2009JA015116. <https://doi.org/10.1029/2009JA015116>
- Borovsky, J. E., & Shprits, Y. Y. (2017). Is the *Dst* Index Sufficient to Define All Geospace Storms? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(11). <https://doi.org/10.1002/2017JA024679>
- Borovsky, J. E., & Valdivia, J. A. (2018). The Earth's Magnetosphere: A Systems Science Overview and Assessment. *Surveys in Geophysics*, 39(5), 817-859. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9487-x>
- Boudouridis, A., Rodriguez, J., Kress, B., Dichter, B., & Onsager, T. (2020). Development of a Bowtie Inversion Technique for Real-Time Processing of the GOES-16/-17 SEISS MPS-HI Electron Channels. *Space Weather*, 18(4), e2019SW002403. <https://doi.org/10.1029/2019SW002403>
- Bowman, A. (2014). Geostationary Operational Environmental Satellite 15 (GOES-15).
- Brautigam, D. H., & Albert, J. M. (2000). Radial diffusion analysis of outer radiation belt electrons during the October 9, 1990, magnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A1), 291-309. <https://doi.org/10.1029/1999JA900344>
- Bridgman, T. (2013). Van Allen Probes Find Storage Ring in Earth's Outer Radiation Belt.
- Chen, F. F. (2016). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22309-4>
- Choi, H.-S., Lee, J., Cho, K.-S., Kwak, Y.-S., Cho, I.-H., Park, Y.-D., Kim, Y.-H., Baker, D. N., Reeves, G. D., & Lee, D.-K. (2011). Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships. *Space Weather*, 9(6), 2010SW000597. <https://doi.org/10.1029/2010SW000597>
- Commissariat, T. (2013). New Radiation Ring Spotted in Van Allen Belt.
- Cunningham, G. S., Loridan, V., Ripoll, J.-F., & Schulz, M. (2018). Neoclassical Diffusion of Radiation-Belt Electrons Across Very Low *L* -Shells. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(4), 2884-2901. <https://doi.org/10.1002/2017JA024931>
- Davis, T. N., & Sugiura, M. (1966). Auroral electrojet activity index *AE* and its universal time variations. *Journal of Geophysical Research*, 71(3), 785-801. <https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- Engebretson, M. J., Posch, J. L., Wygant, J. R., Kletzing, C. A., Lessard, M. R., Huang, C.-L., Spence, H. E., Smith, C. W., Singer, H. J., Omura, Y., Horne, R. B., Reeves, G. D., Baker, D. N., Gkioulidou, M., Oksavik, K., Mann, I. R., Raita, T., & Shiokawa, K. (2015). Van Allen probes, NOAA, GOES, and ground observations of an intense EMIC wave event extending over 12 h in magnetic local time. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(7), 5465-5488. <https://doi.org/10.1002/2015JA021227>
- Ganushkina, N. Y., Liemohn, M. W., & Dubyagin, S. (2018). Current Systems in the Earth's Magnetosphere. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 309-332. <https://doi.org/10.1002/2017RG000590>
- Glauert, S. A., Horne, R. B., & Meredith, N. P. (2018). A 30-Year Simulation of the Outer Electron Radiation Belt. *Space Weather*, 16(10), 1498-1522. <https://doi.org/10.1029/2018SW001981>
- Glocer, A., Toth, G., Fok, M., Gombosi, T., & Liemohn, M. (2009). Integration of the radiation belt environment model into the space weather modeling framework. *Journal of Atmospheric*

- and *Solar-Terrestrial Physics*, 71(16), 1653-1663. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.01.003>
- Golden, D. (2007). L Shell Global Dipole.
- 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*, 99(A4), 5771-5792. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Goossens, M. (2003). *An Introduction to Plasma Astrophysics and Magnetohydrodynamics* (Vol. 294). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1076-4>
- Hendry, A. T., Santolik, O., Kletzing, C. A., Rodger, C. J., Shiokawa, K., & Baishev, D. (2019). Multi-instrument Observation of Nonlinear EMIC-Driven Electron Precipitation at sub-MeV Energies. *Geophysical Research Letters*, 46(13), 7248-7257. <https://doi.org/10.1029/2019GL082401>
- Herrera, D., Maget, V. F., & Sicard-Piet, A. (2016). Characterizing magnetopause shadowing effects in the outer electron radiation belt during geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(10), 9517-9530. <https://doi.org/10.1002/2016JA022825>
- Horne, R. B., & Thorne, R. M. (1998). Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 25(15), 3011-3014. <https://doi.org/10.1029/98GL01002>
- Hudson, M. K., Kress, B. T., Mueller, H.-R., Zastrow, J. A., & Bernard Blake, J. (2008). Relationship of the Van Allen radiation belts to solar wind drivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(5), 708-729. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.11.003>
- ILCE, . (2023). IV. MAGNETOSFERAS.
- Jaynes, A. N., Baker, D. N., Singer, H. J., Rodriguez, J. V., Loto'aniu, T. M., Ali, A. F., Elkington, S. R., Li, X., Kanekal, S. G., Claudepierre, S. G., Fennell, J. F., Li, W., Thorne, R. M., Kletzing, C. A., Spence, H. E., & Reeves, G. D. (2015). Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(9), 7240-7254. <https://doi.org/10.1002/2015JA021234>
- Karinen, A., & Mursula, K. (2005). A new reconstruction of the Dst index for 1932-2002. *Annales Geophysicae*, 23(2), 475-485. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-475-2005>
- Kim, H.-J., & Chan, A. A. (1997). Fully adiabatic changes in storm time relativistic electron fluxes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A10), 22107-22116. <https://doi.org/10.1029/97JA01814>
- Kim, H.-J., Lyons, L., Pinto, V., Wang, C.-P., & Kim, K.-C. (2015). Revisit of relationship between geosynchronous relativistic electron enhancements and magnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6155-6161. <https://doi.org/10.1002/2015GL065192>
- Kim, K.-C., Shprits, Y., Subbotin, D., & Ni, B. (2012). Relativistic radiation belt electron responses to GEM magnetic storms: Comparison of CRRES observations with 3-D VERB simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A8), 2011JA017460. <https://doi.org/10.1029/2011JA017460>
- Koskinen, H. E. J., & Kilpua, E. K. J. (2022). *Physics of Earth's Radiation Belts: Theory and Observations*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82167-8>
- Kotulak, K., Krankowski, A., Froń, A., Flisek, P., Wang, N., Li, Z., & Błaszkiwicz, L. (2021). Sub-Auroral and Mid-Latitude GNSS ROTI Performance during Solar Cycle 24 Geomagnetic Disturbed Periods: Towards Storm's Early Sensing. *Sensors*, 21(13), 4325. <https://doi.org/10.3390/s21134325>
- Kulsrud, R. M. (2005). *Plasma physics for astrophysics*. Princeton Univ. Press.
- Lanzerotti, L. J., & Baker, D. N. (2017). Space weather research: Earth's radiation belts. *Space Weather*, 15(6), 742-745. <https://doi.org/10.1002/2017SW001654>

- Lara, C. A. (2024). *Análisis de Datos En La Relación Entre La Aparición de Ondas ULF y La Evolución Del Flujo de Electrones Relativistas En El Cinturón de Radiación Externo* [Tesis de Magister]. Universidad de Chile.
- Lejosne, S. (2019). Analytic Expressions for Radial Diffusion. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(6), 4278-4294. <https://doi.org/10.1029/2019JA026786>
- Li, W., & Hudson, M. (2019). Earth's Van Allen Radiation Belts: From Discovery to the Van Allen Probes Era. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(11), 8319-8351. <https://doi.org/10.1029/2018JA025940>
- Li, W., Ma, Q., Bortnik, J., & Thorne, R. M. (2020, febrero). Recent Advances in Understanding Radiation Belt Electron Dynamics Due to Wave-Particle Interactions. En Q. Zong, P. Escoubet, D. Sibeck, G. Le & H. Zhang (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (1.^a ed., pp. 207-229). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119509592.ch12>
- Li, X., Baker, D. N., Zhao, H., Zhang, K., Jaynes, A. N., Schiller, Q., Kanekal, S. G., Blake, J. B., & Temerin, M. (2017). Radiation belt electron dynamics at low L (<4): Van Allen Probes era versus previous two solar cycles. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*(5), 5224-5234. <https://doi.org/10.1002/2017JA023924>
- Li, X., Temerin, M., Baker, D. N., Reeves, G. D., & Larson, D. (2001). Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements. *Geophysical Research Letters*, *28*(9), 1887-1890. <https://doi.org/10.1029/2000GL012681>
- Lyons, L. R., Thorne, R. M., & Kennel, C. F. (1972). Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere. *Journal of Geophysical Research*, *77*(19), 3455-3474. <https://doi.org/10.1029/JA077i019p03455>
- Mann, I. R., Ozeke, L. G., Murphy, K. R., Claudepierre, S. G., Turner, D. L., Baker, D. N., Rae, I. J., Kale, A., Milling, D. K., Boyd, A. J., Spence, H. E., Reeves, G. D., Singer, H. J., Dimitrakoudis, S., Daglis, I. A., & Honary, F. (2016). Explaining the dynamics of the ultra-relativistic third Van Allen radiation belt. *Nature Physics*, *12*(10), 978-983. <https://doi.org/10.1038/nphys3799>
- Mann, I. R., Lee, E. A., Claudepierre, S. G., Fennell, J. F., Degeling, A., Rae, I. J., Baker, D. N., Reeves, G. D., Spence, H. E., Ozeke, L. G., Rankin, R., Milling, D. K., Kale, A., Friedel, R. H. W., & Honary, F. (2013). Discovery of the action of a geophysical synchrotron in the Earth's Van Allen radiation belts. *Nature Communications*, *4*(1), 2795. <https://doi.org/10.1038/ncomms3795>
- Mauk, B. H., Fox, N. J., Kanekal, S. G., Kessel, R. L., Sibeck, D. G., & Ukhorskiy, A. (2013). Science Objectives and Rationale for the Radiation Belt Storm Probes Mission. *Space Science Reviews*, *179*(1-4), 3-27. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9908-y>
- Mayaud, P. N. (1980). *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices* (Vol. 22). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/GM022>
- Meredith, N. P., Horne, R. B., Isles, J. D., & Rodriguez, J. V. (2015). Extreme relativistic electron fluxes at geosynchronous orbit: Analysis of GOES $E > 2$ MeV electrons. *Space Weather*, *13*(3), 170-184. <https://doi.org/10.1002/2014SW001143>
- Meredith, N. P., Horne, R. B., Sandberg, I., Papadimitriou, C., & Evans, H. D. R. (2017). Extreme relativistic electron fluxes in the Earth's outer radiation belt: Analysis of INTEGRAL IREM data. *Space Weather*, *15*(7), 917-933. <https://doi.org/10.1002/2017SW001651>
- Meredith, N. P., Horne, R. B., Sicard-Piet, A., Boscher, D., Yearby, K. H., Li, W., & Thorne, R. M. (2012). Global model of lower band and upper band chorus from multiple satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *117*(A10), 2012JA017978. <https://doi.org/10.1029/2012JA017978>

- Millan, R., & Thorne, R. (2007). Review of radiation belt relativistic electron losses. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(3), 362-377. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.06.019>
- Morley, S. K., Welling, D. T., & Woodroffe, J. R. (2018). Perturbed Input Ensemble Modeling With the Space Weather Modeling Framework. *Space Weather*, 16(9), 1330-1347. <https://doi.org/10.1029/2018SW002000>
- Mourenas, D., Artemyev, A., Agapitov, O., & Krasnoselskikh, V. (2012). Acceleration of radiation belts electrons by oblique chorus waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A10), 2012JA018041. <https://doi.org/10.1029/2012JA018041>
- Moya, P. S., Pinto, V. A., Sibeck, D. G., Kanekal, S. G., & Baker, D. N. (2017). On the Effect of Geomagnetic Storms on Relativistic Electrons in the Outer Radiation Belt: Van Allen Probes Observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(11). <https://doi.org/10.1002/2017JA024735>
- NASA. (2013). Electron Flux of Radiation Belts Animation.
- Nature. (2014). Seven days: 20–26 June 2014. *Nature*, 510(7506), 448-449. <https://doi.org/10.1038/510448a>
- Newnham, D. A., Espy, P. J., Clilverd, M. A., Rodger, C. J., Seppälä, A., Maxfield, D. J., Hartogh, P., Straub, C., Holmén, K., & Horne, R. B. (2013). Observations of nitric oxide in the Antarctic middle atmosphere during recurrent geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(12), 7874-7885. <https://doi.org/10.1002/2013JA019056>
- Ni, B., Xiang, Z., Gu, X., Shprits, Y. Y., Zhou, C., Zhao, Z., Zhang, X., & Zuo, P. (2016). Dynamic responses of the Earth's radiation belts during periods of solar wind dynamic pressure pulse based on normalized superposed epoch analysis. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(9), 8523-8536. <https://doi.org/10.1002/2016JA023067>
- Panametrics. (1995). Calibration Report for the EPS DOME Sensor Response to Protons (Tech. Rep. No. NXT-CAL-102).
- Pinto, V. A., Bortnik, J., Moya, P. S., Lyons, L. R., Sibeck, D. G., Kanekal, S. G., Spence, H. E., & Baker, D. N. (2020). Radial Response of Outer Radiation Belt Relativistic Electrons During Enhancement Events at Geostationary Orbit. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(5), e2019JA027660. <https://doi.org/10.1029/2019JA027660>
- Pinto, V. A., Kim, H.-J., Lyons, L. R., & Bortnik, J. (2018). Interplanetary Parameters Leading to Relativistic Electron Enhancement and Persistent Depletion Events at Geosynchronous Orbit and Potential for Prediction. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(2), 1134-1145. <https://doi.org/10.1002/2017JA024902>
- Pulkkinen, A., Kuznetsova, M., Ridley, A., Raeder, J., Vapirev, A., Weimer, D., Weigel, R. S., Wiltberger, M., Millward, G., Rastätter, L., Hesse, M., Singer, H. J., & Chulaki, A. (2011). Geospace Environment Modeling 2008–2009 Challenge: Ground magnetic field perturbations. *Space Weather*, 9(2), 2010SW000600. <https://doi.org/10.1029/2010SW000600>
- Rancoita, P., Gervasi, M., Tacconi, M., & Boschini, M. (2024). Adiabatic Invariants.
- Reeves, G. D., McAdams, K. L., Friedel, R. H. W., & O'Brien, T. P. (2003). Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 30(10), 2002GL016513. <https://doi.org/10.1029/2002GL016513>
- Reeves, G. D., Spence, H. E., Henderson, M. G., Morley, S. K., Friedel, R. H. W., Funsten, H. O., Baker, D. N., Kanekal, S. G., Blake, J. B., Fennell, J. F., Claudepierre, S. G., Thorne, R. M., Turner, D. L., Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Larsen, B. A., & Niehof, J. T. (2013). Electron Acceleration in the Heart of the Van Allen Radiation Belts. *Science*, 341(6149), 991-994. <https://doi.org/10.1126/science.1237743>

- Reeves, G. D., Friedel, R. H. W., Larsen, B. A., Skoug, R. M., Funsten, H. O., Claudepierre, S. G., Fennell, J. F., Turner, D. L., Denton, M. H., Spence, H. E., Blake, J. B., & Baker, D. N. (2016). Energy-dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*(1), 397-412. <https://doi.org/10.1002/2015JA021569>
- Ripoll, J.-F., Claudepierre, S. G., Ukhorskiy, A. Y., Colpitts, C., Li, X., Fennell, J. F., & Crabtree, C. (2020). Particle Dynamics in the Earth's Radiation Belts: Review of Current Research and Open Questions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *125*(5), e2019JA026735. <https://doi.org/10.1029/2019JA026735>
- Ripoll, J.-F., Loridan, V., Denton, M. H., Cunningham, G., Reeves, G., Santolík, O., Fennell, J., Turner, D. L., Drozdov, A. Y., Cervantes Villa, J. S., Shprits, Y. Y., Thaller, S. A., Kurth, W. S., Kletzing, C. A., Henderson, M. G., & Ukhorskiy, A. Y. (2019). Observations and Fokker-Planck Simulations of the L-Shell, Energy, and Pitch Angle Structure of Earth's Electron Radiation Belts During Quiet Times. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*(2), 1125-1142. <https://doi.org/10.1029/2018JA026111>
- Ripoll, J.-F., Santolík, O., Reeves, G. D., Kurth, W. S., Denton, M. H., Loridan, V., Thaller, S. A., Kletzing, C. A., & Turner, D. L. (2017). Effects of whistler mode hiss waves in March 2013. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*(7), 7433-7462. <https://doi.org/10.1002/2017JA024139>
- Rodriguez, J. V., Denton, M. H., & Boudouridis, A. (2025). Quantitative Assessment of GOES 8–15 > 0.6 and > 4 MeV Radiation Belt Electron Fluxes. *Space Weather*, *23*(3), e2024SW004228. <https://doi.org/10.1029/2024SW004228>
- Rodriguez, J. V., Krosschell, J. C., & Green, J. C. (2014). Intercalibration of GOES 8–15 solar proton detectors. *Space Weather*, *12*(1), 92-109. <https://doi.org/10.1002/2013SW000996>
- Russell, C. T., Luhmann, J. G., & Strangeway, R. J. (2016). *Space physics*. Cambridge university press.
- Schiller, Q., Tu, W., Ali, A. F., Li, X., Godinez, H. C., Turner, D. L., Morley, S. K., & Henderson, M. G. (2017). Simultaneous event-specific estimates of transport, loss, and source rates for relativistic outer radiation belt electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*(3), 3354-3373. <https://doi.org/10.1002/2016JA023093>
- Schiller, Q., Li, X., Blum, L., Tu, W., Turner, D. L., & Blake, J. B. (2014). A nonstorm time enhancement of relativistic electrons in the outer radiation belt. *Geophysical Research Letters*, *41*(1), 7-12. <https://doi.org/10.1002/2013GL058485>
- Schulz, M., & Lanzerotti, L. J. (1974). *Particle Diffusion in the Radiation Belts* (J. G. Roederer, Ed.; Vol. 7). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-65675-0>
- Shprits, Y., Drozdov, A., & Saikin, A. (2025). Real-Time Radiation Belt Forecast.
- Shprits, Y. Y., Menietti, J. D., Gu, X., Kim, K. C., & Horne, R. B. (2012). Gyroresonant interactions between the radiation belt electrons and whistler mode chorus waves in the radiation environments of Earth, Jupiter, and Saturn: A comparative study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *117*(A11), 2012JA018031. <https://doi.org/10.1029/2012JA018031>
- Shprits, Y. Y., Thorne, R. M., Friedel, R., Reeves, G. D., Fennell, J., Baker, D. N., & Kanekal, S. G. (2006). Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *111*(A11), 2006JA011657. <https://doi.org/10.1029/2006JA011657>
- Shprits, Y. Y., Kellerman, A. C., Drozdov, A. Y., Spence, H. E., Reeves, G. D., & Baker, D. N. (2015). Combined convective and diffusive simulations: VERB-4D comparison with 17 March 2013 Van Allen Probes observations. *Geophysical Research Letters*, *42*(22), 9600-9608. <https://doi.org/10.1002/2015GL065230>

- Sillanpää, I., Ganushkina, N. Y., Dubyagin, S., & Rodriguez, J. V. (2017). Electron Fluxes at Geostationary Orbit From GOES MAGED Data. *Space Weather*, *15*(12), 1602-1614. <https://doi.org/10.1002/2017SW001698>
- Spence, H. E., Reeves, G. D., Baker, D. N., Blake, J. B., Bolton, M., Bourdarie, S., Chan, A. A., Claudepierre, S. G., Clemmons, J. H., Cravens, J. P., Elkington, S. R., Fennell, J. F., Friedel, R. H. W., Funsten, H. O., Goldstein, J., Green, J. C., Guthrie, A., Henderson, M. G., Horne, R. B., ... Thorne, R. M. (2013). Science Goals and Overview of the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma (ECT) Suite on NASA's Van Allen Probes Mission. *Space Science Reviews*, *179*(1-4), 311-336. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-0007-5>
- Spjeldvik, W. N., & Rothwell, P. L. (1985). The Radiation Belts. En *Handbook of Geophysics and the Space Environment* (Jursa, A. S.). Air Force Geophysics Laboratory.
- Su, Z., Xiao, F., Zheng, H., He, Z., Zhu, H., Zhang, M., Shen, C., Wang, Y., Wang, S., Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Hospodarsky, G. B., Spence, H. E., Reeves, G. D., Funsten, H. O., Blake, J. B., & Baker, D. N. (2014). Nonstorm time dynamics of electron radiation belts observed by the Van Allen Probes. *Geophysical Research Letters*, *41*(2), 229-235. <https://doi.org/10.1002/2013GL058912>
- Subbotin, D. A., & Shprits, Y. Y. (2009). Three-dimensional modeling of the radiation belts using the Versatile Electron Radiation Belt (VERB) code. *Space Weather*, *7*(10), 2008SW000452. <https://doi.org/10.1029/2008SW000452>
- Subbotin, D. A., Shprits, Y. Y., & Ni, B. (2011). Long-term radiation belt simulation with the VERB 3-D code: Comparison with CRRES observations: RADIATION BELT SIMULATION WITH VERB 3-D CODE. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *116*(A12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JA017019>
- Subbotin, D., Shprits, Y., & Ni, B. (2010). Three-dimensional VERB radiation belt simulations including mixed diffusion. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *115*(A3), 2009JA015070. <https://doi.org/10.1029/2009JA015070>
- Summers, D., Ni, B., & Meredith, N. P. (2007). Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *112*(A4), 2006JA011993. <https://doi.org/10.1029/2006JA011993>
- Thorne, R. M., Li, W., Ni, B., Ma, Q., Bortnik, J., Chen, L., Baker, D. N., Spence, H. E., Reeves, G. D., Henderson, M. G., Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Hospodarsky, G. B., Blake, J. B., Fennell, J. F., Claudepierre, S. G., & Kanekal, S. G. (2013). Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus. *Nature*, *504*(7480), 411-414. <https://doi.org/10.1038/nature12889>
- Thorne, R. M. (2010). Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions. *Geophysical Research Letters*, *37*(22), 2010GL044990. <https://doi.org/10.1029/2010GL044990>
- Tsyganenko, N. A., & Sitnov, M. I. (2005). Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *110*(A3), 2004JA010798. <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>
- Tu, W., Cunningham, G. S., Chen, Y., Henderson, M. G., Camporeale, E., & Reeves, G. D. (2013). Modeling radiation belt electron dynamics during GEM challenge intervals with the DREAM3D diffusion model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *118*(10), 6197-6211. <https://doi.org/10.1002/jgra.50560>
- Tu, W., Cunningham, G. S., Chen, Y., Morley, S. K., Reeves, G. D., Blake, J. B., Baker, D. N., & Spence, H. (2014). Event-specific chorus wave and electron seed population models in

- DREAM3D using the Van Allen Probes. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1359-1366. <https://doi.org/10.1002/2013GL058819>
- Turner, D. L., Angelopoulos, V., Li, W., Bortnik, J., Ni, B., Ma, Q., Thorne, R. M., Morley, S. K., Henderson, M. G., Reeves, G. D., Usanova, M., Mann, I. R., Claudepierre, S. G., Blake, J. B., Baker, D. N., Huang, C.-L., Spence, H., Kurth, W., Kletzing, C., & Rodriguez, J. V. (2014). Competing source and loss mechanisms due to wave-particle interactions in Earth's outer radiation belt during the 30 September to 3 October 2012 geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(3), 1960-1979. <https://doi.org/10.1002/2014JA019770>
- Turner, D. L., Kilpua, E. K. J., Hietala, H., Claudepierre, S. G., O'Brien, T. P., Fennell, J. F., Blake, J. B., Jaynes, A. N., Kanekal, S., Baker, D. N., Spence, H. E., Ripoll, J.-F., & Reeves, G. D. (2019). The Response of Earth's Electron Radiation Belts to Geomagnetic Storms: Statistics From the Van Allen Probes Era Including Effects From Different Storm Drivers. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(2), 1013-1034. <https://doi.org/10.1029/2018JA026066>
- Turner, D. L., O'Brien, T. P., Fennell, J. F., Claudepierre, S. G., Blake, J. B., Kilpua, E. K. J., & Hietala, H. (2015). The effects of geomagnetic storms on electrons in Earth's radiation belts. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9176-9184. <https://doi.org/10.1002/2015GL064747>
- Turner, D. L., & Ukhorskiy, A. Y. (2020). Outer radiation belt losses by magnetopause incursions and outward radial transport: New insight and outstanding questions from the Van Allen Probes era. En *The Dynamic Loss of Earth's Radiation Belts* (pp. 1-28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813371-2.00001-9>
- Turunen, E., Kero, A., Verronen, P. T., Miyoshi, Y., Oyama, S.-I., & Saito, S. (2016). Mesospheric ozone destruction by high-energy electron precipitation associated with pulsating aurora. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19). <https://doi.org/10.1002/2016JD025015>
- Usanova, M. E., Drozdov, A., Orlova, K., Mann, I. R., Shprits, Y., Robertson, M. T., Turner, D. L., Milling, D. K., Kale, A., Baker, D. N., Thaller, S. A., Reeves, G. D., Spence, H. E., Kletzing, C., & Wygant, J. (2014). Effect of EMIC waves on relativistic and ultrarelativistic electron populations: Ground-based and Van Allen Probes observations. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1375-1381. <https://doi.org/10.1002/2013GL059024>
- Van Allen, J. A., Ludwig, G. H., Ray, E. C., & McILWAIN, C. E. (1958). Observation of High Intensity Radiation by Satellites 1958 Alpha and Gamma. *Journal of Jet Propulsion*, 28(9), 588-592. <https://doi.org/10.2514/8.7396>
- Vernov, S. N., & Chudakov, A. E. (1960). Investigations of Cosmic Radiation and of the Terrestrial Corpuscular Radiation by Means of Rockets and Satellites. *Soviet Physics Uspekhi*, 3(2), 230-250. <https://doi.org/10.1070/PU1960v003n02ABEH003269>
- Wang, D., & Shprits, Y. Y. (2019). On How High-Latitude Chorus Waves Tip the Balance Between Acceleration and Loss of Relativistic Electrons. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 7945-7954. <https://doi.org/10.1029/2019GL082681>
- Zhang, K., Li, X., Zhao, H., Xiang, Z., Khoo, L. Y., Zhang, W., Hogan, B., & Temerin, M. A. (2021). Upper Limit of Electron Fluxes Observed in the Radiation Belts. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(1), 2020JA028511. <https://doi.org/10.1029/2020JA028511>
- Zhao, H., Baker, D. N., Li, X., Jaynes, A. N., & Kanekal, S. G. (2019). The Effects of Geomagnetic Storms and Solar Wind Conditions on the Ultrarelativistic Electron Flux Enhancements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(3), 1948-1965. <https://doi.org/10.1029/2018JA026257>