

ALERTAS DE METEOROLOGÍA ESPACIAL PARA LA
NAVEGACIÓN AÉREA

SERGIO ALFONSO PINILLA VELANDIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2015

ALERTAS DE METEOROLOGÍA ESPACIAL PARA LA
NAVEGACIÓN AÉREA

SERGIO ALFONSO PINILLA VELANDIA

Trabajo de Grado para optar al título de
Físico

Director
Ph.D. LUIS ALBERTO NÚÑEZ

Co-Director
Ph.D. HERNÁN GONZALO ASOREY

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2015

Agradecimientos

No son pocas las personas sin las cuales este trabajo hubiera sido imposible de llevar a feliz término. En primer lugar, doy gracias a mis padres por su apoyo incondicional, por su confianza así como por su valioso ejemplo de esfuerzo y sencillez. A mis hermanas por su constante motivación y sus sabios consejos. Agradezco a los profesores Hernán y Luis, cuyo papel en este proceso ciertamente trasciende el de simples asesores, gracias por sus respuestas ante mis dudas así como por las nuevas dudas, por contribuir a mi formación como investigador y como persona y lo más valioso, por demostrar que esta carrera más que una profesión es un estilo de vida en el que es fundamental sentir gusto por lo que se hace. Doy gracias a los compañeros del Halley por permitirme ser parte de esa gran familia, por su colaboración, amistad y por tantas conversaciones estimulantes alrededor de un buen café.

Muchas gracias.

Índice general

Introducción	20
1. Rayos cósmicos	23
1.1. Historia de la investigación en rayos cósmicos	23
1.2. El espectro de rayos cósmicos	26
1.3. Lluvias atmosféricas extendidas	30
1.4. Efecto atmosférico en la propagación de rayos cósmicos	32
1.5. Campo geomagnético	34
1.5.1. Campo magnético de origen interno	35
1.5.2. Campo magnético de origen externo	37
1.6. Índice DST	39
1.7. Modelos de campo geomagnético	40
1.8. Propagación de rayos cósmicos en el campo geomagnético	42
1.8.1. Rigidez de una partícula	43
1.9. Magnetocosmics	46
1.10. CORSIKA	47
2. Consideraciones generales sobre los cálculos	49

2.1.	Selección de las trayectorias y obtención de los datos	49
2.2.	Simulación de las lluvias	55
2.3.	Cálculo de rigideces de corte y filtrado	57
2.4.	Intensidad de muones como validación de las simulaciones	60
2.5.	Aproximaciones en las simulaciones de las lluvias	62
3.	Resultados	66
3.1.	Estudio del efecto geomagnético	66
3.1.1.	Efecto geomagnético sobre la ruta Bogotá - Buenos Aires	68
3.1.2.	Efecto geomagnético sobre la ruta Buenos Aires - Madrid	70
3.1.3.	Efecto geomagnético sobre la ruta Johannesburgo - Sydney	73
3.1.4.	Efecto geomagnético sobre la ruta Nueva York - Tokyo	75
3.1.5.	Efecto geomagnético sobre la ruta Sao Paulo - Johannesburgo	78
3.1.6.	Comparación del efecto geomagnético en las distintas trayectorias . . .	80
3.2.	Cálculo comparativo del flujo	81
3.2.1.	Ruta Bogotá - Buenos Aires	82
3.2.2.	Ruta Buenos Aires - Madrid	85
3.2.3.	Ruta Johannesburgo - Sydney	87
3.2.4.	Ruta Nueva York - Tokyo	90
3.2.5.	Ruta Sao Paulo - Johannesburgo	92
3.2.6.	Comparación de los resultados obtenidos para diferentes trayectorias . .	95
3.3.	Discusión de resultados	96
4.	Conclusiones	100

A. Porcentaje de partículas filtradas por corrección geomagnética	102
A.1. Ruta Bogotá - Buenos Aires	102
A.2. Ruta Buenos Aires - Madrid	104
A.3. Ruta Johannesburgo - Sydney	105
A.4. Ruta Nueva York - Tokyo	106
A.5. Ruta Sao Paulo - Johannesburgo	108
 Bibliografía	 110

Índice de figuras

1.1. Variación de la ionización con la altura según los resultados de los experimentos de Hess y Kolhörster.	25
1.2. Espectro de energía de los rayos cósmicos generado con datos obtenidos por varios observatorios.	27
1.3. Lluvias atmosféricas extendidas.	32
1.4. Perfil de temperatura de la atmósfera en función de la altitud.	34
1.5. Componentes del campo geomagnético.	35
1.6. Esquema de la sección transversal de la magnetosfera, la cual muestra varias regiones de interacción del campo geomagnético con el viento solar.	38
1.7. Sistemas de corrientes en la magnetosfera.	38
1.8. Clasificación de las tormentas geomagnéticas.	40
1.9. Comparación entre modelo dipolar de campo geomagnético y el IGRF 2010. . .	41
1.10. Comparación entre el modelo de Tsyganenko 2001 y el IGRF 2010.	42
1.11. Relación espacial entre el cono de Störmer, la penumbra y el cono permitido. .	44
1.12. Función de transmitancia para la ubicación del Monitor de neutrones Newark cuando la dirección de incidencia es vertical.	45
1.13. Rigidez de corte efectiva de incidencia vertical en todo el plano de la Tierra. . .	46
1.14. Sistema de coordenadas en CORSIKA.	48

2.1. Rutas de vuelo seleccionadas.	50
2.2. Distribución angular de los muones para la simulación de lluvias en Bucaramanga.	61
2.3. Distribución angular de los muones para la simulación de lluvias genérica de las trayectorias.	62
3.1. Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Bogotá - Buenos Aires	68
3.2. Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Bogotá - Buenos Aires.	68
3.3. Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Bogotá - Buenos Aires	70
3.4. Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Buenos Aires - Madrid	70
3.5. Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Buenos Aires - Madrid.	71
3.6. Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Buenos Aires - Madrid	72
3.7. Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Johannesburgo - Sydney	73
3.8. Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Johannesburgo - Sydney.	73
3.9. Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Johannesburgo - Sydney	75
3.10. Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Nueva York - Tokyo	75
3.11. Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Nueva York - Tokyo.	76

3.12. Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Nueva York - Tokyo	77
3.13. Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo . . .	78
3.14. Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo.	78
3.15. Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo	80
3.16. Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares y de tormenta para la trayectoria Bogotá - Buenos Aires.	84
3.17. Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Bogotá - Buenos Aires.	84
3.18. Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares y de tormenta para la trayectoria Buenos Aires - Madrid.	86
3.19. Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Buenos Aires - Madrid.	87
3.20. Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares y de tormenta para la trayectoria Johannesburgo - Sydney.	89
3.21. Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Johannesburgo - Sydney.	89
3.22. Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares y de tormenta para la trayectoria Nueva York - Tokyo.	91
3.23. Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Nueva York - Tokyo.	92
3.24. Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares y de tormenta para la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo.	94
3.25. Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo.	94

A.1. Diferencia relativa porcentual de γ en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	102
A.2. Diferencia relativa porcentual de e^+ en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	102
A.3. Diferencia relativa porcentual de e^- en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	103
A.4. Diferencia relativa porcentual de μ^+ en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	103
A.5. Diferencia relativa porcentual de μ^- en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	103
A.6. Diferencia relativa porcentual de n^0 en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	103
A.7. Diferencia relativa porcentual de p^+ en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	103
A.8. Diferencia relativa porcentual de otras partículas en la ruta Bogotá - Buenos Aires.	103
A.9. Diferencia relativa porcentual de γ en la ruta Buenos Aires - Madrid.	104
A.10. Diferencia relativa porcentual de e^+ en la ruta Buenos Aires - Madrid.	104
A.11. Diferencia relativa porcentual de e^- en la ruta Buenos Aires - Madrid.	104
A.12. Diferencia relativa porcentual de μ^+ en la ruta Buenos Aires - Madrid.	104
A.13. Diferencia relativa porcentual de μ^- en la ruta Buenos Aires - Madrid.	104
A.14. Diferencia relativa porcentual de n^0 en la ruta Buenos Aires - Madrid.	104
A.15. Diferencia relativa porcentual de p^+ en la ruta Buenos Aires - Madrid.	105
A.16. Diferencia relativa porcentual de otras partículas en la ruta Buenos Aires - Madrid.	105
A.17. Diferencia relativa porcentual de γ en la ruta Johannesburgo - Sydney.	105
A.18. Diferencia relativa porcentual de e^+ en la ruta Johannesburgo - Sydney.	105
A.19. Diferencia relativa porcentual de e^- en la ruta Johannesburgo - Sydney.	105
A.20. Diferencia relativa porcentual de μ^+ en la ruta Johannesburgo - Sydney.	105
A.21. Diferencia relativa porcentual de μ^- en la ruta Johannesburgo - Sydney.	106
A.22. Diferencia relativa porcentual de n^0 en la ruta Johannesburgo - Sydney.	106

A.23.Diferencia relativa porcentual de p^+ en la ruta Johannesburgo - Sydney.	106
A.24.Diferencia relativa porcentual de otras partículas en la ruta Johannesburgo - Sydney.	106
A.25.Diferencia relativa porcentual de γ en la ruta Nueva York - Tokyo.	106
A.26.Diferencia relativa porcentual de e^+ en la ruta Nueva York - Tokyo.	106
A.27.Diferencia relativa porcentual de e^- en la ruta Nueva York - Tokyo.	107
A.28.Diferencia relativa porcentual de μ^+ en la ruta Nueva York - Tokyo.	107
A.29.Diferencia relativa porcentual de μ^- en la ruta Nueva York - Tokyo.	107
A.30.Diferencia relativa porcentual de n^0 en la ruta Nueva York - Tokyo.	107
A.31.Diferencia relativa porcentual de p^+ en la ruta Nueva York - Tokyo.	107
A.32.Diferencia relativa porcentual de otras partículas en la ruta Nueva York - Tokyo.	107
A.33.Diferencia relativa porcentual de γ en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . . .	108
A.34.Diferencia relativa porcentual de e^+ en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . .	108
A.35.Diferencia relativa porcentual de e^- en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . .	108
A.36.Diferencia relativa porcentual de μ^+ en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . .	108
A.37.Diferencia relativa porcentual de μ^- en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . .	108
A.38.Diferencia relativa porcentual de n^0 en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . .	108
A.39.Diferencia relativa porcentual de p^+ en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo. . .	109
A.40.Diferencia relativa porcentual de otras partículas en la ruta Sao Paulo - Johannesburgo.	109

Índice de tablas

1.1. Índice espectral α e intensidad espectral j_0 (normalizada para $E=1\text{TeV}$) de los elementos desde el 1H hasta el ^{28}Ni	29
1.2. Composición de la atmósfera a temperatura y presión estándar (273.16 K y 760 mm Hg).	33
1.3. Descripción de las componentes de campo geomagnético.	36
2.1. Los cinco vuelos investigados y sus duraciones.	51
2.2. Puntos característicos seleccionados para el vuelo Bogotá - Buenos Aires. . . .	51
2.3. Puntos característicos seleccionados para el vuelo Buenos Aires - Madrid. . . .	52
2.4. Puntos característicos seleccionados para el vuelo Johannesburgo - Sydney. . . .	53
2.5. Puntos característicos seleccionados para el vuelo Nueva York - Tokyo.	54
2.6. Puntos característicos seleccionados para el vuelo Sao Paulo - Johannesburgo. . .	55
2.7. Comparación de distintos tipos de modelos atmosféricos.	64
2.8. Diferencia relativa porcentual entre el número de partículas obtenido en la simulación en un punto de la ruta Johannesburgo Sydney y el obtenido en la simulación genérica de las trayectorias.	64
2.9. Diferencia relativa porcentual entre el número de partículas obtenido en la simulación en un punto de la ruta Nueva York - Tokyo y el obtenido en la simulación genérica de las trayectorias.	65
3.1. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Bogotá - Buenos Aires en condiciones seculares.	69

3.2. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Bogotá - Buenos Aires en condiciones de tormenta.	69
3.3. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Buenos Aires - Madrid en condiciones seculares.	71
3.4. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Buenos Aires - Madrid en condiciones de tormenta.	72
3.5. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Johannesburgo - Sydney en condiciones seculares.	74
3.6. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Johannesburgo - Sydney en condiciones de tormenta.	74
3.7. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Nueva York - Tokyo en condiciones seculares.	76
3.8. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Nueva York - Tokyo en condiciones de tormenta.	77
3.9. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones seculares.	79
3.10. Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones de tormenta.	79
3.11. Comparación para las distintas trayectorias del porcentaje de partículas descartadas $\%D_N$ debido al efecto geomagnético en condiciones seculares.	80
3.12. Comparación para las distintas trayectorias del porcentaje de partículas descartadas $\%D_N$ debido al efecto geomagnético en condiciones de tormenta.	81
3.13. Flujo de secundarios en la trayectoria Bogotá - Buenos Aires en condiciones seculares y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	82
3.14. Flujo de secundarios en la trayectoria Bogotá - Buenos Aires en condiciones de tormenta y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	83
3.15. Flujo de secundarios en la trayectoria Buenos Aires - Madrid en condiciones seculares y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	85
3.16. Flujo de secundarios en la trayectoria Buenos Aires - Madrid en condiciones de tormenta y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	85

3.17. Flujo de secundarios en la trayectoria Johannesburgo - Sydney en condiciones seculares y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	87
3.18. Flujo de secundarios en la trayectoria Johannesburgo - Sydney en condiciones de tormenta y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	88
3.19. Flujo de secundarios en la trayectoria Nueva York - Tokyo en condiciones se- culares y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	90
3.20. Flujo de secundarios en la trayectoria Nueva York - Tokyo en condiciones de tormenta y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	90
3.21. Flujo de secundarios en la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones seculares y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	92
3.22. Flujo de secundarios en la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones de tormenta y su comparación con el flujo en Bucaramanga.	93
3.23. Comparación para las distintas trayectorias del incremento relativo d_N en con- diciones seculares.	95
3.24. Comparación para las distintas trayectorias del incremento relativo d_N en con- diciones de tormenta.	95
3.25. Comparación para las distintas trayectorias de la diferencia relativa porcentual %n entre la cantidad de partículas que inciden en condiciones seculares y de tormenta.	96

RESUMEN

TÍTULO: ALERTAS DE METEOROLOGÍA ESPACIAL PARA LA NAVEGACIÓN AÉREA¹.

AUTOR: PINILLA VELANDIA, Sergio Alfonso².

PALABRAS CLAVES: Vuelos comerciales, Rayos cósmicos, Lluvias atmosféricas extendidas.

DESCRIPCIÓN:

El propósito de este trabajo fue estimar la cantidad de partículas que inciden en una aeronave comercial a lo largo de cinco trayectorias de vuelo internacionales tanto en condiciones seculares como de tormenta geomagnética. Se utilizó el código CORSIKA para simular las cascadas de partículas que se originan por la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera terrestre y el código Magnetocosmics para cuantificar el efecto del campo geomagnético sobre dichas partículas. En general, se encontró que para mayores latitudes, las rigideces de corte eran menores y por tanto el flujo de partículas era mayor. En el caso de las rutas cercanas a los polos, Nueva York – Tokio y Sao Paulo – Johannesburgo, se obtuvo que el flujo del total de partículas era ochenta veces mayor que en Bucaramanga a nivel del suelo; para las rutas que atraviesan latitudes medias, Bogotá – Buenos Aires y Buenos Aires – Madrid, este flujo fue cincuenta veces mayor; y para la ruta Johannesburgo – Sydney, que atraviesa la anomalía del Atlántico Sur, dicho flujo fue sesenta veces mayor. Se observó un aumento importante en el flujo de neutrones para las rutas cercanas a los polos, siendo dicho flujo trescientas ochenta veces superior que en Bucaramanga a nivel del suelo. Bajo los parámetros considerados en este trabajo, no se observaron diferencias significativas entre los resultados obtenidos para condiciones seculares y de tormenta geomagnética.

¹Trabajo de grado.

²Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis Alberto Núñez (Director), Hernán Gonzalo Asorey (Co-Director).

ABSTRACT

TITLE: SPACE WEATHER ALERTS FOR AIR NAVIGATION³.

AUTHOR: PINILLA VELANDIA, Sergio Alfonso⁴.

KEYWORDS: Commercial flights, Cosmic rays, Extensive air showers.

DESCRIPTION:

The aim of this work was to estimate the amount of particles incident on a commercial aircraft along five international flight trajectories, both during secular conditions of the geomagnetic field and during the occurrence of a geomagnetic storm. We used the code CORSIKA in order to simulate the particle showers produced by cosmic rays interacting with Earth's atmosphere and the code Magnetocosmics to calculate the geomagnetic effect over these particles. On overall, we found that for greater latitude, rigidity cut-off was lower so the particle flux was greater. In case of near-polar routes, such as New York – Tokyo and Sao Paulo – Johannesburg, the obtained total particle flux was eighty times greater than in Bucaramanga at sea level; for mid-latitude trajectories, such as Bogotá - Buenos Aires and Buenos Aires – Madrid, this flux was fifty times greater; and for Johannesburg – Sydney, that goes through the South Atlantic Anomaly, this flux was sixty times greater. We observed an important increase in the neutron flux along near-poles trajectories: this flux was three hundred eighty times greater than in Bucaramanga at sea level. Under the parameters considered in this work, we did not observe significant differences between the results obtained during secular conditions of the geomagnetic field and during a storm.

³Bachelor thesis.

⁴Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis Alberto Núñez (Advisor), Hernán Gonzalo Asorey (Co-Advisor).

Introducción

Diversos estudios han reportado una mayor incidencia de cáncer en las tripulaciones de vuelo (pilotos, copilotos, auxiliares de vuelo) en comparación con el resto de la población asociando este fenómeno con factores ocupacionales. Por ejemplo, en [1] se concluye que «Pilotos y tripulación de cabina tienen aproximadamente el doble de incidencia de melanoma⁵ comparado con la población general». Otros estudios sugieren que el riesgo de cáncer de seno se incrementa en las tripulantes de cabina incluso en un 40 % [2, 3]. También, por el contrario, otros artículos no son concluyentes al respecto al no encontrar evidencia que vincule factores ocupacionales con el riesgo de contraer cáncer [4, 5, 6]. Entre los posibles factores de riesgo ocupacionales que fueron estudiados en los trabajos anteriores se encuentra la exposición de las tripulaciones de vuelo a altas dosis de rayos cósmicos, lo cual es de especial interés en esta tesis. Otros factores incluyen la interrupción del ciclo circadiano y la exposición a radiación UV; sin embargo la causa del aumento de la incidencia de esta enfermedad en este gremio no ha sido establecida con claridad por ninguno de los estudios. Uno de los principales componentes de la radiación cósmica a la altura de vuelo de los aviones son los neutrones, los cuales son considerados por la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer (IARC por sus siglas en inglés) como carcinógenos en los humanos [7]. Cabe decir que la población afectada aumenta si se considera viajeros frecuentes y astronautas.

Para la mayoría de miembros de las tripulaciones aéreas, se estima que la exposición anual a radiaciones ionizantes⁶ es de 1 mSv⁷ a 6 mSv, lo cual es comparable con la radiación de fondo anual de aproximadamente 2.4 mSv [8]. Sin embargo, para rutas polares como Nueva York - Hong Kong, la dosis recibida en un solo viaje puede llegar a 0.1 mSv en condiciones normales⁸ y en el caso de tormenta geomagnética esta sería mucho mayor; de manera que los viajeros y las tripulaciones que cubren frecuentemente estas rutas podrían estar recibiendo más radiación

⁵El melanoma es un tipo de cáncer de piel que aparece cuando las células llamadas melanocitos se convierten en malignas. Estas células elaboran un pigmento llamado melanina, responsable del color de la piel, del pelo y del iris de los ojos. La melanina, por su parte, funciona como un fotoprotector evitando que la radiación solar dañe las estructuras o los tejidos del cuerpo. Tomado de <http://www.dmedicina.com>

⁶Las radiaciones ionizantes son aquellas radiaciones con energía suficiente para ionizar la materia, extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo. El daño que causa esta radiación en los órganos y tejidos depende de la dosis recibida.

⁷El sievert (símbolo Sv) es una unidad derivada del SI que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los posibles efectos biológicos producidos. 1 Sv equivale a 1 J kg⁻¹. Tomado de <https://es.wikipedia.org>

⁸Ver http://www.nytimes.com/2001/05/24/news/24iht-radiate_ed3__0.html?pagewanted=all

de la recomendada. La Comisión Internacional para la protección radiológica (ICRP por sus siglas en inglés) recomienda un máximo de 1 mSv anual (adicional a la radiación de fondo) para el público general y un máximo de 20 mSv anuales para las personas ocupacionalmente expuestas [9]. Algunos países han adoptado las recomendaciones de la ICRP creando leyes que protegen a los miembros de las tripulaciones de vuelo de radiaciones ionizantes. La Unión Europea, que ciertamente lidera en legislaciones de este tipo, reglamenta en sus Directivas que las aerolíneas deben hacer mediciones de la radiación a la que se exponen sus empleados, reubicar a los miembros de las tripulaciones que se vean expuestos a altas dosis de radiaciones ionizantes, educar a sus empleados sobre los riesgos para la salud y dar protección especial a las empleadas que declaren estar en embarazo, entre otras directrices [10].

El hecho de que no haya un consenso en las investigaciones mencionadas anteriormente y en especial, la incertidumbre para determinar si los rayos cósmicos a la altura de vuelo de los aviones son un factor de riesgo, tiene que ver con varias razones. Además del tipo de muestra estadística utilizada en cada investigación, entre estas razones se puede mencionar la dificultad de hacer mediciones directas de incidencia de rayos cósmicos a grandes alturas y el corto tiempo que este asunto lleva siendo objeto de investigación. El riesgo de cáncer en las tripulaciones de vuelo ha sido investigado tan solo desde los años noventa y en general hasta hace poco está empezando a llamar la atención de los gobiernos. Solo en la Unión Europea las aerolíneas deben llevar registro de la radiación que reciben aquellos empleados cuya exposición sea superior a 1 mSv y esto desde 1996; de manera que no hay datos de dosimetría para fechas anteriores a esa época y los que hay actualmente son muy limitados. Además, la mayoría de estudios que se han hecho hasta ahora trabajan solo con las aerolíneas de sus países de origen de manera que su poder estadístico es bajo. El inconveniente de la ausencia de mediciones directas se ha sorteado con el uso de códigos computacionales que hacen un estimado de la dosis recibida en cada vuelo. Sin embargo, el Grupo Europeo de Dosimetría de Radiación (EURADOS por sus siglas en inglés) realizó una comparación de las dosis calculadas por once de estos códigos y en algunos casos los resultados difieren entre sí hasta un 80 % [11].

En esta tesis se propone un método computacional para calcular la cantidad de partículas que inciden a lo largo de distintas trayectorias de vuelo. La selección de estas trayectorias está basada en la frecuencia de utilización y la ocurrencia de efectos geomagnéticos a lo largo de ellas, por ejemplo rutas que atraviesen la anomalía del Atlántico Sur o los polos. A diferencia de los códigos reportados en [11], el método propuesto en este trabajo utiliza un programa de simulación muy detallado de las lluvias producidas por rayos cósmicos y describe el efecto geomagnético con una resolución muy alta. Con el fin de estudiar el fondo de radiación durante un vuelo y su modulación por efectos como la altitud, latitud, tiempo de exposición y eventos solares, se hacen simulaciones basadas en los códigos *Magnetocosmics* [12] y *CORSIKA* [13]. *Magnetocosmics* es un código basado en Geant4 que permite calcular los efectos geomagnéticos en la propagación de rayos cósmicos a través de la magnetósfera utilizando diferentes modelos de campo y bajo diferentes condiciones magnetosféricas. *CORSIKA* es un programa de simulación muy detallado del desarrollo de la cascada de partículas secundarias producida durante la interacción de un rayo cósmico con la atmósfera.

Para determinar el límite inferior de la energía de los primarios inyectados en la atmósfera su-

perior, es necesario considerar los efectos introducidos por la magnetósfera tanto en situación secular como durante la ocurrencia de fenómenos transitorios como una tormenta geomagnética o la llegada de una eyección de masa coronal; esto se modela usando *magnetocosmics*. Para el límite superior se toma $E_{\text{máx}} = 1$ PeV, ya que, como se menciona en la sección 1.2, a esa energía el flujo es tan bajo que la probabilidad de encontrar un primario de mayor energía es prácticamente despreciable para la duración de un vuelo comercial. Para considerar diferentes eventos magnetosféricos en las simulaciones, se varía el índice DST (*Disturbance Storm Index*), el cual da información sobre la intensidad del anillo de corriente alrededor de la Tierra causado por protones y electrones capturados. Con el desarrollo de este trabajo, se logró obtener el flujo integrado de partículas para todas las trayectorias seleccionadas, siendo posible una discriminación por energías y tipo de partículas; asimismo fue posible hacer una caracterización geomagnética detallada de cada una de las rutas. Con las simulaciones realizadas, se comprobó que el blindaje geomagnético es mucho menor en los polos que en las latitudes medias, siendo el flujo de partículas 80 veces mayor en las trayectorias cercanas a los polos comparado con el flujo en Bucaramanga y 50 veces mayor para el caso de las rutas que atraviesan latitudes medias. En el caso de la tormenta geomagnética estudiada, se comprobó que el flujo de partículas era ligeramente mayor para todas las trayectorias de vuelo seleccionadas.

Este trabajo está organizado en 6 capítulos de la siguiente manera: en el capítulo ?? se da una breve descripción del estado actual de la investigación de los efectos del flujo de partículas a la altura de vuelo de los aviones y sus motivaciones; en el capítulo 1 se presenta la teoría de los rayos cósmicos y su interacción con la atmósfera y el campo geomagnético, teoría necesaria para comprender los resultados de este trabajo; en el capítulo 2 se dan detalles sobre las simulaciones realizadas y las aproximaciones utilizadas; en el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las trayectorias, mostrando independientemente el efecto geomagnético sobre las partículas, la comparación del flujo de las trayectorias con el flujo en Bucaramanga y la discusión de estos resultados; finalmente, en el capítulo 4 se muestran las conclusiones de esta tesis.

Capítulo 1

Rayos cósmicos

1.1. Historia de la investigación en rayos cósmicos

La historia de los rayos cósmicos es una historia apasionante que nació de la obsesión por entender un fenómeno aparentemente simple: la descarga espontánea de los electroskopios. Es una historia llena de aventuras en la cual los científicos de la primera mitad del siglo XX fueron a las montañas más altas, viajaron en barco y en globo, hicieron experimentos bajo el agua y bajo el suelo, movidos solamente por la curiosidad de entender la naturaleza de esta misteriosa radiación penetrante y sin imaginar que estaban estudiando uno de los temas de mayor impacto en la física del siglo pasado en lo que respecta a la comprensión de la estructura de la materia, del origen del universo y su evolución. Una dificultad que tuvo la investigación pionera en rayos cósmicos fue que se desarrolló en la época de las dos guerras mundiales, un período caracterizado por el nacionalismo y la falta de comunicación (ver, por ejemplo [14]).

El fenómeno clave que condujo al descubrimiento de los rayos cósmicos fue la descarga espontánea de un electroskopo. Este fenómeno fue conocido desde 1785 por Charles-Augustin de Coulomb, quien observó que la causa de la descarga era el aire y no un aislamiento defectuoso del instrumento. La radioactividad espontánea¹ fue descubierta en 1896 por Becquerel. Un par de años después, los esposos Marie y Pierre Curie descubrieron los elementos Radio y Polonio y que los núcleos de estos sufrían transformaciones generando radioactividad en procesos conocidos como decaimientos radiactivos. En presencia de un material radioactivo, un electroskopo cargado inmediatamente se descarga. Se concluyó que algunos elementos eran capaces de emitir partículas cargadas, las cuales causaban la descarga de los electroskopios. La tasa de descarga fue entonces utilizada para medir el nivel de radioactividad.

El electroskopo era un instrumento delicado, difícil de transportar: se necesitaba una mejora técnica para realizar las mediciones más fácilmente. Esta mejora la introdujo el Padre jesuita

¹Fenómeno por el cual los núcleos de algunos elementos químicos emiten partículas como resultado de inestabilidad nuclear

T. Wulf, quien diseñó y construyó la cámara de ionización, un dispositivo más sensible y más robusto que el electroscoPIO normal de hojas de oro. Esperando que el grado de ionización disminuyese al aumentar la altura sobre la superficie terrestre, principal fuente de materiales radiactivos, Wulf experimentó llevando su invento a la cima de la Torre Eiffel (300 m.s.n.m), pero los resultados obtenidos no fueron concluyentes: la tasa de ionización mostró una disminución demasiado pequeña para confirmar esta hipótesis. Las observaciones de Wulf fueron de gran valor, porque pudo tomar datos en diferentes horas del día y durante muchos días en el mismo lugar. Por bastante tiempo, los datos de Wulf fueron considerados como la fuente de información más confiable sobre el efecto de la altitud en la radiación penetrante. Sin embargo y a pesar de sus resultados, él todavía consideraba que la explicación más probable era la emisión de la corteza terrestre.

La conclusión de que la radiactividad provenía principalmente de la corteza terrestre fue cuestionada por el físico italiano Domenico Pacini (1878 - 1934), quien desarrolló una técnica experimental para mediciones por debajo del agua. Pacini tomó medidas ubicando el electroscoPIO tres metros bajo el agua, primero en el mar del golfo de Genova, y luego en el Lago de Bracciano. Comparando con las medidas hechas en superficie, encontró una disminución significativa en la tasa de descarga, lo cual lo llevó a concluir que debía haber una fuente adicional a la radiactividad natural, probablemente de origen extraterrestre. El trabajo de Pacini fue crucial en la determinación del origen de esta radiación penetrante y sin embargo su contribución desapareció sustancialmente de la historia de la ciencia debido a distintos motivos históricos, políticos y personales [15].

Todo el asunto se resolvió gracias a una serie de vuelos en globo realizados por el físico austriaco Victor Hess, quien estableció el origen extraterrestre de al menos parte de la radiación causante de la ionización observada. En 1912 Hess realizó un experimento pionero que consistió en medir la tasa de ionización como función de la altitud hasta los 5000 m s.n.m., durante 10 vuelos en globos aerostáticos realizados en distintos momentos. Los resultados obtenidos claramente mostraban que la ionización, después de pasar por un mínimo, incrementaba considerablemente con la altura (ver figura 1.1): *"(i) Inmediatamente por encima del suelo la radiación total disminuye un poco. (ii) A alturas de 1000 a 2000 m ocurre de nuevo un crecimiento notable de radiación penetrante. (iii) Dicho aumento alcanza, a alturas de 3000 a 4000 m, cerca de un 50 % de la radiación total observada en el suelo. (iv) A alturas de 4000 a 5200 m la radiación es más fuerte (más del 100 %) que en el suelo"*[16].

Hess concluyó que el incremento de la ionización con la altura debía deberse a una radiación muy penetrante de origen extraterrestre que ingresaba desde arriba a la atmósfera. Uno de los vuelos de Hess coincidió con un eclipse total de Sol, pero no observó diferencias respecto a los otros vuelos. Esto sumado al hecho de no encontrar variación día / noche en sus resultados, le permitió excluir al Sol como fuente directa de la hipotética radiación extraterrestre. El desarrollo de este trabajo le valió a Hess el premio Nobel de Física en 1936. Estos resultados fueron confirmados posteriormente por Kolhóster en una serie de vuelos por arriba de los 9200 m: encontró un incremento en la ionización de más de diez veces comparado con el nivel del mar.

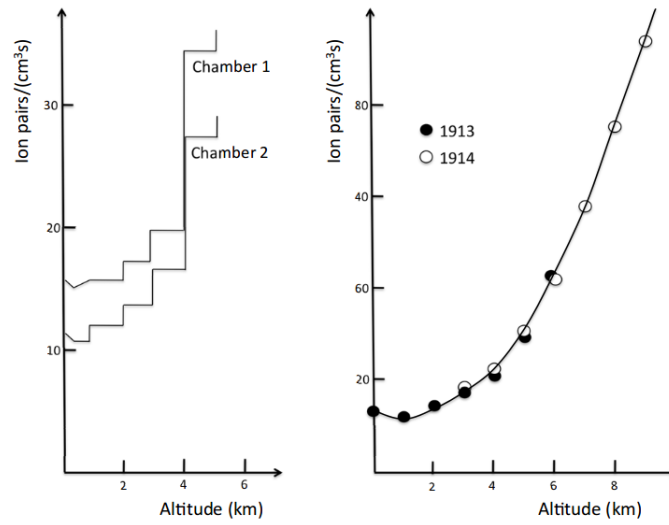


Figura 1.1: Variación de la ionización con la altura. Izquierda: ascenso final de Hess (1912), quien llevaba dos cámaras de ionización. Derecha: Ascensos de Kolhörster (1913, 1914)

Durante el periodo de la Primera Guerra Mundial (1914 - 1918) y los años posteriores, fueron pocas las investigaciones realizadas en esta materia. En 1926 Millikan y Cameron llevaron a cabo medidas de absorción de la radiación a varios niveles de profundidad en lagos ubicados a gran altura. Basados en los coeficientes de absorción y la dependencia de altura de la radiación, concluyeron que lo que estaban observando se trataba de rayos gamma de alta energía y que *"dentro de los límites de nuestra incertidumbre de medida, entonces, estos rayos atraviesan el espacio igualmente en todas las direcciones"*[17], bautizando esta radiación como «rayos cósmicos».

El poder penetrante de partículas cargadas relativistas no era conocido en aquella época, de manera que se identificaba a la muy penetrante radiación cósmica con rayos gamma, los cuales según la hipótesis de Millikan, se producían cuando los protones y electrones formaban núcleos de helio en el espacio interestelar. El experimento clave que determinaría la naturaleza de los rayos cósmicos en cuanto a si estos eran partículas cargadas o neutras, fue llevado a cabo por el físico holandés Jacob Clay, quien realizó dos viajes entre Java y Genova en 1927 y 1928 encontrando que la ionización aumentaba con la latitud y demostrando que los rayos cósmicos interactuaban con el campo geomagnético y por tanto se trataba de partículas principalmente cargadas.

Con la introducción del tubo de conteo Geiger-Müller en 1928, se confirmó que la radiación era corpuscular. En 1933 y usando estos dispositivos, tres experimentos independientes descubrieron que cerca al ecuador llegaban más rayos cósmicos del oeste que del este, lo cual demostraba, teniendo en cuenta la interacción con el campo geomagnético, que la mayoría de partículas de origen cósmico tenían carga positiva. Sin embargo, no sería sino hasta 1941 en un experimento realizado por Schein que se sabría que gran parte de esas partículas son protones.

En 1934 el Italiano Bruno Rossi reportó una observación de descargas casi simultáneas de dos contadores Geiger ampliamente separados en un plano horizontal durante una prueba de su equipo: *"... parece que de vez en cuando el aparato de control es alcanzado por lluvias muy extensas de partículas, lo que causa coincidencias entre los contadores, incluso ubicados a grandes distancias uno del otro"* [18]. En 1938 Pierre Auger [19], sin conocer el reporte de Rossi, detectó el mismo fenómeno y lo investigó con más detalle. Al estudiar el arribo de partículas en detectores ubicados a cientos de metros entre sí, concluyó que lluvias extensas de partículas son generadas por rayos cósmicos primarios de alta energía que interactúan con núcleos del aire en la atmósfera superior. Esta era la explicación de la descarga espontánea del electroscopio debida a los rayos cósmicos. Auger también estimó que la energía de la partícula primaria o generadora de la lluvia era cercana a 10^{15} eV.

A comienzos del siglo XX la comprensión teórica del Universo había avanzado notablemente con el advenimiento de la Física Cuántica y la Relatividad. A finales de los años 20, como consecuencia de un intento de unir ambas teorías, se habían predicho fenómenos totalmente nuevos y fue precisamente en el estudio de los rayos cósmicos que estos fenómenos fueron comprobados, dando validez a las nuevas teorías. En este sentido el estudio de los rayos cósmicos tuvo un papel fundamental en la comprensión de los componentes elementales de la materia y sus interacciones, dando origen a la física de partículas de los grandes aceleradores que conocemos hoy en día. El primero de estos descubrimientos fue el positrón, realizado por Anderson en 1933 mientras observaba las trayectorias de rayos cósmicos en una cámara de niebla, lo cual le valió el premio Nobel de Física en 1936 (compartido con Victor Hess).

El estudio de los rayos cósmicos abrió la puerta a un mundo de partículas más allá de los confines del átomo. Después del positrón, sucedieron los descubrimientos del muón en 1937 por Neddermeyer y Anderson, el pión cargado en 1947 por Powell, Lattes y Occhialini, la extrañeza (del inglés *strangeness*), el kaón, entre otros, todos ellos gracias la investigación en rayos cósmicos. Hasta la llegada de los aceleradores de partículas de altas energías en los años cincuenta, esta radiación natural fue la herramienta principal de los físicos de partículas para investigar el creciente "zoológico de partículas"²

1.2. El espectro de rayos cósmicos

Se conoce como **espectro total** al espectro combinado de todos los núcleos atómicos que impactan sobre el límite superior atmosférico, sin tener en cuenta su masa o su carga, conteniendo todos los nucleidos presentes en la naturaleza, cuya composición isotópica puede diferir de las observadas en la Tierra. Son pocas las magnitudes físicas descubiertas que cubran un rango tan amplio, pues el espectro total de energía abarcado por los rayos cósmicos recorre más de 15 órdenes de magnitud: se inicia alrededor de los 10^5 eV, para partículas del viento solar, hasta más allá de 10^{20} eV correspondiente a partículas intergalácticas. En la figura 1.2 se muestra el espectro de energía de los rayos cósmicos desde $\sim 10^8$ eV hasta $\sim 10^{20}$ eV.

²Una descripción histórica más detallada se da por ejemplo en [20].

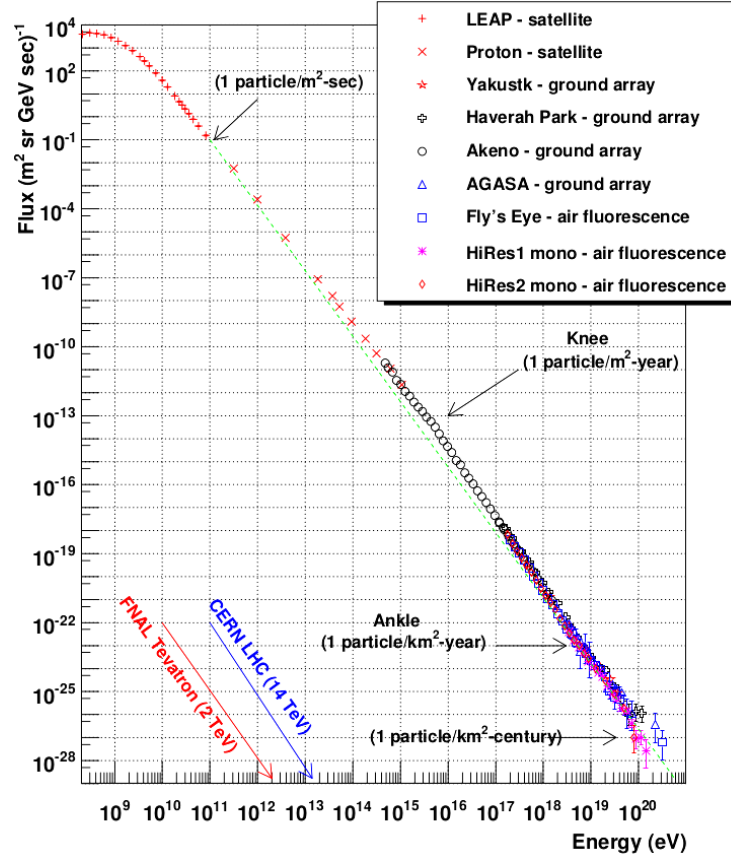


Figura 1.2: *Espectro de energía de los rayos cósmicos generado con datos obtenidos por varios observatorios. Se pueden ver los puntos de quiebre del espectro conocidos como la rodilla a $\sim 10^{15,5}$ eV, el tobillo a $\sim 10^{18,5}$ eV y la supresión a $\sim 10^{20}$ eV. La línea verde es proporcional a E^{-3} . Imagen tomada de [21].*

Para primarios con las energías más bajas, $E_p \lesssim 10^{10}$ eV, el espectro está sujeto a una fuerte variabilidad debido a la modulación solar del flujo, por el efecto del campo geomagnético y la atmósfera. A energías más altas, $E_p \gtrsim 10^{10}$ eV, los efectos de modulación son muy pequeños y el espectro diferencial de energía puede ser ajustado en todo ese rango mediante una simple ley de potencias de la forma:

$$\left(\frac{dN}{dE_p} \right) \propto E_p^\alpha \quad (1.1)$$

El coeficiente α es el índice espectral combinado, y es aproximadamente igual a ~ -3 , o lo que es igual, el flujo total cae 3 órdenes de magnitud por cada década de energía del primario. A lo largo del rango considerado de energía, solo se observan algunos cambios en el exponente α . El primero de ellos ocurre cuando la energía es $\sim 10^{15,5}$ eV en la llamada *rodilla*, donde el índice espectral cae de $\alpha = -2.7$ a $\alpha = -3$. Luego, cuando la energía es $\sim 10^{18,5}$ eV, el índice espectral

recupera el valor $\alpha = -2.7$, formando lo que se conoce como *tobillo*. Finalmente, cuando la energía alcanza el valor de $\sim 6 \times 10^{19}$ eV, el índice espectral disminuye a $\alpha = -4.2$, lo cual se atribuye al efecto GZK. Este efecto, propuesto por Greisen, Zatsepin y Kuz'min, corresponde a una disminución en el flujo de primarios debida a la interacción de rayos cósmicos de muy alta energía con el fondo de radiación de microondas. Varios observatorios han reportado que a una energía de $\sim 4 \times 10^{17}$ eV ocurre un decremento del índice espectral de $\alpha = -3$ a $\alpha \simeq -3.3$ eV, en lo que se conoce como *segunda rodilla*, sin embargo su existencia aún está en discusión [22].

Cada uno de estos cambios en el índice espectral tiene diversas explicaciones relacionadas con los mecanismos de aceleración, o con la composición química de los rayos cósmicos, o bien con interacciones durante la propagación en el medio intergaláctico o interestelar. Debido al alto flujo de la componente de bajas energías, menores a $\sim 10^{14}$ eV, es posible estudiar los primarios de esta parte del espectro directamente mediante detectores ubicados en globos o satélites. Para la componente de energía mayor a $\sim 10^{14}$ eV, mediciones directas ya no son eficientes debido al bajo flujo de primarios, por lo que su estudio se hace indirectamente a través de arreglos de detectores sobre la superficie terrestre que miden el rastro de las lluvias aéreas iniciadas por estas partículas de alta energía [23].

Al analizar la composición química del espectro total, el índice espectral varía para cada especie. Para este estudio se utilizó la compilación realizada por Wiebel-Sooth y Bierman [24] quienes ajustaron el espectro (1.4) hasta 1 Pev al conjunto de datos disponibles para cada especie. Los resultados de este ajuste fueron extraídos de [23] y se presentan en la tabla 1.1.

El **espectro diferencial**, que puede ser total o de determinada especie química, está definido como el número de partículas dN que impactan sobre el detector por unidad de área, tiempo, ángulo sólido y energía:

$$j(E, Z) = \frac{dN(E, Z)}{dS d\Omega dt dE}. \quad (1.2)$$

De manera que el número total de partículas de determinada especie que se registra en un área S durante un tiempo Δt en un intervalo angular $\Delta\theta$ y $\Delta\phi$ y en un rango de energía $\Delta E \equiv E_{\text{máx}} - E_{\text{mín}}$ será:

$$N(Z) = \int_{\Delta E} \int_{\Delta\Omega} \int_{\Delta t} \int_S \left(\frac{dN(E, Z)}{dS d\Omega dt dE} \right) dS dt d\Omega dE \quad (1.3)$$

El espectro diferencial puede aproximarse mediante una ley de potencias de la forma:

$$j(E, Z) = j_0(Z) E^{\alpha(Z)} \quad (1.4)$$

Elemento	Z	A	j_0	α
H	1	1	1.15×10^{-5}	-2.77
He	2	4	7.19×10^{-6}	-2.64
Li	3	7	2.08×10^{-7}	-2.54
Be	4	9	4.74×10^{-8}	-2.75
B	5	11	8.95×10^{-8}	-2.95
C	6	12	1.06×10^{-6}	-2.66
N	7	14	2.35×10^{-7}	-2.72
O	8	16	1.57×10^{-6}	-2.68
F	9	19	3.28×10^{-8}	-2.69
Ne	10	20	4.60×10^{-7}	-2.64
Na	11	23	7.54×10^{-8}	-2.66
Mg	12	24	8.01×10^{-7}	-2.64
Al	13	27	1.15×10^{-7}	-2.66
Si	14	28	7.96×10^{-7}	-2.75
P	15	31	2.70×10^{-8}	-2.69
S	16	32	2.29×10^{-7}	-2.55
Cl	17	35	2.94×10^{-8}	-2.68
Ar	18	40	8.36×10^{-8}	-2.64
K	19	39	5.36×10^{-8}	-2.65
Ca	20	40	1.47×10^{-7}	-2.70
Sc	21	45	3.04×10^{-8}	-2.64
Ti	22	48	1.13×10^{-7}	-2.61
V	23	51	6.31×10^{-8}	-2.63
Cr	24	52	1.36×10^{-7}	-2.67
Mn	25	55	1.35×10^{-7}	-2.46
Fe	26	56	1.78×10^{-6}	-2.60
Co	27	59	7.51×10^{-9}	-2.72
Ni	28	59	9.96×10^{-8}	-2.51

Tabla 1.1: Índice espectral α e intensidad espectral j_0 (normalizada para $E=1\text{TeV}$) de los elementos desde el ^1H hasta el ^{28}Ni . Los valores de j_0 y α fueron extraídos de la tabla 5.12, página 700 de [23]) y son válidos en el rango $10^9\text{eV} \lesssim E \lesssim 10^{15}\text{eV}$

Remplazando (1.4) en (1.3) se tiene que las integrales espacial, temporal y angular solo afectan a la normalización global, es decir:

$$N = j_0 \int_{\Delta t} dt \int_S dS \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{\text{máx}}} \sin \theta d\theta \int_{E_{\text{mín}}}^{E_{\text{máx}}} E^\alpha dE \quad (1.5)$$

$$= j_0 S \Delta t (1 - \cos(\theta_{\text{máx}})) \pi \frac{E^{\alpha+1}}{\alpha+1} \Big|_{E_{\text{mín}}}^{E_{\text{máx}}} \quad (1.6)$$

Llamando $N_0 \equiv S \Delta t \sin^2(\theta_{\text{máx}}) \pi$, suponiendo $\theta_{\text{máx}} = 90^\circ$, explicitando la dependencia de j_0 y α con Z (y eventualmente A) y definiendo $\beta(Z) \equiv \alpha(Z) + 1$, esta última expresión queda:

$$N(Z) = N_0 j_0(Z) \frac{E^{\beta(Z)}}{\beta(Z)} \Big|_{E_{\text{mín}}}^{E_{\text{máx}}} = 3,1416 j_0(Z) \frac{E^{\beta(Z)}}{\beta(Z)} \Big|_{E_{\text{mín}}}^{E_{\text{máx}}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (1.7)$$

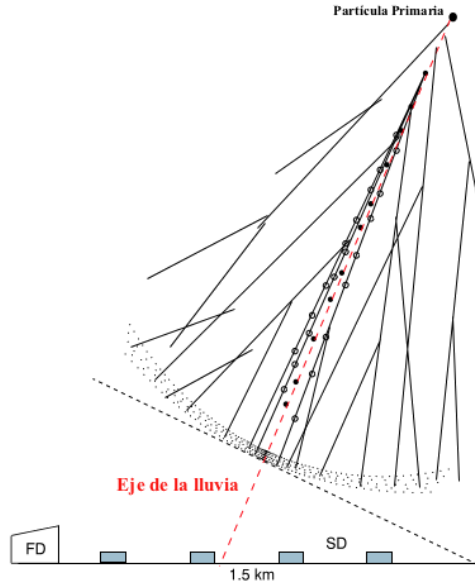
1.3. Lluvias atmosféricas extendidas

Se llama lluvia atmosférica extendida (EAS por sus siglas en inglés) a la cascada de partículas generada por un rayo cósmico primario cuando interactúa con los núcleos de las moléculas presentes en la atmósfera, como N_2 , O_2 y Ar. Dichas interacciones generan una reacción en cadena que dan como resultado una serie de nuevas partículas de menor energía, llamadas secundarios, que se propagan hacia la superficie terrestre con una velocidad cercana a la de la luz.

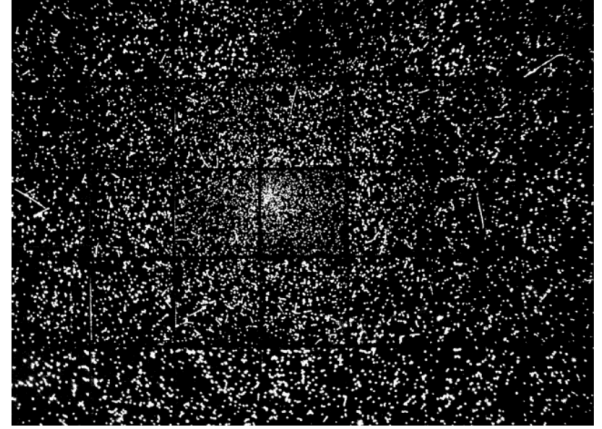
La evolución de esta cascada depende de varios factores, como la especie química del primario, su energía inicial, el ángulo de incidencia y las condiciones atmosféricas locales. Después de la primera interacción del primario, aparecen nuevas partículas, muchas de ellas inestables, que o bien producen nuevas interacciones, o decaen, generando más partículas y perdiendo energía en el proceso. De manera que en cierto punto del desarrollo de la lluvia, el número de partículas será máximo, luego de lo cual comenzará a disminuir paulatinamente, cesando la producción de nuevas partículas. Al no tener energía suficiente para generar nuevas interacciones, los secundarios continúan su propagación o bien hasta decaer (si son inestables), o bien hasta ser absorbidos o hasta llegar a tierra.

A medida que la lluvia se desarrolla, las partículas se dispersan alejándose del eje determinado por la dirección de incidencia del primario. Las partículas se esparcen lateralmente formando una especie de «panqueque» normal al eje de la lluvia, que crece a medida que la cascada se propaga por la atmósfera (figura 1.3a). La mayor densidad de partículas se genera en la zona cercana al eje principal, disminuyendo rápidamente a medida que se aleja del mismo (figura 1.3b).

Estas lluvias poseen tres componentes principales que son: componente electromagnética, hadrónica y muónica³, las cuales se representan esquemáticamente en la figura 1.3c. La cascada hadrónica es la columna vertebral de la lluvia y está formada principalmente por piones. Los decaimientos de piones neutros inician las cascadas electromagnéticas, mientras que los decaimientos de piones cargados producen muones que abandonan el núcleo hadrónico y viajan kilómetros casi sin ser afectados⁴. La componente electromagnética está formada por fotones, electrones y positrones y es la principal componente de la lluvia, dado que por cada interacción hadrónica, aproximadamente la tercera parte de la energía involucrada va directamente al canal electromagnético, haciendo que en promedio, cerca del 99 % de las partículas producidas con hasta el 90 % de la energía total del primario esté dentro de esta componente [22]. Los procesos de alta energía básicos que forman la componente electromagnética son la producción de pares y el Bremsstrahlung.



(a) Frente de lluvia desplazándose a lo largo del eje determinado por la dirección de incidencia del primario. Dos de las técnicas usuales para registrar el paso de estas partículas son los detectores de superficie (SD) y los telescopios de fluorescencia (FD).



(b) Fotografía de la región central de una lluvia casi vertical detectada por el arreglo de 35 cámaras de descarga de 1 m² cada una, situado en la Universidad de Leeds. Se nota la región de mayor densidad de partículas secundarias ligeramente desplazada del centro de la fotografía. A medida que aumenta la distancia a ese punto, la densidad de partículas disminuye y el tamaño de los puntos aumenta, lo cual indica que el recorrido de las partículas está inclinado respecto al plano del detector, evidencia de la dispersión lateral de las mismas. Imagen tomada de [26].

³Adicionalmente existe una componente de neutrinos que se escapa a la detección sobre el suelo debido a la pequeña sección transversal de estas partículas y problemas relacionados con el fondo [23].

⁴Los muones son pruebas irrefutables (*smoking guns*) de la cascada hadrónica ya que su energía, momentum, distribución espacial y profundidad de producción son claves en la reconstrucción de la lluvia [25].

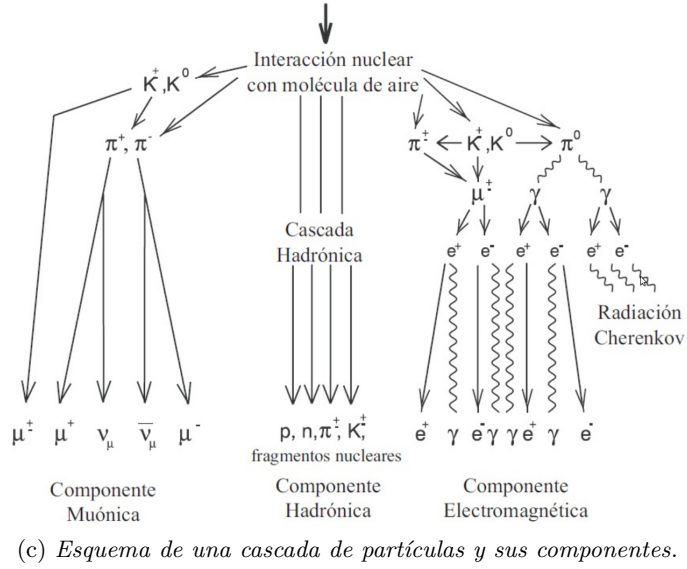


Figura 1.3

1.4. Efecto atmosférico en la propagación de rayos cósmicos

La atmósfera de la Tierra es un gran volumen de gas con una densidad de casi 10^{19} partículas por cm^3 a nivel del mar [23]. A mayor altitud, la densidad del aire disminuye y con esta el número de moléculas y núcleos por unidad de volumen. La atmósfera consiste principalmente de nitrógeno y oxígeno, aunque están presentes otros constituyentes (ver tabla 1.2).

Se definen regiones específicas dentro de la atmósfera de acuerdo a sus variaciones de temperatura. Estas incluyen la tropósfera, donde toman lugar los procesos meteorológicos; la estratósfera, donde generalmente no hay nubes y donde se concentra el ozono; la mesósfera, que se encuentra entre 50 y 80 km y donde la temperatura disminuye cuando aumenta la altitud; y finalmente se encuentra la termósfera, donde la temperatura aumenta con la altitud hasta aproximadamente los 130 km. Las capas entre las diferentes regiones son llamadas *pausas*, es decir, *tropopausa*, *estratopausa*, *mesopausa* y *termopausa*. En la figura 1.4 se presenta la temperatura en la atmósfera en función de la altitud.

La variación de la densidad con la altitud en la atmósfera es una función de los parámetros barométricos, la cual está determinada por la ecuación:

$$\rho(h) = \rho(h_0) \left(\frac{T(h_0)}{T(h)} \right) \exp \left(- \int_{h_0}^h \frac{M g(h)}{R T(h)} dh \right) \quad (1.8)$$

Molécula	n_i [cm ⁻³]	$q_i = n_i/n_{\text{aire}}$ [%]
<i>aire</i>	2.687×10^{19}	100
N_2	2.098×10^{19}	78.1
O_2	5.629×10^{18}	20.9
Ar	2.510×10^{17}	0.9
CO_2	8.87×10^{15}	0.03
He	1.41×10^{14}	5.0×10^{-4}
Ne	4.89×10^{14}	1.8×10^{-3}
Kr	3.06×10^{13}	1.0×10^{-4}
Xe	2.34×10^{12}	9.0×10^{-6}

Tabla 1.2: *Composición de la atmósfera a temperatura y presión estándar (273.16 K y 760 mm Hg). n_i es el número de moléculas por cm³ y q_i es el porcentaje relativo de cada constituyente i . Los datos fueron tomados de [23].*

conocida como ecuación barométrica y donde $T(h)$ es la temperatura a la altura h , R la constante universal de los gases, M la masa molar del aire ($M = 0.02896$ kg mol⁻¹), $g(h)$ la aceleración debida a la gravedad a la altura h , y h_0 el nivel de referencia.

Ya que la atmósfera real es un sistema complejo, frecuentemente se usa una representación aproximada, un modelo simplificado, conocido como *atmósfera exponencial isoterma estándar*.

Profundidad atmosférica

Los rayos cósmicos atraviesan una gran variedad de medios como el espacio extragaláctico o el aire de la atmósfera o el material rocoso del interior de la Tierra. Como en todo proceso de interacción con un medio, lo que importa no es tanto la longitud recorrida a lo largo de la dirección de movimiento, sino más bien la cantidad de materia atravesada, que por construcción tiene incorporada la densidad del medio. En el caso particular del aire como medio, debe tenerse presente la variación de la densidad con la altura sobre el nivel del mar. Se define entonces a la **profundidad atmosférica** $X(l)$ como la masa de aire por unidad de área que atravesó una partícula a lo largo de la atmósfera desde el infinito hasta la posición l a lo largo de la trayectoria que describe su movimiento:

$$X(l) = \int_l^\infty \rho(l') dl' \quad (1.9)$$

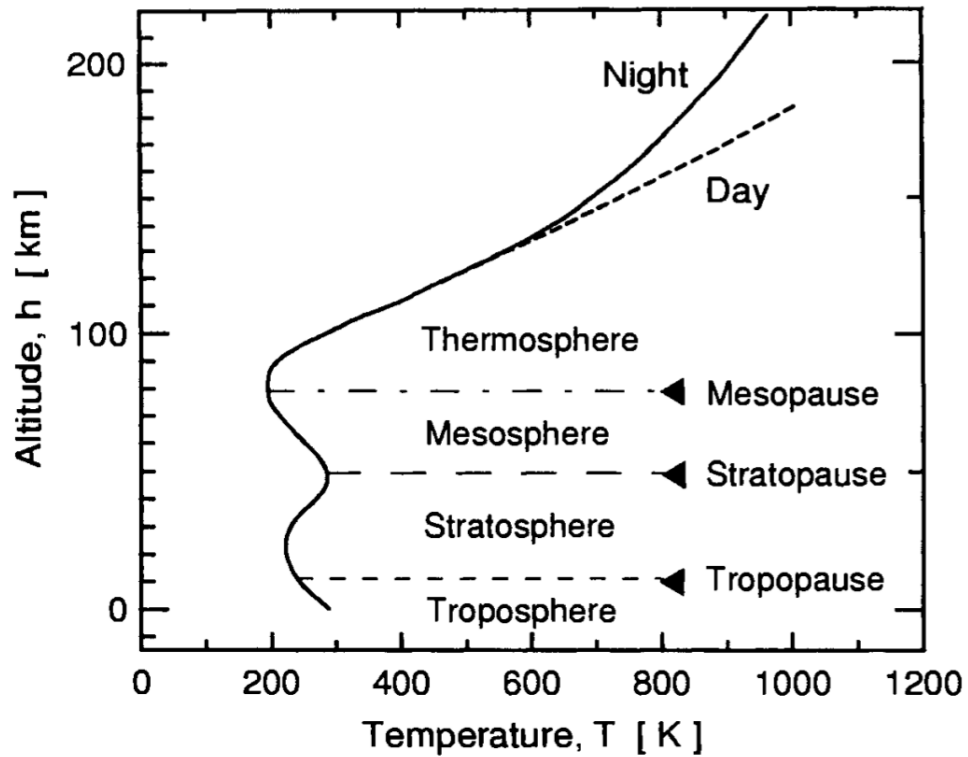


Figura 1.4: Perfil de temperatura de la atmósfera en función de la altitud. Imagen tomada de [23].

donde para el caso de la atmósfera $\rho(l)$ corresponde a la densidad del aire en la posición l , que a su vez solo depende de la altura h sobre la superficie y está determinada por la ecuación barométrica (1.8).

1.5. Campo geomagnético

Se define al campo geomagnético como el campo magnético producido por todas las fuentes dentro y fuera de la Tierra sólida hasta la región conocida como magnetopausa, que es la frontera dentro de la cual el campo magnético de la Tierra permanece confinado. Más allá de esta frontera se encuentra el campo magnético interplanetario (IMF por sus siglas en inglés), producido por el Sol y transportado por un plasma conocido como viento solar [27].

Para describir el vector de campo magnético terrestre se utiliza típicamente un sistema de ejes coordenados rectangulares en el que el eje x es horizontal y dirigido al Norte geográfico, el eje y también horizontal y dirigido hacia el Este y el eje z vertical y dirigido hacia abajo. Las componentes del vector magnético se denominan respectivamente para cada eje: norte X , este Y , vertical Z . La componente horizontal H es la proyección de este vector sobre el plano horizontal. El ángulo que forma la componente H con el eje x se conoce como declinación y

se designa por D ; se le atribuye signo positivo en el caso de que H se desvíe respecto al eje x hacia el Este y signo negativo hacia el Oeste. El ángulo entre el plano horizontal y el vector de campo magnético se denomina inclinación y se designa por I . En la figura 1.5 se muestra gráficamente cada una de estas cantidades y en la tabla 1.3 se especifican las relaciones que existen entre ellas.

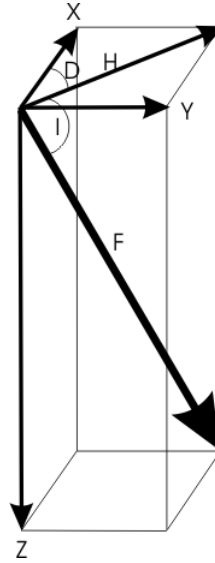


Figura 1.5: Componentes del campo geomagnético. Imagen tomada de <http://geomag.nrcan.gc.ca/>.

La intensidad del campo o cualquiera de sus componentes se mide en nanoteslas (nT). Un tesla representa un campo magnético extremadamente fuerte, como el que se observaría entre los polos de un electroimán poderoso. El campo magnético de la Tierra es mucho más débil; su intensidad máxima se alcanza cerca a los polos magnéticos, donde llega a ser del orden de 60000 nT.

1.5.1. Campo magnético de origen interno

El campo más intenso, del orden de 30000 nT en el ecuador y 60000 nT en los polos es aquel que se produce dentro del núcleo a través de un proceso de dínamo auto-sostenido (geodínamo). Este mecanismo no está del todo entendido pero se sabe que es posible gracias a que el núcleo de la Tierra está compuesto de hierro fundido altamente conductor, el cual se mueve de forma turbulenta y genera corrientes eléctricas [28]. El campo magnético así generado cambia en escalas de tiempo seculares, y por ello su derivada temporal se conoce como variación secular.

En la corteza terrestre se genera un campo magnético de mucha menor intensidad; este se produce debido a la presencia de rocas magnetizadas⁵. Tales rocas pueden ser encontradas

⁵Las fuentes relacionadas con medios magnetizados se encuentran únicamente al interior de la Tierra sólida

Componente	Descripción	Expresión
X	Componente del vector magnético en dirección del Norte geográfico. Positiva en sentido Sur-Norte.	$X = H \cos(D)$
Y	Componente del vector magnético en dirección Este. Positiva en sentido Oeste-Este.	$Y = H \sin(D)$
Z	Componente del vector magnético en dirección vertical hacia abajo. Positiva cuando apunta hacia el centro de la Tierra.	$Z = F \sin(I)$
F	Intensidad total del vector magnético.	$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$
H	Componente horizontal del vector magnético.	$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$
D	Declinación magnética. Es el ángulo que forma el Norte geográfico (eje x) con la componente H del vector magnético. Positivo hacia el Este.	$D = \arctan(Y/X)$
I	Inclinación magnética. Es el ángulo que forma el plano horizontal (plano xy) con el vector magnético. Es positivo hacia abajo.	$I = \arctan(Z/H)$

Tabla 1.3: *Descripción de las componentes de campo geomagnético.*

solamente en regiones de la Tierra sólida donde la temperatura es menor a la temperatura de Curie⁶ de los minerales que presentan magnetización. Como consecuencia de esto, las rocas magnetizadas yacen principalmente en las capas superiores de la Tierra. El campo así producido puede variar sustancialmente según la posición geográfica, desde fracciones de nanotesla a miles de nanoteslas sobre la superficie terrestre [27].

La suma del campo producido en el núcleo y el producido en la corteza conforman el campo geomagnético de origen interno debido a que ambas fuentes se encuentran al interior de la Tierra. Este campo geomagnético de origen interno está dominado por el campo del núcleo a grandes escalas y por el campo de la corteza cuando se consideran escalas del orden de menos de 2000 km sobre la superficie terrestre [27]. De una manera aproximada, el campo de origen interior a grandes escalas (usualmente hasta cuatro radios terrestres desde la superficie del planeta), se asemeja al campo exterior de una esfera uniformemente magnetizada, es decir, a un campo dipolar. El campo dipolar que mejor se ajusta al actual campo geomagnético tiene sus polos separados 11.5° de los polos geográficos, estando el polo Norte al noroeste de Groenlandia. Sin embargo, en algunos lugares, la diferencia entre el campo real y el campo dipolar de mejor ajuste alcanza el 20 % del campo total [29].

en forma de rocas que han sido magnetizadas en el pasado (magnetización permanente) pero que también presentan una magnetización adicional proporcional al campo magnético presente en el ambiente (magnetización inducida).

⁶Temperatura a la cual ciertos materiales pierden sus propiedades magnéticas.

1.5.2. Campo magnético de origen externo

El Sol emite un plasma⁷ altamente conductor, llamado plasma solar, hacia el espacio interplanetario como resultado de la expansión supersónica de la corona solar. Este plasma fluye con una velocidad supersónica de 500 km s^{-1} y consiste principalmente de electrones y protones con una adición de un 5 % de iones de helio [30]. Cerca a la Tierra, la densidad del viento solar es de 7 iones por cm^3 y produce un campo magnético de aproximadamente 6 nT [27]. El viento solar interactúa con el campo geomagnético para formar una región llamada magnetosfera. A distancias mayores de unos cuantos radios terrestres, dicha interacción altera en gran medida el campo magnético de la Tierra, el cual deja de parecerse al de un dipolo a las distancias consideradas.

A una gran distancia de la Tierra (unos 15 radios terrestres), en el lado diurno, el viento solar colisiona con el campo geomagnético, siendo ralentizado y deflectado alrededor de este. El campo geomagnético se ve deformado y debido a que el viento solar posee velocidades supersónicas⁸, se genera un frente de choque, o *bow shock*, lugar donde el plasma es desacelerado y una fracción sustancial de la energía cinética de las partículas es convertida en energía térmica. El *bow shock* constituye la frontera exterior de la magnetosfera. La región de plasma termalizado subsónico detrás del *bow shock* se conoce como *magnetosheath*. Allí el plasma es más denso y más caliente que el plasma del viento solar y la intensidad del campo magnético tiene valores mayores en esta región [27].

Las partículas cargadas en movimiento del viento solar constituyen corrientes eléctricas que producen un campo magnético interplanetario el cual refuerza y comprime el campo geomagnético en el lado diurno y lo debilita y extiende en el lado nocturno de la Tierra. Esto resulta en una cola geomagnética, o magnetocola, que se extiende a grandes distancias más allá de la órbita lunar. La transición entre el campo geomagnético deformado y la magnetosheath se llama magnetopausa [30]. En la figura 1.6 se muestra la magnetosfera con las distintas regiones mencionadas anteriormente.

El campo magnético de origen externo es aquel cuyas fuentes están por encima de la atmósfera neutra. Estas fuentes son sistemas de corrientes en la ionosfera y la magnetosfera. La intensidad de los campos producidos de esta manera pueden variar fuertemente en el tiempo, por ejemplo durante tormentas magnéticas pueden alcanzar 1000 nT en la superficie de la Tierra [30]. La distorsión del campo geomagnético debido a la interacción con el viento solar viene acompañada de corrientes eléctricas en la magnetosfera, entre las cuales encontramos la corriente de cola de magnetopausa, la corriente de hoja neutral, las corrientes alineadas de campo, la corriente de anillo, entre otras, esquematizadas en la figura 1.7. Para mayor información sobre los sistemas de corrientes en la magnetosfera y en la ionosfera, se puede consultar [27].

⁷Un plasma es un gas de partículas cargadas, que consiste en igual cantidad de iones positivos y negativos.

⁸Respecto a la velocidad del sonido en el plasma solar.

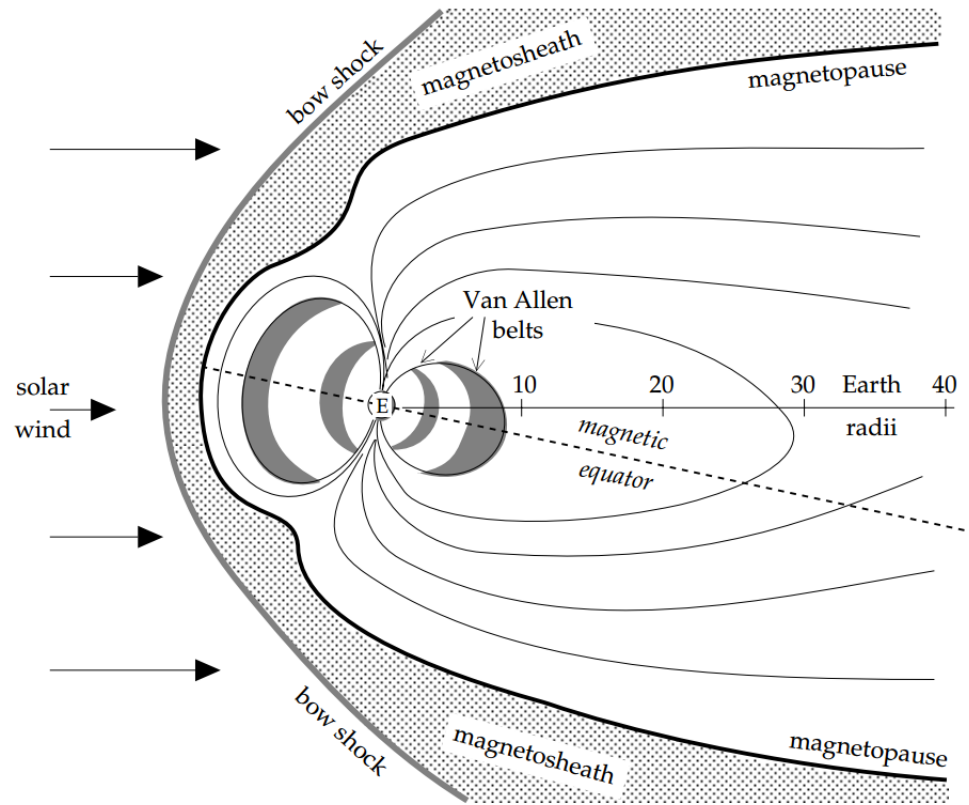


Figura 1.6: Esquema de la sección transversal de la magnetosfera, la cual muestra varias regiones de interacción del campo geomagnético con el viento solar. Imagen tomada de [30].

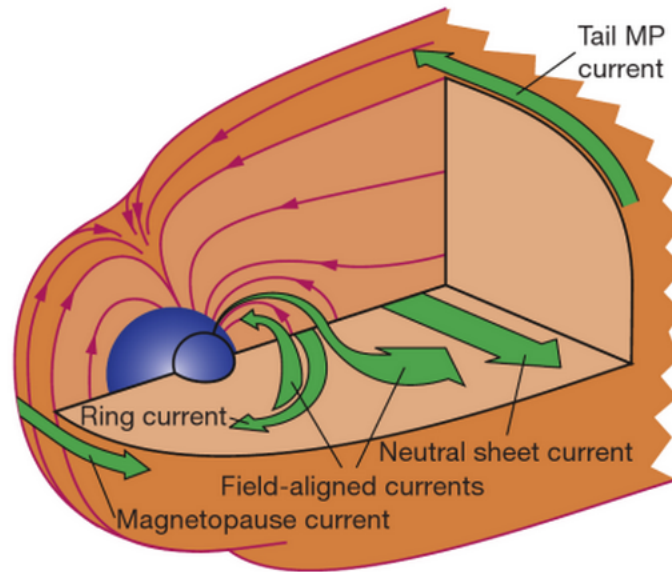


Figura 1.7: Sistemas de corrientes en la magnetosfera. Imagen tomada de [27].

1.6. Índice DST

El índice DST (*Disturbance Storm Time* por sus siglas en inglés) es una medida de la disminución en la componente horizontal del campo geomagnético debido a aumentos en la corriente de anillo magnetosférica. Esta corriente de anillo se encuentra en el plano ecuatorial a una distancia de 3 a 5 radios terrestres, está compuesta principalmente de protones y se mueve en dirección oeste, de manera que el campo magnético que produce cancela parcialmente el campo geomagnético de origen interno, que en el ecuador apunta principalmente hacia el norte [31]. Entonces las posibles variaciones en esta corriente producen variaciones en el campo geomagnético en la superficie de la Tierra, específicamente cuando ocurre una tormenta geomagnética.

Una tormenta geomagnética es una perturbación de la magnetósfera de la Tierra que ocurre cuando hay un intercambio muy eficiente de energía del viento solar dentro del medio ambiente espacial que rodea la Tierra, resultando en intensas corrientes en la magnetósfera, cambios en los cinturones de radiación y cambios en la ionósfera⁹. De manera que cuando ocurre una de estas tormentas, la energía de la corriente de anillo aumenta y ocurre una disminución temporal de la intensidad del campo geomagnético en el plano ecuatorial de la superficie terrestre. Así que, con todo esto, es posible decir que el índice DST es un indicador de la corriente de anillo magnetosférica y de la intensidad de la tormenta geomagnética. Aunque la corriente de anillo es uno de los mayores sistemas de corrientes de la magnetósfera, otras corrientes de baja latitud también contribuyen al índice DST: corrientes de la magnetocola, corrientes inducidas por subtormentas y corrientes inducidas en la Tierra sólida [32].

El índice DST se obtiene cada hora a partir del promedio de las perturbaciones de la componente H del campo geomagnético registradas por cuatro observatorios ubicados cerca del ecuador y distribuidos uniformemente en longitud: Honolulu, San Juan, Hermanus y Kakioka. Los valores negativos del índice DST indicarán una tormenta geomagnética en progreso. De acuerdo a los diferentes valores que toma el índice DST, se puede clasificar las tormentas geomagnéticas de la siguiente manera:

- Super tormentas: $\text{DST} < -250 \text{ nT}$
- Tormentas intensas: $-250 \text{ nT} < \text{DST} < -100 \text{ nT}$
- Tormentas moderadas: $-100 \text{ nT} < \text{DST} < -50 \text{ nT}$
- Tormentas débiles: $-50 \text{ nT} < \text{DST} < -30 \text{ nT}$

El corte típico para realizar estudios relativos a los efectos de tormentas geomagnéticas sobre redes eléctricas y satélites es para índices DST menores a -200 nT ¹⁰. A modo de ejemplo, en la figura (1.8) se presenta los datos del índice DST desde el 5 de octubre de 2003 hasta el 3 de

⁹Ver http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/27/dst_index

¹⁰Ver <http://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index>

noviembre de 2003, que contiene la información de la super tormenta de *Halloween* ocurrida ese año.

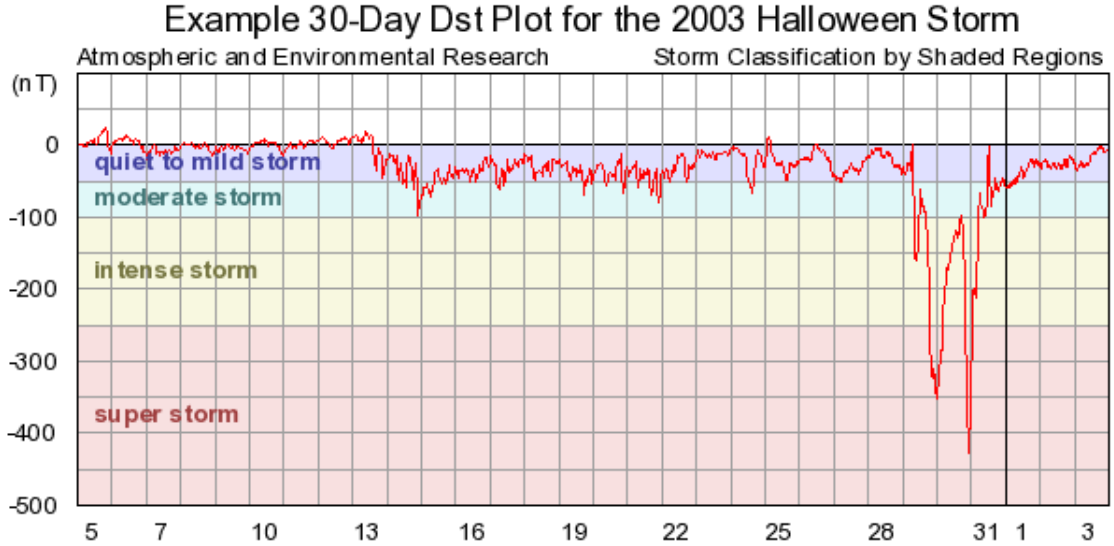


Figura 1.8: *Clasificación de las tormentas geomagnéticas. Se presenta los datos reales del índice DST desde el 5 de octubre de 2003 hasta el 3 de noviembre de 2003, que contienen la super tormenta de Halloween de ese año (fuente: <http://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index>).*

El índice DST es calculado por el World Data Center for Geomagnetism en la Universidad de Kyoto, Japón y está disponible desde 1957 hasta el presente¹¹

1.7. Modelos de campo geomagnético

El campo magnético en la magnetósfera terrestre es la suma del campo debido a fuentes al interior de la Tierra y el campo externo que resulta de las corrientes fuera de la Tierra en la magnetósfera y en su frontera externa la magnetopausa. Para distancias menores a cinco radios terrestres, el campo geomagnético es principalmente dipolar y se usa el modelo semiempírico IGRF (International Geomagnetic Reference Field) (figura 1.9), que se actualiza cada cinco años con base en las mediciones de sondas espaciales, satélites y otros experimentos a lo largo de diferentes latitudes. En este modelo no se consideran las corrientes externas a la Tierra, es decir, solo se tiene en cuenta las fuentes internas del campo geomagnético. El IGRF incluye la variación secular del momento dipolar, el desplazamiento angular del eje geomagnético respecto del de rotación terrestre y el desplazamiento espacial desde el centro terrestre [33]. El campo geomagnético se escribe como el gradiente de un escalar potencial:

$$\vec{B} = -\vec{\nabla}V \quad (1.10)$$

¹¹Está disponible en la dirección: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/dst.html>

donde el potencial escalar magnético V se define como:

$$V(r, \theta, \lambda, t) = R_E \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_E}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)] P_n^m(\theta) \quad (1.11)$$

donde r , θ , λ son las coordenadas geocéntricas¹², R_E es el radio terrestre (6371.2 km), N es el grado máximo de la expansión en armónicos esféricos, $g_n^m(t)$ y $h_n^m(t)$ son los coeficientes de Gauss y $P_n^m(\theta)$ son los polinomios asociados de Legendre semi-normalizados de Schmidt. Cada cinco años, la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) publica un nuevo conjunto de coeficientes de Gauss definiendo el nuevo modelo IGRF. Para una descripción más detallada del modelo IGRF ver [34, 35].

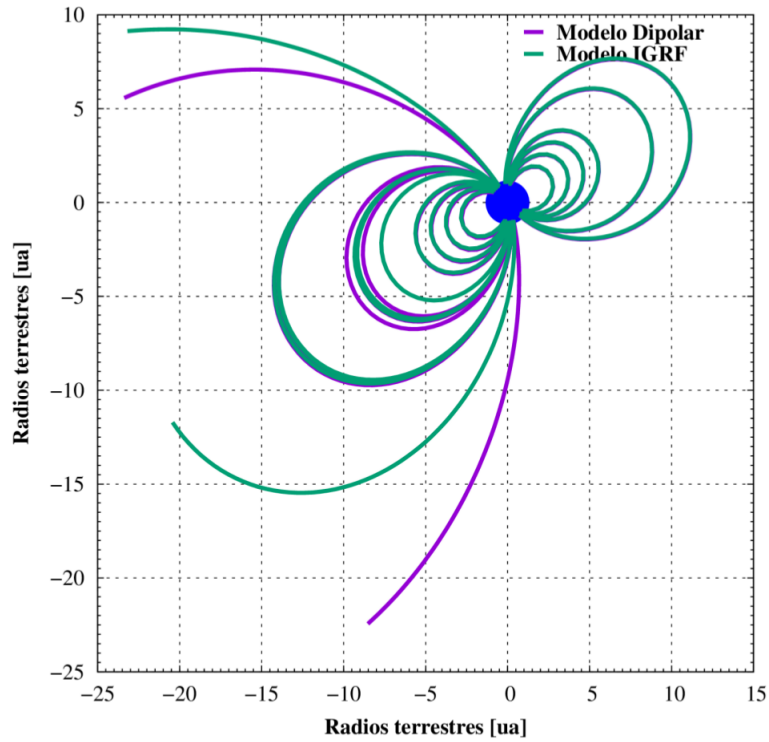


Figura 1.9: Comparación entre modelo dipolar de campo geomagnético y el modelo IGRF 2010. Imagen tomada de [36].

Para distancias superiores a cinco radios terrestres, el campo geomagnético presenta una fuerte asimetría debido a la interacción con el viento solar. En este caso, el modelo utilizado es el Tsyganenko (figura 1.10), el cual, a diferencia del IGRF, tiene en cuenta los principales sistemas de corrientes magnetosféricas tanto en condiciones calmas como de tormenta geomagnética. Entre estos sistemas de corrientes están el anillo de corriente azimutal (cinturón de Van Allen), las corrientes de la magneto-cola y la magneto-pausa. La versión 2001 de este

¹² r es la distancia desde el centro de la Tierra, θ es la colatitud geocéntrica, es decir, 90° -latitud, y λ es la longitud.

modelo, TSY01, emplea datos tomados por diferentes satélites que permiten definir una serie de parámetros que apuntan a mejorar el ajuste de este modelo. De manera que el modelo TSY01 depende de cinco parámetros: corriente de cola, que se caracteriza en función de los coeficientes medios de retardo G_1 y G_2 ; corrientes de anillo, que dependen del índice de perturbación temporal de tormenta (DST); corrientes de Birkeland; el campo magnético de la magnetopausa; y el campo de interconexión del campo magnético interplanetario. El modelo TSY01 incluye el modelo IGRF, y es válido para la zona interior de la magnetósfera, es decir, TSY01 es válido desde la atmósfera terrestre hasta la magneto-pausa. Para una descripción más detallada del modelo de Tsyganenko 2001, ver [37].

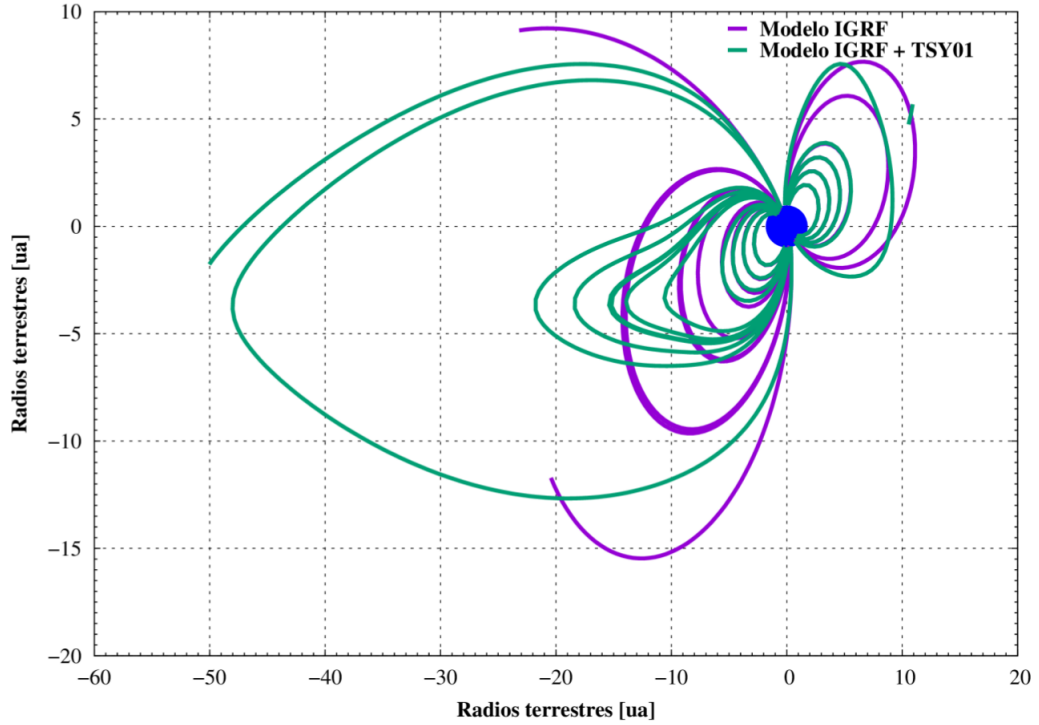


Figura 1.10: Comparación entre el modelo de Tsyganenko 2001 y el IGRF 2010. Imagen tomada de [36].

1.8. Propagación de rayos cósmicos en el campo geomagnético

El principal efecto de la interacción entre rayos cósmicos y el campo geomagnético se traduce en un cambio en la dirección de propagación de estas partículas. La dinámica de una partícula de masa en reposo m_0 , carga eléctrica q y velocidad $\vec{v}$ que se mueve en un campo magnético $\vec{B}$ viene determinada por la ecuación de Lorentz relativista:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{q}{c} \vec{v} \times \vec{B} \quad (1.12)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y $\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}$ es el momentum relativista de la partícula.

1.8.1. Rigidez de una partícula

La ecuación de movimiento (1.12) conserva la magnitud del momentum p y por tanto la energía de la partícula. Después de algunas transformaciones, se puede reescribir esta ecuación como:

$$\frac{d\hat{\mathbf{I}}_v}{ds} = \frac{q}{pc} \hat{\mathbf{I}}_v \times \vec{B} \quad (1.13)$$

donde $\hat{\mathbf{I}}_v = \vec{v}/v$ es el vector unitario en la dirección de la velocidad y s es la longitud de la trayectoria. Entonces se define la rigidez de la partícula como:

$$R = \frac{pc}{q} \quad (1.14)$$

La ecuación (1.13) permite ver claramente que para la misma posición y dirección iniciales, partículas cargadas con la misma rigidez y cargas del mismo signo tienen trayectorias idénticas. Por esta razón es más conveniente caracterizar la trayectoria de los rayos cósmicos en función de su rigidez y no de su energía. Entre más alta sea la rigidez de una partícula, menor será la deflexión de su trayectoria, así que la rigidez puede interpretarse como una medida de la resistencia de una partícula cargada a cambiar su dirección de propagación por efecto del campo magnético. Como se ve en la ecuación (1.14), la rigidez tiene unidades de energía dividida entre carga eléctrica, en física de rayos cósmicos se suele expresar en GV o MV.

Rigidez de corte

Los primeras investigaciones realizadas sobre el problema del acceso de rayos cósmicos a puntos dentro del campo geomagnético fueron llevadas a cabo por el geofísico noruego C. Störmer, quien en 1955 mostró analíticamente que en cualquier punto de un campo magnético dipolar existe un cono axialmente simétrico (llamado cono de Störmer) en dirección este en el que está prohibido el acceso a partículas cargadas con una rigidez específica y que se aproximan desde el infinito. Posteriormente, Lemaitre y Vallarta consideraron el problema de un cuerpo sólido (la Tierra) dentro de un campo magnético dipolar y hallaron numéricamente un «cono permitido» de direcciones de llegada para los rayos cósmicos que poseen determinada rigidez. Entre el «cono permitido» y el cono de Störmer existe lo que se conoce como penumbra, una región con una compleja estructura de bandas alternas de direcciones prohibidas y permitidas. Las regiones prohibidas dentro de la penumbra surgen por la intersección de ciertas familias de trayectorias con la Tierra antes de llegar al punto de interés. En la figura 1.11 se presentan las regiones anteriormente descritas.

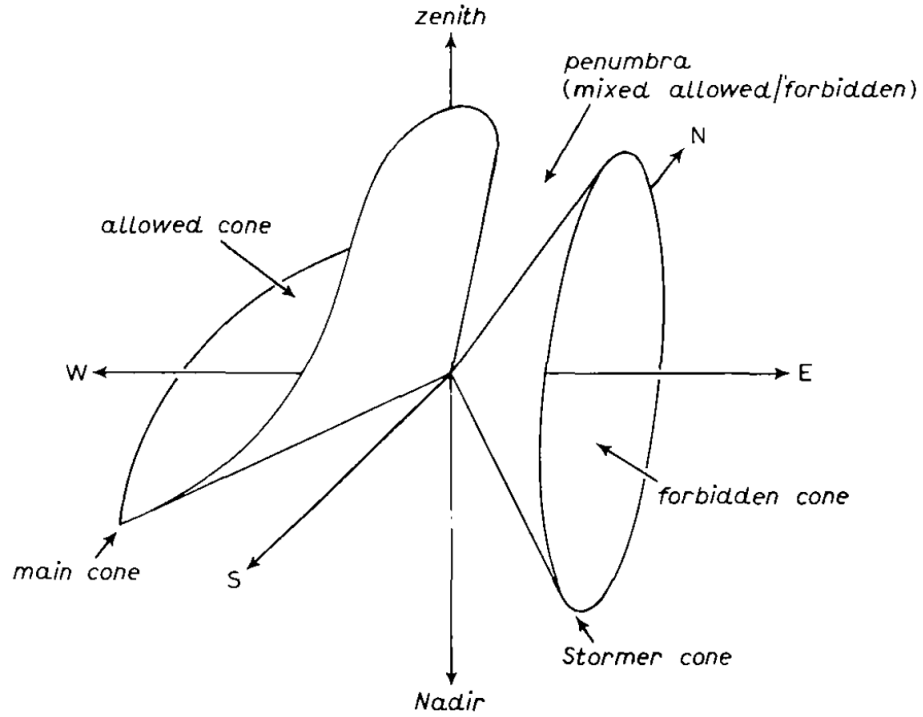


Figura 1.11: *Relación espacial entre el cono de Störmer, la penumbra y el cono permitido. El cono de Störmer es un cono circular derecho sobre el este magnético, es una propiedad intrínseca de un campo dipolar y está definido analíticamente. El cono permitido es un concepto desarrollado por Lemaitre y Vallarta y no está definido por una ecuación exacta. La penumbra es una región caótica de bandas de trayectorias permitidas y prohibidas. Imagen tomada de [38].*

Los primeros investigadores (como Störmer, Lemaitre y Vallarta) trataban el problema de las condiciones de acceso de los rayos cósmicos desde un punto de vista direccional, describiendo las direcciones desde las cuales las partículas con una rigidez específica podían o no podían llegar a determinado punto del campo geomagnético. Posteriormente, con el uso del cálculo computacional, este problema fue tratado desde un punto de vista de la rigidez, en el que la accesibilidad de la partícula se considera una función de su rigidez para una determinada dirección de arribo. Para una discusión de la terminología usada por ambos puntos de vista, ver [38].

La rigidez de corte tiene que ver con la rigidez mínima por encima de la cual los rayos cósmicos pueden atravesar la magnetósfera de la Tierra y llegar a una posición específica desde una dirección observacional específica (punto de vista de rigidez), de manera que es una medida del blindaje proporcionado por el campo geomagnético. El problema principal es que no hay un único valor que describa completamente la rigidez de corte y que por tanto determine el paso o no de las partículas. Para una dirección de arribo específica y un punto determinado del campo geomagnético, existe una rigidez de corte superior R_U por encima de la cual todas las partículas tienen acceso permitido; una rigidez de corte inferior R_L por debajo de la cual el

acceso está prohibido y la región entre R_U y R_L corresponde a la penumbra la cual posee una compleja estructura de bandas de acceso permitido y prohibido (ver figura 1.12). La existencia de dicha penumbra se debe a que la trayectoria de los rayos cósmicos intersectan la superficie de la Tierra antes de llegar al punto de observación. Los rayos cósmicos de altas energías (altas rigideces) poseen trayectorias relativamente simples a través del campo geomagnético. A medida que la rigidez de las partículas disminuye, las deflexiones geomagnéticas aumentan y las trayectorias se hacen más complicadas, formando bucles intermedios. Cuando estos bucles intersectan la superficie sólida de la Tierra, las trayectorias quedan prohibidas. Incluso a menores rigideces puede que haya trayectorias permitidas, de manera que esta compleja estructura de órbitas permitidas y prohibidas es lo que forma la penumbra [39].

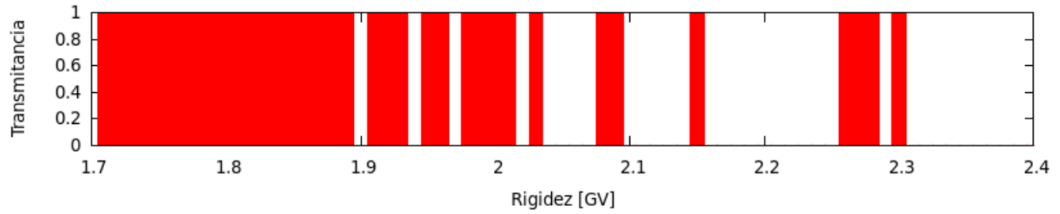


Figura 1.12: *Función de transmitancia para la ubicación del Monitor de neutrones Newark obtenida de [33] cuando la dirección de incidencia es vertical. Las franjas rojas tienen transmitancia cero y corresponden a rigideces asociadas con trayectorias prohibidas, mientras que las franjas blancas poseen transmitancia igual a uno y están asociadas con trayectorias permitidas. El valor de la rigidez de corte inferior es $R_L \sim 1.9$ GV, el de la rigidez de corte superior es $R_U \sim 2.3$ GV y el de la rigidez de corte efectiva, calculada usando la expresión (1.15), es $R_C \sim 2.10$ GV.*

La caótica estructura de la penumbra frustra el deseo de tener una sola cantidad para la rigidez de corte. Sin embargo, es posible obtener una rigidez de corte efectiva R_C usada en muchas aplicaciones que requieren precisamente de un único valor numérico para caracterizar el corte geomagnético. Se suele calcular esta rigidez de corte efectiva como un promedio de la forma:

$$R_C = R_U - \frac{n_p}{n}(R_U - R_L) \quad (1.15)$$

donde n es el número total de trayectorias prohibidas y permitidas dentro de la penumbra y n_p el número de trayectorias permitidas en dicha región. Si los cálculos numéricos fueron realizados usando un intervalo de rigidez $\Delta R = (R_U - R_L)/n$, la expresión (1.15) se escribe como:

$$R_C = R_U - n_p \Delta R \quad (1.16)$$

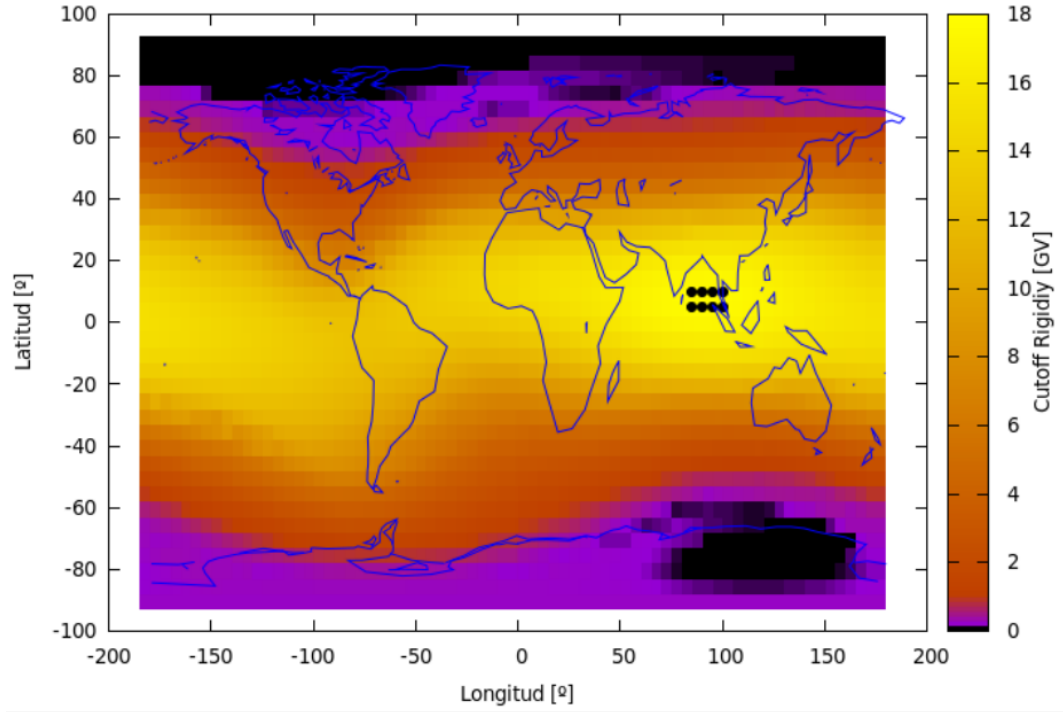


Figura 1.13: *Rigidez de corte efectiva R_C de incidencia vertical en todo el plano de la Tierra en una rejilla de $5^\circ \times 5^\circ$ en latitud y longitud geográfica, obtenida por [33] mediante simulaciones usando un modelo de campo geomagnético IGRF+TSY. Los puntos negros indican la región del máximo valor de la rigidez de corte efectiva.*

1.9. Magnetocosmics

Magnetocosmics o Magcos es un código basado en Geant4 que calcula las trayectorias de partículas cargadas que ingresan a la magnetósfera terrestre. Este programa emplea diferentes modelos de campo geomagnético interno y externo, entre ellos el IGRF/DGRF, Tsyganenko89, Tsyganenko96 y Tsyganenko2001. Las principales aplicaciones de Magcos son:

- El cálculo de direcciones asintóticas de incidencia.
- El cálculo de la rigidez de corte geomagnético (R_U , R_L y R_C) en función de la posición, dirección y tiempo.
- La visualización de las trayectorias de las partículas y las líneas de campo magnético.

Para calcular la trayectoria de un rayo cósmico en el campo geomagnético, se integra numéricamente la ecuación de Lorentz (ecuación (1.12)). Para trazar las líneas de campo magnético, se considera una ecuación diferencial adicional, la cual define el movimiento paralelo al campo. Magcos emplea métodos de integración numérica como Euler implícito y explícito, Runge

Kutta de tercer y cuarto orden, y KashKarper. Para más información relativa a MAGNETO-COSMICS, se puede consultar [12].

1.10. CORSIKA

CORSIKA, COsmic Ray SIMulations for KAScade por sus siglas en inglés, es un programa Monte Carlo para la simulación detallada de lluvias aéreas extensas iniciadas por rayos cósmicos de alta energía (primarios). Este código fue desarrollado para realizar simulaciones para el experimento KASCADE en Karlsruhe, Alemania. Este experimento fue diseñado para estudiar lluvias aéreas iniciadas por primarios de energías entre 3×10^{14} eV y 1×10^{17} eV. Luego fue actualizado a KASCADE-Grande, alcanzando los 10^{18} eV. Protones, núcleos livianos hasta el hierro ($1 \leq Z_p \leq 26$), fotones y muchas otras partículas pueden ser usados como primarios en CORSIKA. Este código permite simular interacciones y decaimientos de primarios y secundarios en la atmósfera hasta energías del orden de 10^{20} eV, proporcionando el tipo, energía, ubicación, dirección y tiempos de llegada de todas las partículas secundarias creadas en una lluvia y que alcanzan un nivel de observación seleccionado.

CORSIKA consta básicamente de cuatro partes. La primera parte se encarga del decaimiento de partículas inestables, y el seguimiento de las partículas teniendo en cuenta pérdidas de energía por ionización y deflexiones debidas a dispersiones múltiples y al campo geomagnético. La segunda y tercera parte simulan las interacciones hadrónicas con los núcleos de aire a altas y bajas energías respectivamente. La cuarta parte describe el transporte y la interacción de electrones, positrones y fotones. Para las interacciones hadrónicas de alta energía están disponibles los modelos: VENUS, QGSJET, DPMJET, SIBYLL y HDPM. Las interacciones hadrónicas de baja energía pueden ser descritas por las sofisticadas rutinas de interacción GHEISHA o por un modelo más simple, el ISOBAR. Para las interacciones electromagnéticas se puede emplear el programa de lluvias EGS4 o las fórmulas analíticas NKG. CORSIKA también posee opciones para la generación de radiación Cherenkov y neutrinos.

CORSIKA es un conjunto completo de rutinas FORTRAN estándar. No utiliza librerías adicionales de programas para la simulación de las lluvias aéreas y corre en casi toda máquina donde FORTRAN esté disponible. Para más información sobre la estructura de CORSIKA y los distintas opciones que ofrece, ver [40] y [13].

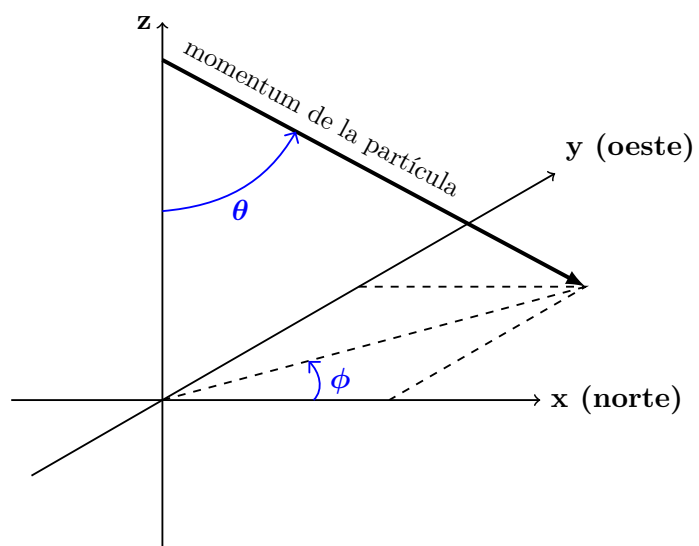


Figura 1.14: *Sistema de coordenadas en CORSIKA.*

Capítulo 2

Consideraciones generales sobre los cálculos

2.1. Selección de las trayectorias y obtención de los datos

Se seleccionaron cinco rutas que cubren la mayoría del globo terráqueo y por tanto presentan una amplia variabilidad geomagnética: las rigideces de corte verticales ($\theta = 0^\circ$) varían de casi 0 a 15 GV y para ángulos cenitales mayores llegan incluso a 60 GV, esto es en condiciones seculares y a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar. Los vuelos seleccionados y sus tiempos de duración se presentan en la tabla (2.1) y gráficamente se muestran en la figura (2.1). Las trayectorias de vuelo Bogotá (SKBO) - Buenos Aires (SAEZ), Buenos Aires (SAEZ) - Madrid (LEMD) y Sao Paulo (SBGR) - Johannesburgo (FAOR) son de interés porque atraviesan la Anomalía del Atlántico Sur, que es una región en donde los cinturones de radiación de Van Allen hacen su más próximo acercamiento a la superficie del planeta, causando que el campo geomagnético sea especialmente débil en esa zona. Las otras dos rutas, Johannesburgo (FAOR) - Sydney (YSSY) y Nueva York (KJFK) - Tokyo (RJAA), son de especial interés porque son próximas a los polos Sur y Norte respectivamente, que son regiones donde las rigideces de corte son muy bajas y por ende el blindaje del campo geomagnético es menos efectivo.

Los datos de las trayectorias fueron obtenidos de la herramienta en línea *FlightAware*¹, los cuales proporcionaban información sobre la hora (hh:mm:ss), posición (latitud, longitud), altura y velocidad del avión aproximadamente cada minuto. Cada línea de este archivo no correspondía exactamente con cada minuto desde el comienzo del vuelo sino que en ocasiones había saltos de algunos minutos entre las líneas o había líneas sucesivas con información para el mismo minuto, con diferencia de algunos segundos. Para hacer los cálculos, se buscaba dividir cada trayectoria en intervalos de media hora y de cada uno de estos intervalos seleccionar un punto representativo que caracterizaría geomagnéticamente a todo el intervalo de

¹Ver <http://flightaware.com/>

treinta minutos. Preferiblemente este punto característico debía estar ubicado en la mitad de cada tramo. Con el fin de obtener el formato deseado para los cálculos, era entonces necesario hacer una limpieza de los datos crudos descargados de la web. Cada archivo de datos crudos correspondiente a cada una de las trayectorias, fue dividido en intervalos de media hora y de cada intervalo se seleccionó aquella línea correspondiente a la mitad del intervalo temporal o en caso de que no existiera dicha línea, se seleccionó aquella que estuviera más cercana a esta mitad. De la información contenida en esta línea se tomó únicamente los datos de hora en formato hh:mm y la posición geográfica (latitud y longitud), descartando la velocidad del avión y la altura del vuelo, pues para las simulaciones no era relevante la velocidad de la aeronave y se asumió una altura constante de 11 km durante cada recorrido. Esta limpieza de los datos fue hecha mediante un código en python. Los resultados para cada una de las trayectorias se muestran en las tablas (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), en las cuales se presenta el tiempo transcurrido entre el inicio del recorrido y el paso del avión por cada uno de los puntos característicos, en vez de la hora del día (hh:mm) en la que esto ocurre.

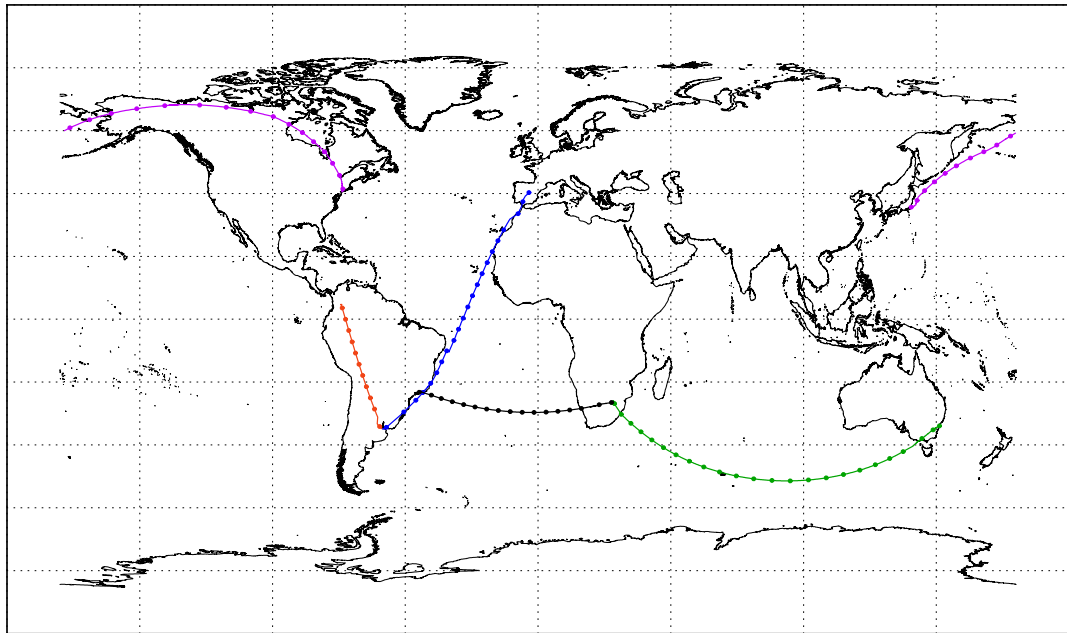


Figura 2.1: *Rutas de vuelo seleccionadas. Cada ruta fue dividida en tramos de media hora de vuelo, se asumió que la rigidez de corte (y por tanto el flujo de secundarios) a lo largo de cada uno de estos era constante e igual a la rigidez de corte de un único punto sobre el tramo. Dichos puntos característicos se muestran como círculos sólidos. Las líneas sólidas representan las trayectorias graficadas tal como fueron extraídas de FlightAware (ver <http://flightaware.com/>). Los datos y el código que permitieron construir el mapamundi fueron tomados de internet (ver <http://www.gnuplotting.org/plotting-the-world/> y <http://www.gnuplotting.org/plotting-the-world-revisited/>).*

Ciudad (aeropuerto)		Duración del vuelo hh:mm
Origen	Destino	
Bogotá (SKBO)	Buenos Aires (SAEZ)	5:36
Buenos Aires (SAEZ)	Madrid (LEMD)	11:25
Sao Paulo (SBGR)	Johannesburgo (FAOR)	8:24
Johannesburgo (FAOR)	Sydney (YSSY)	11:40
Nueva York (KJFK)	Tokyo (RJAA)	12:51

Tabla 2.1: *Los cinco vuelos investigados y sus duraciones. Aparecen las ciudades de origen y destino con sus respectivos aeropuertos, designados según el código de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional).*

Punto	Latitud	Longitud	Tiempo (min)
1	3.5810	286.2461	15
2	-0.0068	287.4882	45
3	-3.5954	288.7368	75
4	-7.1823	289.9954	105
5	-10.7657	291.274	135
6	-14.3438	292.5834	165
7	-17.9144	293.9352	195
8	-21.4753	295.3427	225
9	-25.0238	296.8207	255
10	-28.5569	298.3866	285
11	-34.1175	300.3282	315

Tabla 2.2: *Puntos característicos seleccionados para el vuelo Bogotá - Buenos Aires.*

Punto	Latitud	Longitud	Tiempo (min)
1	-34.3805	302.8822	15
2	-29.5090	309.4137	69
3	-25.7956	313.9516	109
4	-23.3388	316.6281	135
5	-20.3811	319.5893	165
6	-17.0379	321.8288	195
7	-13.5447	323.7524	225
8	-10.0372	325.6201	255
9	-6.7504	328.2921	285
10	-3.2039	330.0502	315
11	0.3456	331.7961	345
12	3.8948	333.5433	375
13	7.4403	335.3053	405
14	10.9787	337.0961	435
15	14.5065	338.9302	465
16	18.0195	340.8237	495
17	21.5134	342.7941	525
18	24.9830	344.8613	555
19	28.4224	347.0481	585
20	33.5756	352.4882	615
21	37.4098	354.2973	645
22	40.3150	356.5709	676

Tabla 2.3: *Puntos característicos seleccionados para el vuelo Buenos Aires - Madrid.*

Punto	Latitud	Longitud	Tiempo (min)
1	-26.8313	28.8105	15
2	-30.2376	31.3293	45
3	-33.0884	34.9362	75
4	-35.8172	38.7632	105
5	-38.4162	42.8559	135
6	-40.8626	47.2447	165
7	-43.1301	51.9572	195
8	-45.1899	57.0151	225
9	-47.0104	62.4296	255
10	-48.5921	68.3391	285
11	-49.8610	74.6352	315
12	-50.7759	81.2548	345
13	-51.3026	88.0689	375
14	-51.4272	94.9654	405
15	-51.1477	101.8327	435
16	-50.4739	108.5527	465
17	-49.4256	115.0347	495
18	-48.0301	121.2086	525
19	-46.3190	127.033	555
20	-44.3347	132.4675	585
21	-42.1046	137.5379	615
22	-37.9601	144.579	645
23	-35.1748	148.7564	675
24	-33.9047	151.1653	700

Tabla 2.4: *Puntos característicos seleccionados para el vuelo Johannesburgo - Sydney.*

Punto	Latitud	Longitud	Tiempo (min)
1	41.4668	286.4613	15
2	45.7923	285.2053	45
3	49.5833	282.6333	75
4	53.2833	279.55	105
5	56.5000	275.4833	135
6	59.3667	271.25	165
7	62.0333	266.1667	195
8	64.4667	260.2667	224
9	66.1414	251.801	255
10	67.4167	242.5779	285
11	68.1588	232.5487	315
12	67.9500	219.4167	345
13	66.9500	208.9	375
14	65.4667	199.3	405
15	63.4500	191.0667	435
16	60.8833	183.7	466
17	58.2667	177.9167	495
18	55.4167	172.7833	525
19	53.2833	167.8667	553
20	51.3000	162.8	581
21	48.7975	157.5317	615
22	46.3831	153.2704	645
23	43.7070	149.2721	675
24	40.9087	145.599	705
25	37.7714	142.7642	735
26	35.6375	140.4991	765

Tabla 2.5: *Puntos característicos seleccionados para el vuelo Nueva York - Tokyo.*

Punto	Latitud	Longitud	Tiempo (min)
1	-23.2350	315.2007	15
2	-24.1649	319.8194	47
3	-25.2193	323.5359	75
4	-26.2467	327.7176	105
5	-27.1510	331.9695	135
6	-27.9252	336.2856	165
7	-28.5631	340.6584	195
8	-29.0593	345.0786	225
9	-29.4095	349.5352	255
10	-29.6106	354.0159	285
11	-29.6608	358.5079	315
12	-29.5596	2.9975	345
13	-29.3078	7.4716	375
14	-28.9079	11.9172	405
15	-28.3633	16.3225	435
16	-27.2035	23.0051	465
17	-26.5120	27.6472	495

Tabla 2.6: *Puntos característicos seleccionados para el vuelo Sao Paulo - Johannesburgo.*

2.2. Simulación de las lluvias

Las simulaciones de las lluvias se realizaron utilizando el código CORSIKA (COsmic Ray Simulation for KAscade)[40] versión 7.3500 [13]. Se realizan dos simulaciones de lluvias con este código. La primera de ellas es genérica para cualquier punto de cualquiera de las trayectorias y representa una primera aproximación en el cálculo de las dosis recibidas en los vuelos. Se realiza una segunda simulación de lluvias en la ciudad de Bucaramanga con el fin de comparar el flujo de partículas en los vuelos con el flujo en esta ciudad. La única diferencia entre ambas simulaciones es la altura del punto de observación que se inserta como parámetro de entrada en CORSIKA: en el caso de las rutas de vuelo, se toma 11 km que es la altura promedio de los vuelos comerciales internacionales y en el caso de Bucaramanga se toma 959 m que es su altura media. Debido a los parámetros que se toman en las dos simulaciones de lluvias, específicamente por la selección de una rigidez de corte muy baja, ocurre una sobreestimación del flujo de secundarios y por ello se hace necesario un refinamiento posterior de estos cálculos mediante una corrección por campo geomagnético (ver sección (2.3)).

Los parámetros de instalación de CORSIKA que tienen un impacto directo sobre el resultado de las simulaciones son:

- Modelo hadrónico para interacciones a altas energías: QGSJET-II-04 (Quark Gluon String model with JETs, versión II-4).
- Modelo hadrónico para interacciones a bajas energías: GHEISHA-2002 (Gamma Hadron Electron Interaction SHower code).
- Modelo de interacciones electromagnéticas: EGS4 (Electron Gamma Shower, versión 4).
- Modelo de detector volumétrico: la intensidad de primarios sigue una distribución $I \propto \sin \theta$, donde el término $\sin \theta$ se debe a la proyección del ángulo sólido del cielo.
- Atmósfera curva, para simulación de primarios con ángulos cenitales grandes ($70^\circ < \theta < 90^\circ$). Al activar esta opción, para ángulos por encima de 70° , la atmósfera terrestre se modela como una atmósfera plana deslizante, es decir, cada vez que el desplazamiento horizontal de una partícula exceda cierto límite (de 6 a 20 km dependiendo de la altura) se realiza una transición a una nueva atmósfera localmente plana. Los cálculos en la aproximación de atmósfera plana resultan más simples que un tratamiento del problema usando un sistema esférico, lo cual también permite ahorrar tiempo de simulación [13].

Los parámetros de entrada seleccionados en las simulaciones de las lluvias, tanto de las rutas de vuelo como de Bucaramanga, fueron:

- Altura de observación: 11000 m.s.n.m en el caso de las rutas, que es la altura promedio de vuelo de los aviones comerciales. Y 959 m.s.n.m en el caso de las simulaciones en Bucaramanga. Este es el único parámetro diferente en ambas simulaciones.
- Modelo atmosférico: tropical. Este perfil atmosférico fue tabulado por [41] mediante MODTRAN y se encuentra en el paquete *bernlshr*² dentro de los archivos de instalación de CORSIKA.
- Campo geomagnético: correspondiente a la posición de Bucaramanga ($7^\circ 6' 47''\text{N}$, $73^\circ 7' 12''\text{W}$, 11000 m.s.n.m.): $B_N = 26.8444 \mu\text{T}$, $B_Z = 16.7863 \mu\text{T}$, calculados según el modelo IGRF11 [34, 35] mediante la herramienta en línea *NGDC Geomagnetic Calculators*³. En las simulaciones de las lluvias, la propagación de las partículas empieza a los 112.8 km, que es la altura a la cual comienza la atmósfera según CORSIKA. Para tratar las deflexiones que sufren las partículas en la atmósfera debido al campo geomagnético local, CORSIKA hace uso de la aproximación de campo homogéneo [42].
- Tiempo de flujo simulado: 2 horas. Este tiempo de simulación es representativo y no tiene repercusión en los resultados obtenidos puesto que el flujo de primarios es constante e isótropo.

²Para más detalles sobre los modelos atmosféricos tabulados y las rutinas (escritas en C) del paquete *bernlshr*, ver la documentación en la carpeta *bernlshr/* dentro de los archivos de instalación de CORSIKA.

³Ver <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>

- Superficie del detector: 1 m^2
- Características de los primarios inyectados: al estar trabajando en un rango de energías extenso, el espectro de primarios hace que en su amplia mayoría se produzcan primarios con energía cercana al límite inferior, que producen poca cantidad de secundarios. Sin embargo, fluctuaciones estadísticas pueden dar origen a primarios de muy alta energía que produzcan lluvias que dominen la distribución de secundarios a nivel del detector. Para solucionar este inconveniente se simuló el espectro de primarios de cada especie química según la ecuación (1.4) con la parametrización de la tabla (1.1) y se minimizó el efecto de las fluctuaciones estadísticas realizando un número elevado de simulaciones. La ecuación (1.7) nos permitió calcular el número total de primarios de cada especie a simular. Los primarios son inyectados en las simulaciones en la parte superior de la atmósfera, que CORSIKA define a 112.8 km de altura sobre el nivel del mar. Para este trabajo los parámetros de los primarios inyectados fueron:
 - Rango de primarios: $1 \leq Z_p \leq 26$, $1 \leq A_p \leq 56$
 - Rigidez de corte: $R_c = 1 \text{ GV}$. Esta rigidez de corte es muy baja y es casi siempre menor a la rigidez de corte de cualquier punto de las trayectorias de vuelo seleccionadas o de Bucaramanga para cualquier dirección de arribo del rayo cósmico primario. En caso tal que alguna rigidez de corte en alguno de los puntos de interés sea menor a 1 GV, como es el caso de las rutas New York - Tokyo y Johannesburgo - Sydney (ver figuras 3.7 y 3.10), los primarios con energías menores a 1 GeV que incidan en dichos puntos generarán una cantidad despreciable de secundarios a la altura de los vuelos comerciales [22]. Al seleccionar una rigidez de corte tan baja, se garantiza entonces que la cantidad de lluvias simuladas y por tanto de secundarios sea mayor a la cantidad de lluvias reales en cualquier punto de las trayectorias y en la ciudad de Bucaramanga para las direcciones y energías consideradas de los primarios inyectados.
 - Energía de primarios: $(R_c \times Z_p) \text{ GeV} \leq E_p \leq 1 \text{ PeV}$. El límite inferior de la energía de los primarios viene determinado por la rigidez de corte seleccionada ($R_c = 1 \text{ GV}$) y por la carga del primario Z_p ; el límite superior de la energía se toma como $E_{\text{máx}} = 1 \text{ PeV}$ debido a que a esa energía el flujo es tan bajo (ver gráfica 1.2) que la probabilidad de encontrar un primario de mayor energía es prácticamente despreciable para la duración de cualquier vuelo comercial.
 - Ángulo cenital: $0^\circ \leq \theta_p \leq 90^\circ$.
 - Ángulo azimutal: $0^\circ \leq \phi_p \leq 360^\circ$.

2.3. Cálculo de rigideces de corte y filtrado

La propagación de los primarios en CORSIKA comienza a una altura de 112.8 km y a partir de este punto el lugar y el núcleo blanco de la primera interacción son seleccionados aleatoriamente [40]. Como ya se mencionó, el número de primarios inyectados en las simulaciones se

determina mediante la ecuación (1.7), la cual no tiene en cuenta el campo geomagnético presente por encima de los 112.8 km. El único filtro geomagnético que se establece inicialmente en las simulaciones consiste en descartar aquellos primarios con rigidez menor a cierta rigidez de corte fija, en este caso $R_C = 1GV$, la cual es casi siempre menor a la rigidez de corte de cualquiera de los puntos de las trayectorias seleccionadas o de Bucaramanga. De manera que, inicialmente, al no tener en cuenta el efecto geomagnético por encima de la atmósfera y al seleccionar de manera arbitraria una rigidez de corte tan baja, se está sobreestimando el flujo de partículas primarias que inciden en la parte superior de la atmósfera y generan lluvias. Esto ocurre tanto en las simulaciones que se utilizaron para el cálculo de las dosis en las rutas como en la simulación de las lluvias en Bucaramanga. Cabe anotar que la única diferencia que existe entre estas dos simulaciones es la altura que se inserta como parámetro en las corridas de CORSIKA: en el caso de las simulaciones de las rutas se usa 11 km y en el caso de las simulaciones de Bucaramanga se usa 959 m. De manera que en ambos casos existe una subestimación de la cantidad de secundarios porque se está permitiendo el paso de primarios de baja energía que no debieran pasar debido a la restricción que impone el campo geomagnético en cada punto, la cual aún no ha sido tenido en cuenta.

Para realizar un cálculo más realista de las dosis recibidas, se debe considerar entonces dicho efecto geomagnético sobre los primarios inyectados a priori en las simulaciones de las lluvias. La restricción que impone el campo geomagnético al paso de los primarios se cuantifica mediante la rigidez de corte, la cual se define para cada dirección de incidencia en determinado punto de observación, tal como se vio en la sección (1.8). La estrategia consiste en calcular las rigideces de corte para determinadas direcciones de incidencia a una altura de 112.8 km en la posición geográfica (latitud y longitud) de Bucaramanga y de algunos puntos característicos de cada trayectoria. En el caso de las rutas de vuelo, se subdivide cada trayectoria en intervalos de media hora, se selecciona un punto característico de cada uno de estos intervalos y se asume que los valores de la rigidez de corte en dicho punto son los mismos para todo el intervalo.

Las rigideces de corte para cada punto característico de las rutas de vuelo y para Bucaramanga se calcularon con Magnetocosmics mediante el método de la trayectoria en reversa. Como se quiere encontrar la cantidad de partículas que inciden sobre los vuelos en condiciones geomagnéticas seculares y de tormenta, se debe calcular las rigideces de corte para cada punto característico de las trayectorias de vuelo primero tomando el índice DST nulo (condiciones seculares) y luego tomando el índice DST diferente de cero para reproducir condiciones de tormenta geomagnética. El índice DST en este último caso se tomará como -300 nT. Como nos interesa comparar el flujo de partículas en cada trayectoria con el flujo de partículas en Bucaramanga en condiciones seculares, solo consideraremos el índice DST igual a cero para los cálculos de las rigideces en Bucaramanga. Los parámetros utilizados para estos cálculos con Magnetocosmics fueron:

- Fecha de referencia: se usa la fecha por defecto del Magnetocosmics, que corresponde a las cero horas del primero de enero del año 2000. Esta fecha se utiliza para calcular los coeficientes de los modelos de campo geomagnético.

- Modelo de campo geomagnético interno: para distancias menores a cuatro radios terrestres medidas desde la superficie de la Tierra se usa el modelo de campo geomagnético IGRF de la novena generación.
- Modelo de campo geomagnético externo: para distancias mayores a cuatro radios terrestres medidas desde la superficie de la Tierra se usa el modelo de campo geomagnético Tsyganenko 2001.
- Índice DST: para hallar las rigideces de corte en condiciones seculares se utilizó un índice DST de 0 nT, mientras que para calcular las rigideces de corte en condiciones de tormenta geomagnética se utilizó un índice DST de -300 nT.
- Posición geográfica (latitud y longitud): viene dada por las coordenadas geográficas de cada uno de los puntos donde se quiere calcular las rigideces de corte.
- Altura: se toma para todos los casos como 112.8 km, que es la altura donde se encuentra el borde de la atmósfera.
- Ángulo cenital (θ): desde 0° hasta 90° con un paso o resolución de 5° .
- Ángulo azimutal (ϕ): desde 0° hasta 360° con un paso o resolución de 10° .

Los intervalos de ángulo cenital ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) y azimutal ($0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$) que fueron tomados definen una semiesfera centrada en cada punto de observación, la cual describe todas las posibles direcciones de incidencia de los primarios en dicho punto. Las resoluciones tomadas para el ángulo cenital ($\Delta\theta = 5^\circ$) y para el ángulo azimutal ($\Delta\phi = 10^\circ$) definen a su vez 703 intervalos de ángulo sólido que discretizan esta semiesfera y por tanto las posibles direcciones de incidencia. Los cálculos con Magnetocosmics arrojan los valores de la rigidez de corte superior R_U , la rigidez de corte efectiva R_C y la rigidez de corte inferior R_L para cada uno de estos 703 intervalos de ángulo sólido. Para realizar el filtrado de las partículas producidas en las simulaciones de CORSIKA se usa únicamente la rigidez de corte efectiva R_C .

A partir de los archivos de salida de las simulaciones de CORSIKA es posible inferir la dirección de incidencia y la rigidez de cada uno de los primarios que fueron inyectados en las simulaciones, así como rastrear cuál de estos primarios produjo cada uno de los secundarios de las lluvias. El filtrado se realiza comparando la rigidez de cada uno de los primarios inyectados con la rigidez de corte efectiva correspondiente a su dirección de incidencia, que es una de las 703 rigideces calculadas con Magnetocosmics. Si la rigidez del primario es menor a la correspondiente rigidez de corte, este se descarta de las simulaciones junto con los secundarios que produce. Caso contrario, si la rigidez del primario es mayor a la rigidez de corte, este se conserva junto con los secundarios que produce. Los datos de los primarios y secundarios conservados son reescritos en un nuevo archivo. Esto se debe hacer en cada uno de los puntos característicos de las trayectorias y en Bucaramanga.

2.4. Intensidad de muones como validación de las simulaciones

Los muones interaccionan débilmente con el medio a través del cual se propagan y pueden incluso penetrar grandes espesores de agua, hielo o roca. Con excepción de los fotones y los neutrinos, los muones conforman la componente más abundante de las partículas secundarias a nivel del mar. Los datos de muones dan información sobre procesos de alta energía en la atmósfera y sobre la radiación cósmica primaria, en particular sobre su espectro y composición. De manera que la información que existe sobre muones es mucho más abundante que la que existe sobre cualquier otra componente [23].

El muón es una partícula elemental que pertenece a la familia de los leptones, tiene una masa de aproximadamente 105 MeV (casi 200 veces mayor que la del electrón) y es una partícula inestable, con un tiempo de vida de $2.2 \mu s$ en el marco de reposo. Muchos de los muones son producidos a aproximadamente 15 km sobre el nivel del mar, a partir del decaimiento de mesones cargados, incluyendo piones y unos cuantos kaones [43]:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\nu_\mu^-) \quad (2.1)$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\nu_\mu^-) \quad (2.2)$$

A pesar de su corto tiempo de vida y debido a la dilatación relativista del tiempo, muchos de los muones sobreviven en la propagación en la atmósfera y alcanzan el suelo. Los muones y los neutrinos muónicos están asociados a través del decaimiento de piones y por tanto la medición de los muones en el lugar que son producidos puede ser usada para calibrar el flujo atmosférico de neutrinos muónicos. Los decaimientos más comunes de los muones son:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e^- + \nu_\mu \quad (2.3)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu^- \quad (2.4)$$

Por lo tanto, los muones juegan un papel importante en los experimentos actuales de oscilaciones de neutrinos. A pesar de ser inestables pero gracias a su gran masa, los muones tienen un alto poder de penetración. Durante su tiempo de vuelo, los muones pueden perder energía a través de dispersión de Coulomb, pérdidas por ionización, dispersión Compton y Bremsstrahlung. Como los muones son masivos, las pérdidas de energía se dan principalmente por ionización [44].

Los experimentos han mostrado que la intensidad de los muones depende fuertemente del ángulo cenital pero no del ángulo azimutal, lo cual se da porque los muones con ángulos cenitales mayores, comparados con aquellos con ángulos cenitales más pequeños, pierden más energía en el medio a través del cual se propagan porque deben atravesar mayor cantidad de materia. Por tanto, se espera que la intensidad de muones que inciden con un ángulo cenital grande y que alcanzan determinada profundidad sea menor que la intensidad de muones que inciden verticalmente [45]. Experimentalmente, la relación entre la intensidad de los muones y el ángulo cenital se expresa como:

$$I(p, \theta) = I(0^\circ) \cos^{n(p)}(\theta) , \quad (2.5)$$

donde el índice $n(p)$ depende del impulso de los muones. A partir de los experimentos, se ha encontrado que el ajuste sobre la distribución integrada para todas las energías arroja un valor para el exponente n , $n \approx 2$, por ello se dice que la distribución de muones atmosféricos sigue una distribución $\cos^2(\theta)$ [22, 43]. Ahora bien, al proyectar dicha intensidad sobre un detector volumétrico de área finita (1 m^2), la distribución de muones como función de θ estará dada por:

$$J(p, \theta) = J_0 \cos^{n(p)}(\theta) \sin(\theta) \quad (2.6)$$

donde el factor adicional $\sin \theta$ proviene de la proyección del ángulo sólido. Luego, se espera que la distribución de muones integrada para todas las energías sea del tipo:

$$J(\theta) = J_0 \cos^2(\theta) \sin(\theta) \quad (2.7)$$

A modo de validación de las dos simulaciones de lluvias hechas con CORSIKA, se estudió la distribución en el ángulo cenital del flujo de muones. Como se utilizó un modelo de detector volumétrico de 1 m^2 en ambas simulaciones, se espera una distribución de muones tipo $\cos^2(\theta) \sin(\theta)$. En la figura 2.2 se muestra la distribución de muones para la simulación de Bucaramanga, junto con el mejor ajuste de la función (2.7), dado por:

$$J(\theta) = (1.639 \pm 0.009) \times 10^5 (\cos \theta)^{(2.032 \pm 0.009)} (\sin \theta)^{(0.992 \pm 0.005)} \quad (2.8)$$

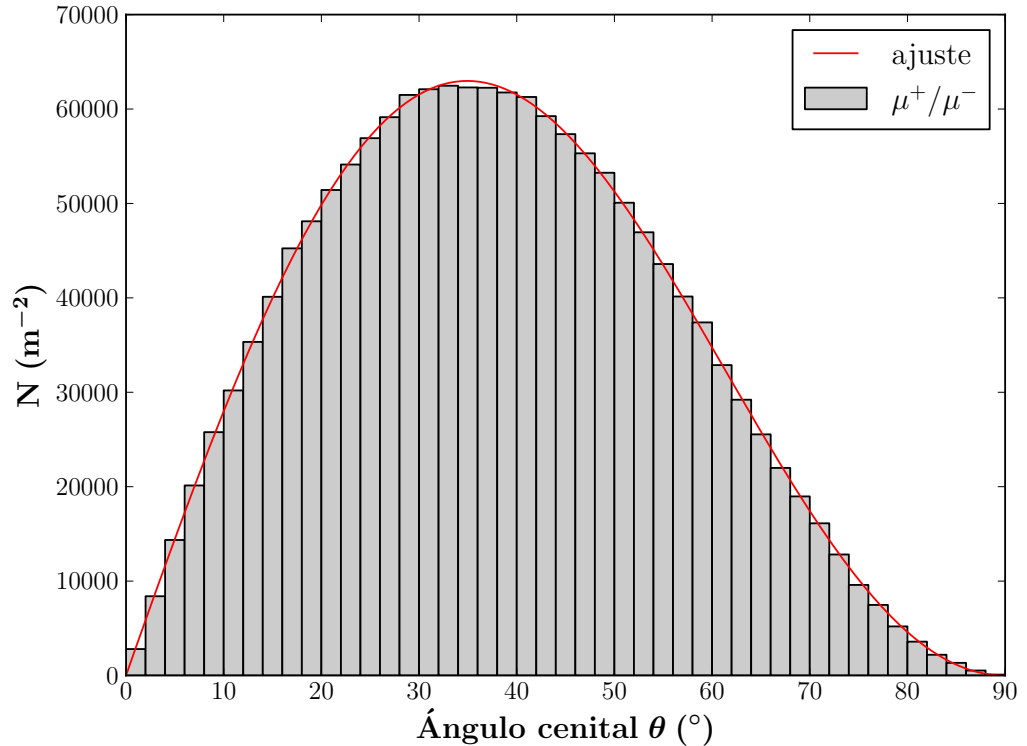


Figura 2.2: Distribución angular de los muones para la simulación de lluvias en Bucaramanga, siguiendo una ley del tipo $\cos^2(\theta) \sin(\theta)$, junto con el mejor ajuste dado por la ecuación (2.8)

De igual manera, en la figura 2.3 se muestra la distribución de muones para la simulación genérica de las trayectorias junto con el mejor ajuste de la función (2.7):

$$J(\theta) = (1.277 \pm 0.016) \times 10^6 (\cos \theta)^{(1.891 \pm 0.019)} (\sin \theta)^{(1.093 \pm 0.012)} \quad (2.9)$$

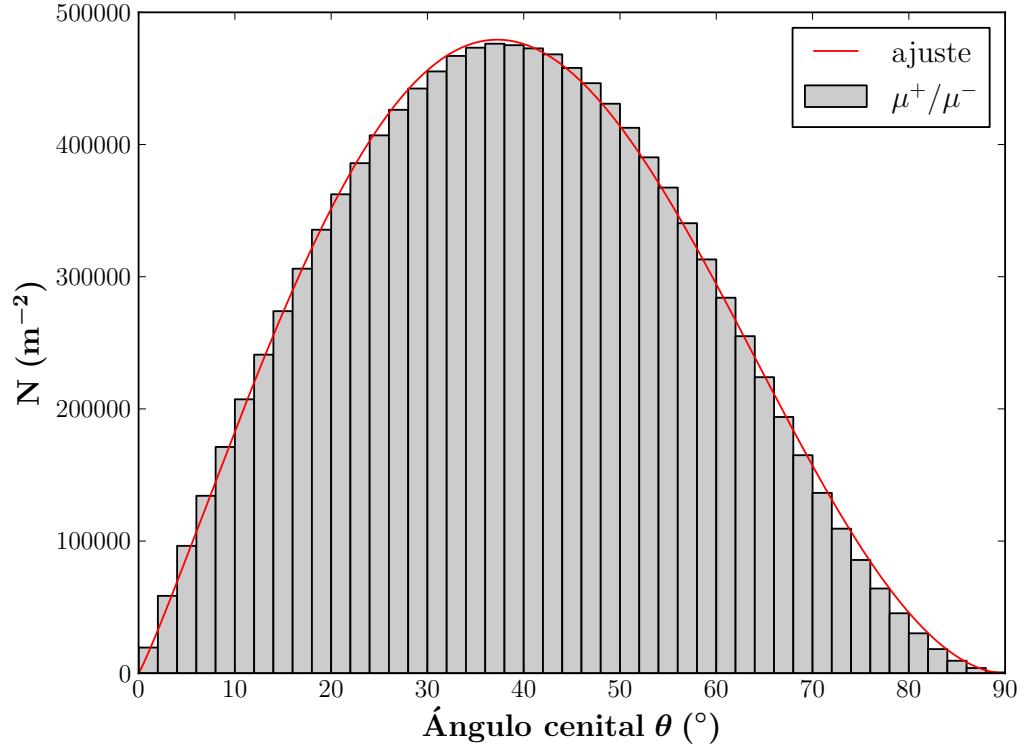


Figura 2.3: *Distribución angular de los muones para la simulación de lluvias genérica de las trayectorias, siguiendo una ley del tipo $\cos^2(\theta) \sin(\theta)$, junto con el mejor ajuste dado por la ecuación (2.9)*

En ambos casos se verifica muy bien lo esperado para la distribución en el ángulo cenital de los muones.

2.5. Aproximaciones en las simulaciones de las lluvias

Con el fin de ahorrar espacio en memoria y tiempo de máquina se siguió el método descrito anteriormente, el cual consistía básicamente en realizar una simulación de lluvias genérica y luego realizar un filtrado de estas partículas con las rigideces de corte de los puntos característicos de las trayectorias. Es de notar que en este proceso se realizan dos aproximaciones

importantes de las cuales vale la pena estudiar su validez. Primero que todo, se está utilizando únicamente el modelo atmosférico tropical para hacer los cálculos en las cinco trayectorias seleccionadas; sin embargo, estas trayectorias incluyen latitudes ecuatoriales, medias y polares y además los vuelos pueden darse en cualquier estación del año. De manera que un cálculo más refinado, pero menos eficiente computacionalmente, debería incluir diferentes modelos atmosféricos según la trayectoria que se quiera analizar y según la época del año. Por otro lado, a lo largo de todas las trayectorias se está asumiendo un campo geomagnético constante e igual al campo geomagnético en Bucaramanga a 11 km de altura.

Para las simulaciones de las lluvias, es posible utilizar nueve modelos atmosféricos que se encuentran tabulados dentro del paquete *bernlahr* en los archivos de instalación de CORSIKA. Estos modelos son: tropical, verano latitud media, invierno latitud media, verano subártico, invierno subártico, estándar EE.UU., verano mágico, invierno mágico, invierno antártico - polo sur. En la tabla 2.7 se presenta la profundidad atmosférica a 11 km de altura de los diferentes modelos atmosféricos y su diferencia relativa porcentual con el modelo tropical, calculada como:

$$\Delta = \frac{X_T - X_i}{(X_T + X_i)/2} \times 100\%$$

donde X_T es la profundidad atmosférica a 11 km de altura para el modelo tropical y X_i es la profundidad atmosférica a esta altura para cualquier otro modelo. Se ve en esta tabla que el modelo atmosférico tropical es el de mayor profundidad atmosférica, lo cual implica que las partículas de las lluvias deben atravesar una mayor cantidad de aire para llegar al punto de observación. Las mayores diferencias se presentan con los modelos de invierno subártico, cerca al polo norte, y de invierno antártico - polo sur, con los cuales difiere en un 18 % y un 27 % respectivamente.

Cabe recordar que es en los polos también donde se producen las mayores variaciones del campo geomagnético comparado con el ecuador. Por ello, para medir el efecto combinado de estas dos aproximaciones sobre el flujo de secundarios, se escogieron dos puntos característicos de las trayectorias que estuvieran lo más cerca posible a los polos y se hicieron simulaciones de lluvias con las componentes de campo geomagnético en dichos puntos y con los modelos atmosféricos de invierno subártico e invierno antártico - polo sur respectivamente.

El punto característico más cercano al polo sur corresponde al punto número 14 de la trayectoria Johannesburgo - Sydney, ver tabla 2.4, el cual tiene latitud -51.4272° y longitud 94.9654° . Las componentes del campo geomagnético en este punto, calculadas según el modelo IGRF11 mediante la herramienta en línea *NGDC Geomagnetic Calculators*⁴, son $B_N = 7.9824 \mu\text{T}$ y $B_Z = -57.9917 \mu\text{T}$. El punto característico más cercano al polo norte corresponde al punto número 11 de la ruta Nueva York - Tokyo, ver tabla 2.5, el cual tiene latitud 68.1588° y longitud 232.5487° . Las componentes del campo geomagnético en este punto, calculadas según el modelo IGRF11 mediante la herramienta en línea *NGDC Geomagnetic Calculators*, son

⁴Ver <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>

Modelo	X [g/cm^2]	Δ (%)
Tropical	2.54E+02	0.00
Verano latitud media	2.49E+02	1.97
Invierno latitud media	2.26E+02	11.86
Verano subártico	2.36E+02	7.42
Invierno subártico	2.12E+02	18.15
Estándar EE.UU.	2.33E+02	8.71
Verano mágico	2.53E+02	0.23
Invierno mágico	2.47E+02	2.58
Invierno antártico - polo sur	1.94E+02	26.92

Tabla 2.7: *Comparación de distintos tipos de modelos atmosféricos. Las profundidades atmosféricas fueron extraídas de las tablas de perfiles atmosféricos que se encuentran en los archivos de instalación de CORSIKA, que son de dominio público.*

$B_N = 7.1164 \mu\text{T}$ y $B_Z = 57.4139 \mu\text{T}$. Se hicieron simulaciones de lluvias a una altura de 11 km para cada uno de estos puntos utilizando sus respectivas componentes de campo geomagnético y el modelo atmosférico apropiado: invierno subártico para la ruta Nueva York - Tokyo e invierno antártico - polo sur para la ruta Johannesburgo - Sydney. El flujo de partículas obtenido en cada uno de los casos fue comparado con el flujo de partículas que se obtuvo para la simulación genérica de las lluvias mediante el cálculo de una diferencia relativa porcentual:

$$\%D = \frac{N_{\text{polo}} - N_{\text{gen}}}{N_{\text{polo}}} \times 100 \%, \quad (2.10)$$

donde N_{polo} es el número de partículas de la simulación en alguno de los polos y N_{gen} el número de partículas de la simulación genérica. Los resultados de esto se muestran en las tablas 2.8 y 2.9. Dado que es en los polos donde el modelo atmosférico y el campo geomagnético difieren en mayor medida con el modelo atmosférico y el campo en el trópico, entonces los valores reportados en estas tablas pueden tomarse como un estimado de un límite superior de la validez de las simulaciones genéricas. Para latitudes medias, las diferencias deberían ser menores a las que se encuentran en estas tablas.

Esp.	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	Otros	Total
$\%D$	31.5 %	34.5 %	33.5 %	26.2 %	24.9 %	35.6 %	46.3 %	46.4 %	32.5 %

Tabla 2.8: *Diferencia relativa porcentual entre el número de partículas (2.10) obtenido en la simulación en un punto de la ruta Johannesburgo Sydney y el obtenido en la simulación genérica de las trayectorias.*

Esp.	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	<i>Otros</i>	<i>Total</i>
%D	23.4 %	25.3 %	24.7 %	14.8 %	14.2 %	26.2 %	34.7 %	33.0 %	24.0 %

Tabla 2.9: *Diferencia relativa porcentual entre el número de partículas (2.10) obtenido en la simulación en un punto de la ruta Nueva York - Tokyo y el obtenido en la simulación genérica de las trayectorias.*

Capítulo 3

Resultados

Para modelar el campo geomagnético en condiciones seculares y de tormenta, se tomaron índices DST de 0 nT y -300 nT respectivamente como parámetros de entrada en los cálculos de rigideces de corte que se hicieron con Magnetocosmics para las posiciones geográficas de Bucaramanga y de cada uno de los puntos característicos de las trayectorias. Con estas rigideces se hizo el filtrado de las lluvias simuladas con CORSIKA y para cada una de las trayectorias se comparó la cantidad de partículas incidentes cuando el campo geomagnético está presente y cuando está ausente (sección 3.1), así como también se comparó la dosis que se recibe en cada uno de los vuelos con la dosis recibida en Bucaramanga (sección 3.2).

3.1. Estudio del efecto geomagnético

Para cada una de las cinco trayectorias, se busca cuantificar el efecto de blindaje que produce el campo geomagnético, es decir, observar en qué proporción disminuye la cantidad de partículas cuando se hace el filtrado de las lluvias mediante las tablas de rigideces. Básicamente, lo que se hace es comparar la cantidad total de partículas recibidas en cada una de las trayectorias con la cantidad de partículas que hubieran incidido si el campo geomagnético no hubiera estado presente.

Como fue descrito en la sección 2.3, para cada punto de observación fueron calculadas una serie de rigideces de corte que dependían de la dirección de incidencia del primario (ángulos cenital y azimutal). Sin embargo, para dar una muestra de estas rigideces calculadas con Magnetocosmics y su variación a lo largo de cada trayectoria, se grafica la rigidez de corte efectiva media en función del tiempo de vuelo para algunos ángulos cenitales en condiciones seculares y de tormenta y la diferencia relativa porcentual entre estas dos, calculada como:

$$\%D_{RC} = \frac{R_{C-sec} - R_{C-tor}}{R_{C-sec}} \times 100 \%. \quad (3.1)$$

Para determinado ángulo cenital, dicha rigidez de corte media se calcula promediando las rigideces efectivas correspondientes a los distintos ángulos azimutales. Tanto para las simulaciones en condiciones seculares como de tormenta geomagnética, se muestra el número total de partículas N que inciden en cada una de las trayectorias por metro cuadrado por especie (fotones, positrones, electrones, muones, neutrones, protones, otras partículas y el total), el flujo J de estas partículas, y la fracción del número total de partículas correspondientes a cada especie. El flujo J no es otra cosa que el número de partículas que inciden por metro cuadrado por segundo:

$$J = \frac{N}{t_{\text{vuelo}}} \quad [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (3.2)$$

Se muestra también el número total de partículas descartadas en cada vuelo ΔN debido a la corrección por campo geomagnético, es decir,

$$\Delta N = N_{\text{sin CG}} - N_{\text{con CG}}, \quad (3.3)$$

donde $N_{\text{sin CG}}$ y $N_{\text{con CG}}$ son el número total de partículas sin corrección por campo geomagnético y con esta corrección respectivamente; el flujo de partículas descartadas definido como

$$\Delta J = J_{\text{sin CG}} - J_{\text{con CG}} \quad (3.4)$$

y la diferencia relativa de partículas descartadas calculada respecto al número de partículas sin corrección por campo geomagnético, es decir,

$$\%D_N = \frac{N_{\text{sin CG}} - N_{\text{con CG}}}{N_{\text{sin CG}}} \times 100 \%. \quad (3.5)$$

Finalmente, se grafica esta diferencia relativa en función del impulso de las partículas; en esta sección se muestra solo para el total de las partículas, en el apéndice [A](#) se muestra estas gráficas para cada especie. Como era de esperarse, la corrección del flujo de primarios por campo geomagnético afecta solamente a secundarios de baja energía.

3.1.1. Efecto geomagnético sobre la ruta Bogotá - Buenos Aires

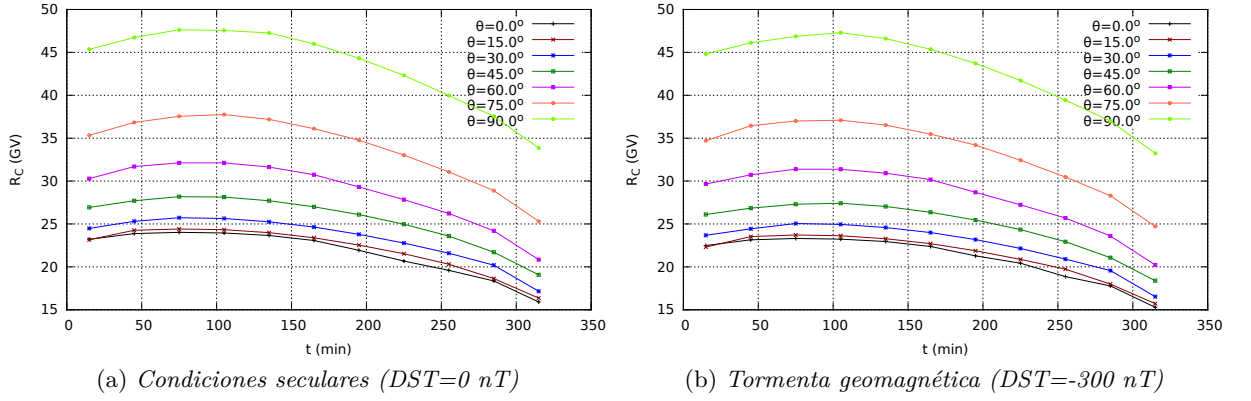


Figura 3.1: Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Bogotá - Buenos Aires

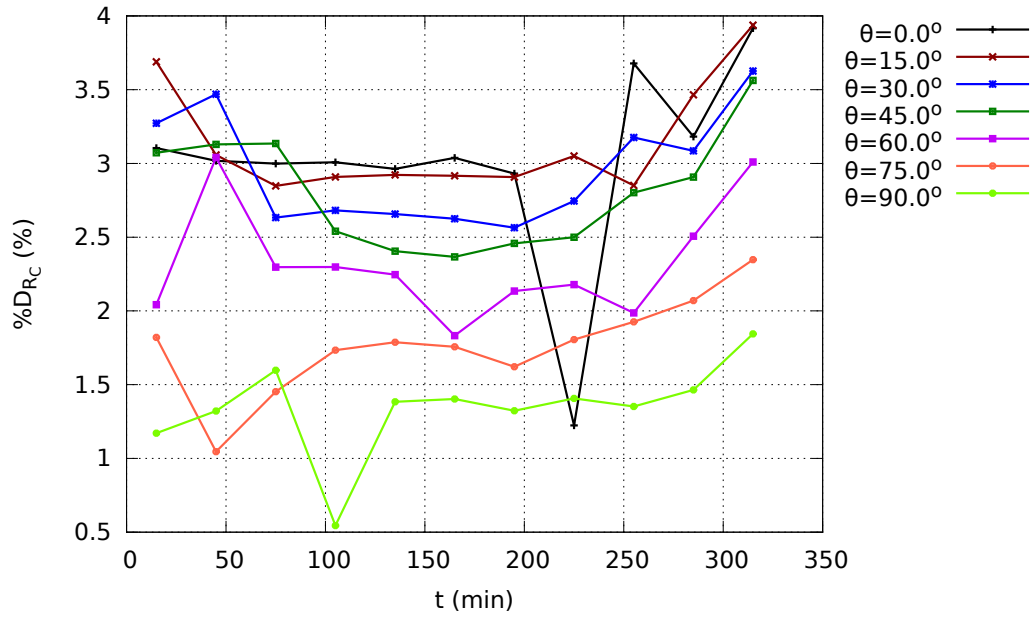


Figura 3.2: Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Bogotá - Buenos Aires, calculada según la expresión (3.1).

Especie	N(m⁻²)	J(m⁻²s⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m⁻²)	ΔJ(m⁻²s⁻¹)	%D_N
γ	8.51E+08	42959	84.2 %	6.70E+08	33861	44.1 %
e^+	3.53E+07	1783	3.5 %	2.40E+07	1211	40.4 %
e^-	6.27E+07	3166	6.2 %	4.36E+07	2200	41.0 %
μ^+	1.04E+07	526	1.0 %	6.94E+06	351	40.0 %
μ^-	9.84E+06	497	1.0 %	5.64E+06	285	36.4 %
n^0	3.02E+07	1524	3.0 %	1.42E+08	7163	82.5 %
p^+	1.09E+07	553	1.1 %	3.99E+07	2014	78.5 %
<i>Otros</i>	3.26E+05	16	0.0 %	2.20E+05	11	40.3 %
<i>Total</i>	1.01E+09	51024	100.0 %	9.32E+08	47096	48.0 %

Tabla 3.1: *Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Bogotá - Buenos Aires en condiciones seculares (DST=0 nT).*

Especie	N(m⁻²)	J(m⁻²s⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m⁻²)	ΔJ(m⁻²s⁻¹)	%D_N
γ	8.61E+08	43499	84.1 %	6.60E+08	33321	43.4 %
e^+	3.57E+07	1804	3.5 %	2.36E+07	1190	39.7 %
e^-	6.34E+07	3204	6.2 %	4.28E+07	2162	40.3 %
μ^+	1.06E+07	533	1.0 %	6.80E+06	343	39.2 %
μ^-	9.97E+06	504	1.0 %	5.51E+06	278	35.6 %
n^0	3.12E+07	1575	3.0 %	1.41E+08	7112	81.9 %
p^+	1.13E+07	570	1.1 %	3.95E+07	1997	77.8 %
<i>Otros</i>	3.30E+05	17	0.0 %	2.17E+05	11	39.6 %
<i>Total</i>	1.02E+09	51706	100.0 %	9.19E+08	46414	47.3 %

Tabla 3.2: *Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Bogotá - Buenos Aires en condiciones de tormenta (DST=-300 nT).*

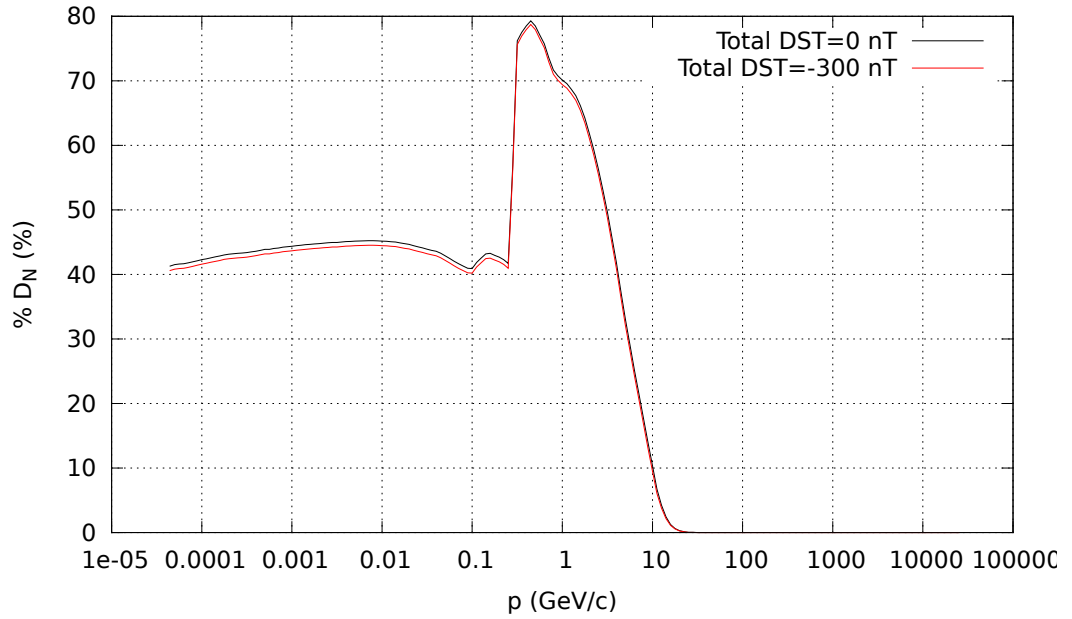


Figura 3.3: *Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares (negra) y de tormenta (roja) para la ruta Bogotá - Buenos Aires, calculada según la ecuación (3.5).*

3.1.2. Efecto geomagnético sobre la ruta Buenos Aires - Madrid

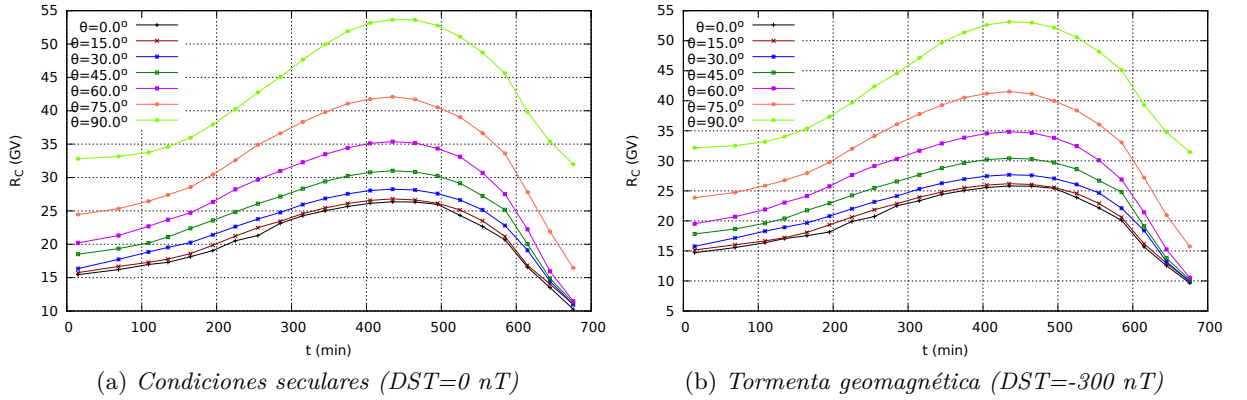


Figura 3.4: *Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Buenos Aires - Madrid*

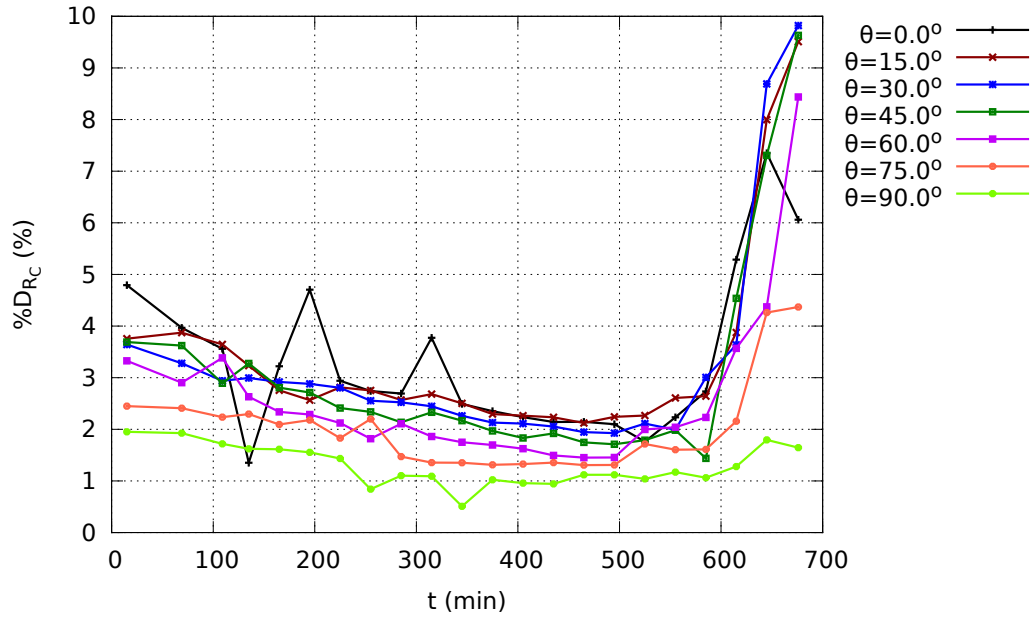


Figura 3.5: Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Buenos Aires - Madrid, calculada según la expresión (3.1).

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	$\%D_N$
γ	1.74E+09	43815	84.0 %	1.31E+09	33005	43.0 %
e^+	7.19E+07	1814	3.5 %	4.67E+07	1179	39.4 %
e^-	1.28E+08	3224	6.2 %	8.48E+07	2143	39.9 %
μ^+	2.12E+07	536	1.0 %	1.35E+07	340	38.8 %
μ^-	2.01E+07	506	1.0 %	1.09E+07	276	35.3 %
n^0	6.47E+07	1633	3.1 %	2.79E+08	7054	81.2 %
p^+	2.32E+07	586	1.1 %	7.84E+07	1981	77.2 %
Otros	6.63E+05	17	0.0 %	4.30E+05	11	39.4 %
Total	2.06E+09	52131	100.0 %	1.82E+09	45989	46.9 %

Tabla 3.3: Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Buenos Aires - Madrid en condiciones seculares ($DST=0$ nT).

Espece	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	% D_N
γ	1.76E+09	44417	84.0 %	1.28E+09	32403	42.2 %
e^+	7.28E+07	1837	3.5 %	4.58E+07	1156	38.6 %
e^-	1.29E+08	3266	6.2 %	8.32E+07	2101	39.1 %
μ^+	2.15E+07	544	1.0 %	1.32E+07	332	37.9 %
μ^-	2.03E+07	513	1.0 %	1.06E+07	269	34.4 %
n^0	6.73E+07	1700	3.2 %	2.77E+08	6987	80.4 %
p^+	2.41E+07	608	1.1 %	7.76E+07	1959	76.3 %
Otros	6.71E+05	17	0.0 %	4.22E+05	11	38.6 %
Total	2.09E+09	52902	100.0 %	1.79E+09	45218	46.1 %

Tabla 3.4: Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Buenos Aires - Madrid en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT).

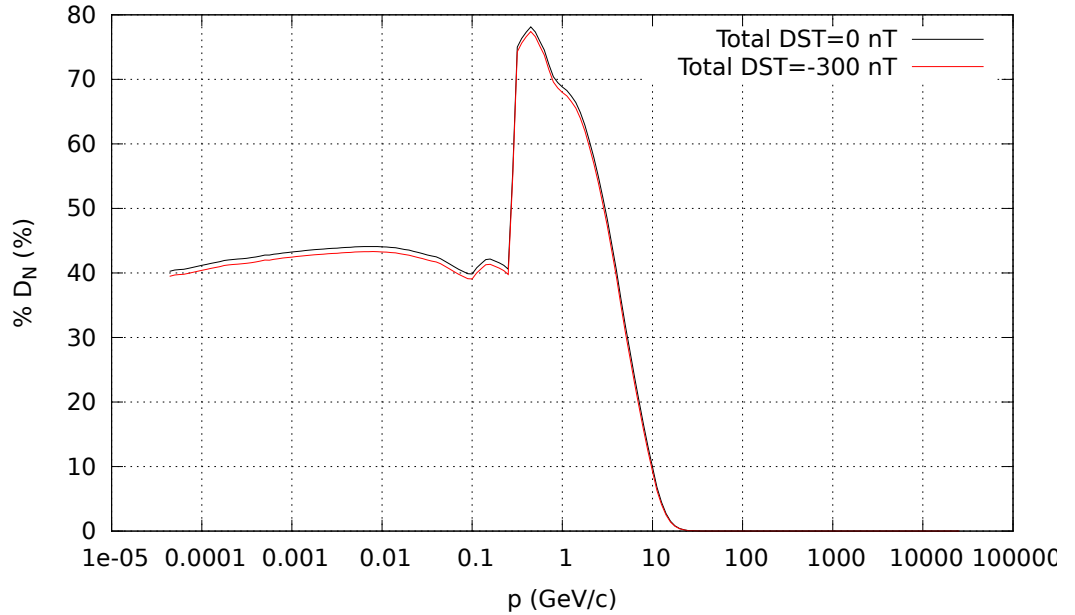


Figura 3.6: Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares (negra) y de tormenta (roja) para la ruta Buenos Aires - Madrid, calculada según la ecuación (3.5).

3.1.3. Efecto geomagnético sobre la ruta Johannesburg - Sydney

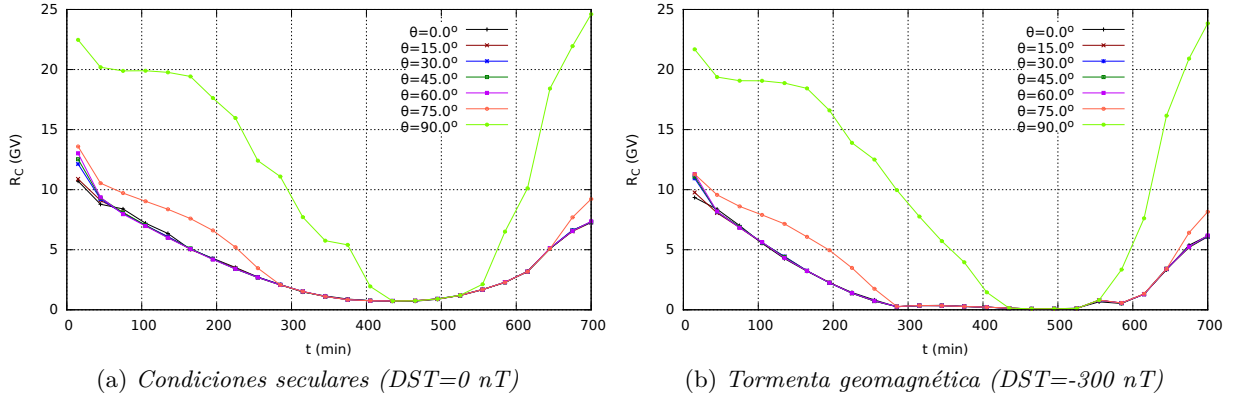


Figura 3.7: Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Johannesburg - Sydney

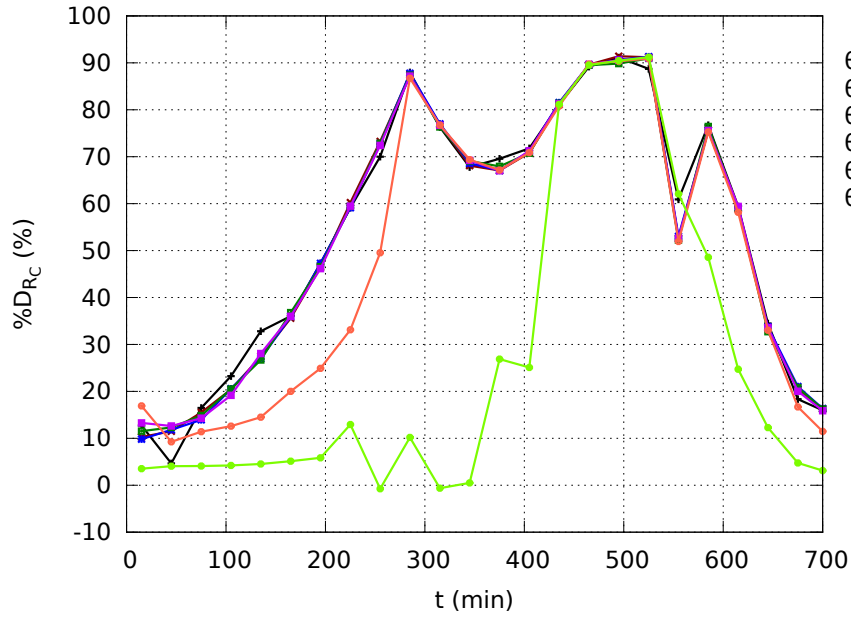


Figura 3.8: Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Johannesburg - Sydney, calculada según la expresión (3.1).

Especie	N(m⁻²)	J(m⁻²s⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m⁻²)	ΔJ(m⁻²s⁻¹)	%D_N
γ	3.10E+09	71659	79.4 %	2.23E+08	5162	6.7 %
e^+	1.22E+08	2824	3.1 %	7.32E+06	170	5.7 %
e^-	2.18E+08	5050	5.6 %	1.37E+07	317	5.9 %
μ^+	3.62E+07	839	0.9 %	1.61E+06	37	4.2 %
μ^-	3.27E+07	756	0.8 %	1.11E+06	26	3.3 %
n^0	3.00E+08	6937	7.7 %	7.56E+07	1750	20.1 %
p^+	9.14E+07	2116	2.3 %	1.95E+07	450	17.5 %
<i>Otros</i>	1.13E+06	26	0.0 %	6.07E+04	1	5.1 %
<i>Total</i>	3.90E+09	90207	100.0 %	3.42E+08	7913	8.1 %

Tabla 3.5: *Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Johannesburgo - Sydney en condiciones seculares (DST=0 nT).*

Especie	N(m⁻²)	J(m⁻²s⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m⁻²)	ΔJ(m⁻²s⁻¹)	%D_N
γ	3.16E+09	73087	79.1 %	1.61E+08	3733	4.9 %
e^+	1.24E+08	2872	3.1 %	5.25E+06	122	4.1 %
e^-	2.22E+08	5139	5.6 %	9.82E+06	227	4.2 %
μ^+	3.67E+07	850	0.9 %	1.12E+06	26	3.0 %
μ^-	3.30E+07	764	0.8 %	7.64E+05	18	2.3 %
n^0	3.20E+08	7408	8.0 %	5.53E+07	1279	14.7 %
p^+	9.68E+07	2241	2.4 %	1.41E+07	326	12.7 %
<i>Otros</i>	1.15E+06	27	0.0 %	4.12E+04	1	3.5 %
<i>Total</i>	3.99E+09	92389	100.0 %	2.48E+08	5731	5.8 %

Tabla 3.6: *Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Johannesburgo - Sydney en condiciones de tormenta (DST=-300 nT).*

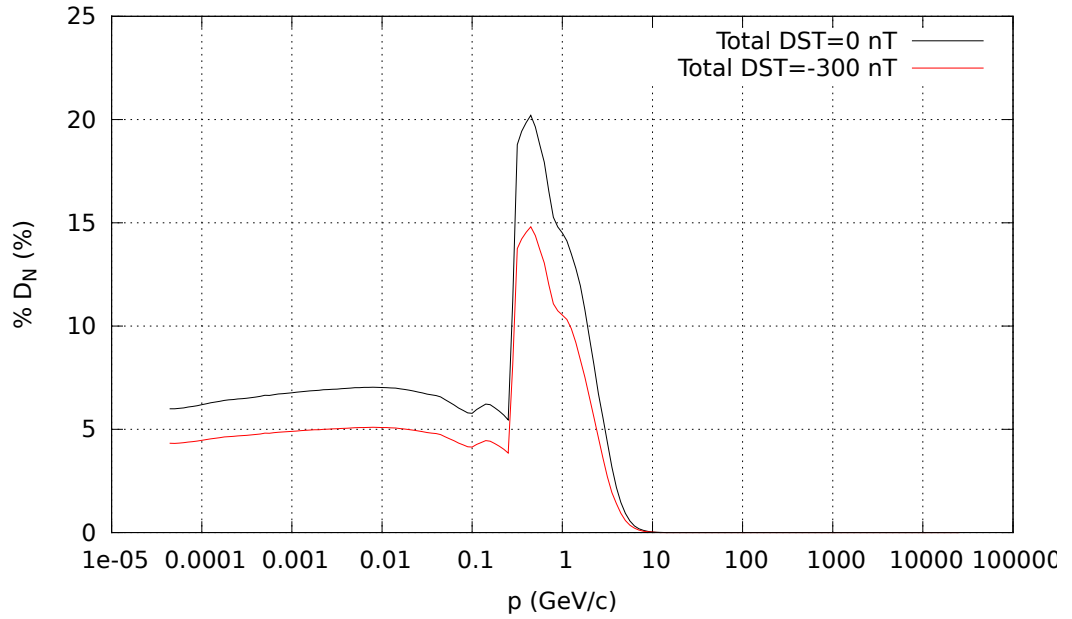


Figura 3.9: *Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares (negra) y de tormenta (roja) para la ruta Johannesburgo - Sydney, calculada según la ecuación (3.5).*

3.1.4. Efecto geomagnético sobre la ruta Nueva York - Tokyo

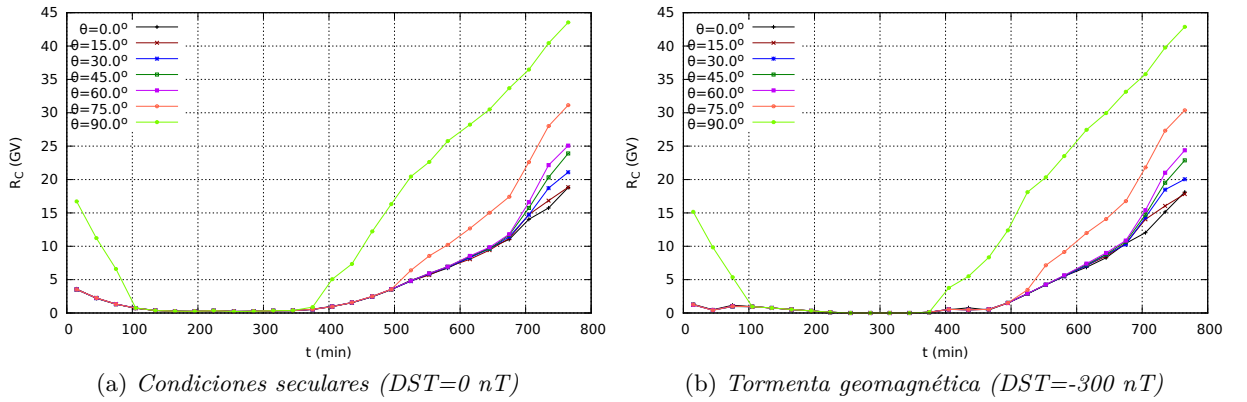


Figura 3.10: *Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Nueva York - Tokyo*

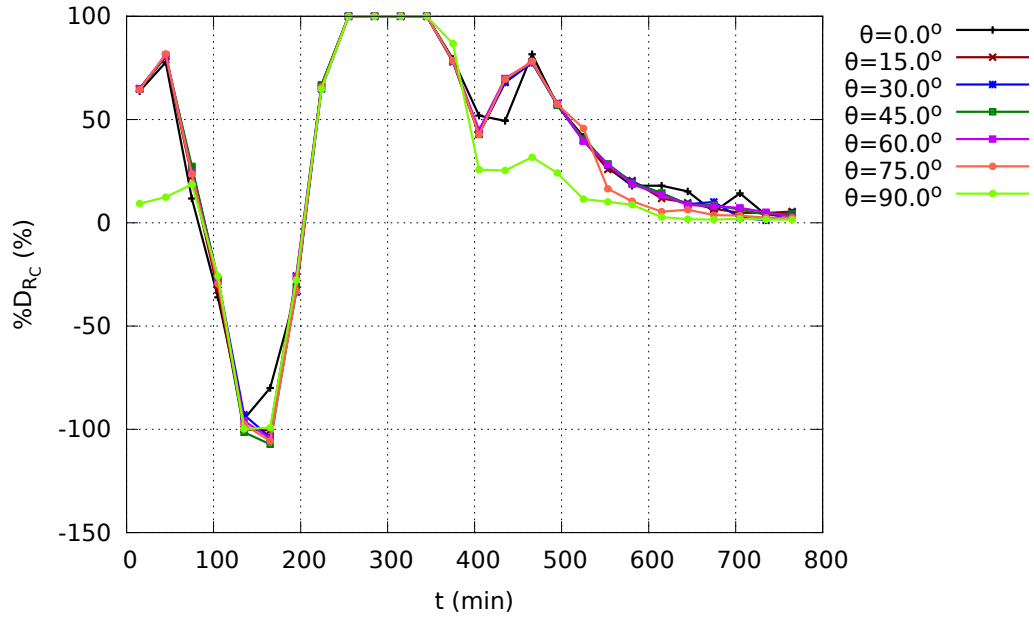


Figura 3.11: Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Nueva York - Tokyo, calculada según la expresión (3.1).

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	$\%D_N$
γ	3.27E+09	69934	79.4 %	3.22E+08	6886	9.0 %
e^+	1.29E+08	2758	3.1 %	1.10E+07	236	7.9 %
e^-	2.31E+08	4932	5.6 %	2.03E+07	434	8.1 %
μ^+	3.82E+07	816	0.9 %	2.81E+06	60	6.9 %
μ^-	3.45E+07	736	0.8 %	2.14E+06	46	5.8 %
n^0	3.18E+08	6793	7.7 %	8.86E+07	1894	21.8 %
p^+	9.66E+07	2063	2.3 %	2.36E+07	504	19.6 %
Otros	1.19E+06	25	0.0 %	9.79E+04	2	7.6 %
Total	4.12E+09	88059	100.0 %	4.71E+08	10061	10.3 %

Tabla 3.7: Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Nueva York - Tokyo en condiciones seculares ($DST=0$ nT).

Espece	$N(\text{m}^{-2})$	$J(\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(\text{m}^{-2})$	$\Delta J(\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$	% D_N
γ	3.31E+09	70826	79.2 %	2.81E+08	5995	7.8 %
e^+	1.30E+08	2788	3.1 %	9.62E+06	206	6.9 %
e^-	2.33E+08	4988	5.6 %	1.77E+07	378	7.0 %
μ^+	3.85E+07	823	0.9 %	2.47E+06	53	6.0 %
μ^-	3.47E+07	742	0.8 %	1.88E+06	40	5.1 %
n^0	3.31E+08	7073	7.9 %	7.55E+07	1614	18.6 %
p^+	1.00E+08	2136	2.4 %	2.02E+07	431	16.8 %
Otros	1.21E+06	26	0.0 %	8.55E+04	2	6.6 %
Total	4.18E+09	89402	100.0 %	4.08E+08	8718	8.9 %

Tabla 3.8: Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Nueva York - Tokyo en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT).

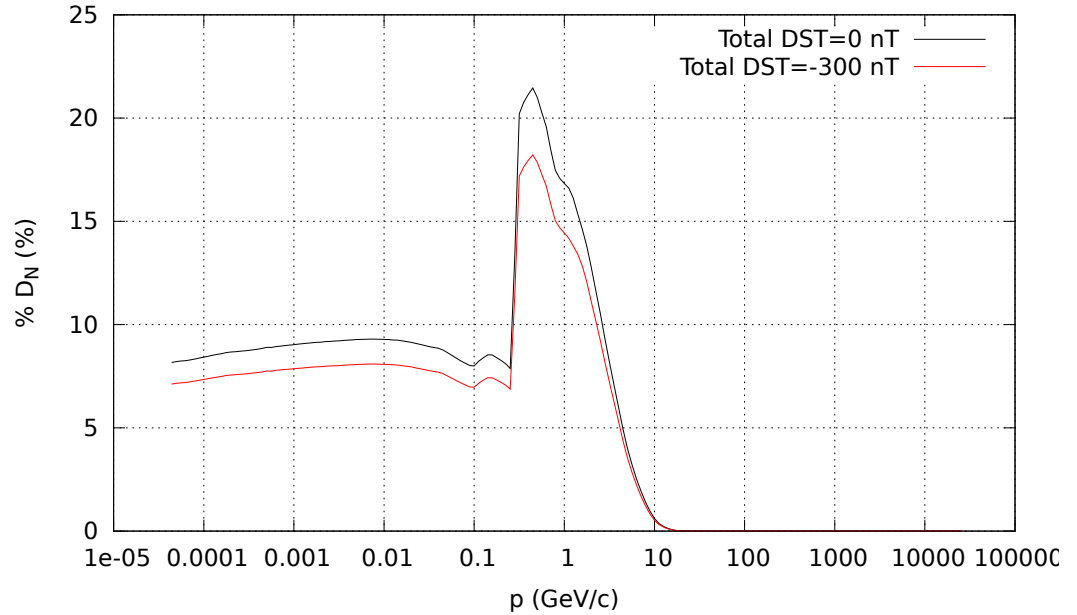


Figura 3.12: Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares (negra) y de tormenta (roja) para la ruta Nueva York - Tokyo, calculada según la ecuación (3.5).

3.1.5. Efecto geomagnético sobre la ruta Sao Paulo - Johannesburgo

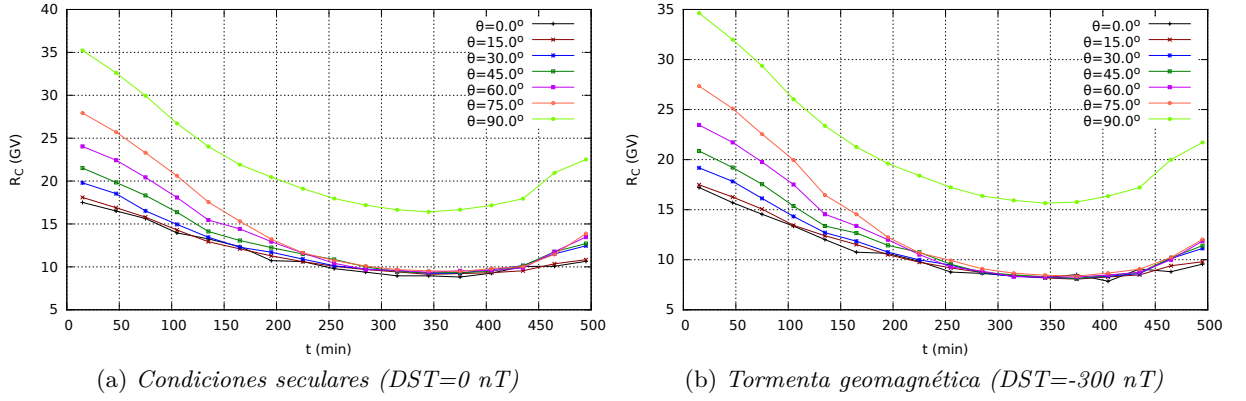


Figura 3.13: Rigidez de corte promedio a una altura de 112.8 km sobre el nivel del mar en función del tiempo de vuelo para la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo

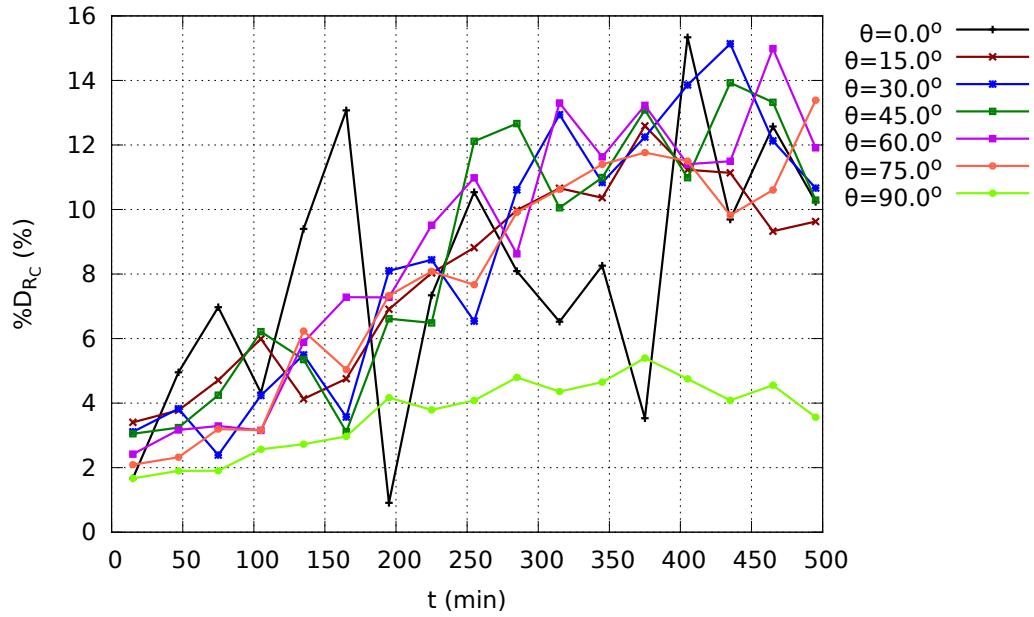


Figura 3.14: Diferencia relativa porcentual entre las rigideces en condiciones seculares y de tormenta para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo, calculada según la expresión (3.1).

Especie	N(m⁻²)	J(m⁻²s⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m⁻²)	ΔJ(m⁻²s⁻¹)	%D_N
γ	1.68E+09	54983	82.8 %	6.68E+08	21838	28.4 %
e^+	6.84E+07	2235	3.4 %	2.32E+07	758	25.3 %
e^-	1.22E+08	3975	6.0 %	4.26E+07	1391	25.9 %
μ^+	2.07E+07	677	1.0 %	6.09E+06	199	22.7 %
μ^-	1.93E+07	631	0.9 %	4.64E+06	152	19.4 %
n^0	8.92E+07	2914	4.4 %	1.77E+08	5773	66.5 %
p^+	3.02E+07	986	1.5 %	4.84E+07	1581	61.6 %
<i>Otros</i>	6.22E+05	20	0.0 %	2.22E+05	7	26.3 %
<i>Total</i>	2.03E+09	66422	100.0 %	9.70E+08	31699	32.3 %

Tabla 3.9: *Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones seculares (DST=0 nT).*

Especie	N(m⁻²)	J(m⁻²s⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m⁻²)	ΔJ(m⁻²s⁻¹)	%D_N
γ	1.73E+09	56584	82.5 %	6.19E+08	20236	26.3 %
e^+	7.02E+07	2294	3.3 %	2.14E+07	699	23.4 %
e^-	1.25E+08	4082	6.0 %	3.93E+07	1284	23.9 %
μ^+	2.13E+07	696	1.0 %	5.52E+06	180	20.6 %
μ^-	1.98E+07	646	0.9 %	4.16E+06	136	17.4 %
n^0	9.72E+07	3177	4.6 %	1.69E+08	5510	63.4 %
p^+	3.26E+07	1065	1.6 %	4.60E+07	1502	58.5 %
<i>Otros</i>	6.41E+05	21	0.0 %	2.04E+05	7	24.1 %
<i>Total</i>	2.10E+09	68565	100.0 %	9.04E+08	29555	30.1 %

Tabla 3.10: *Flujo de secundarios con corrección por campo geomagnético para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones de tormenta (DST=-300 nT).*

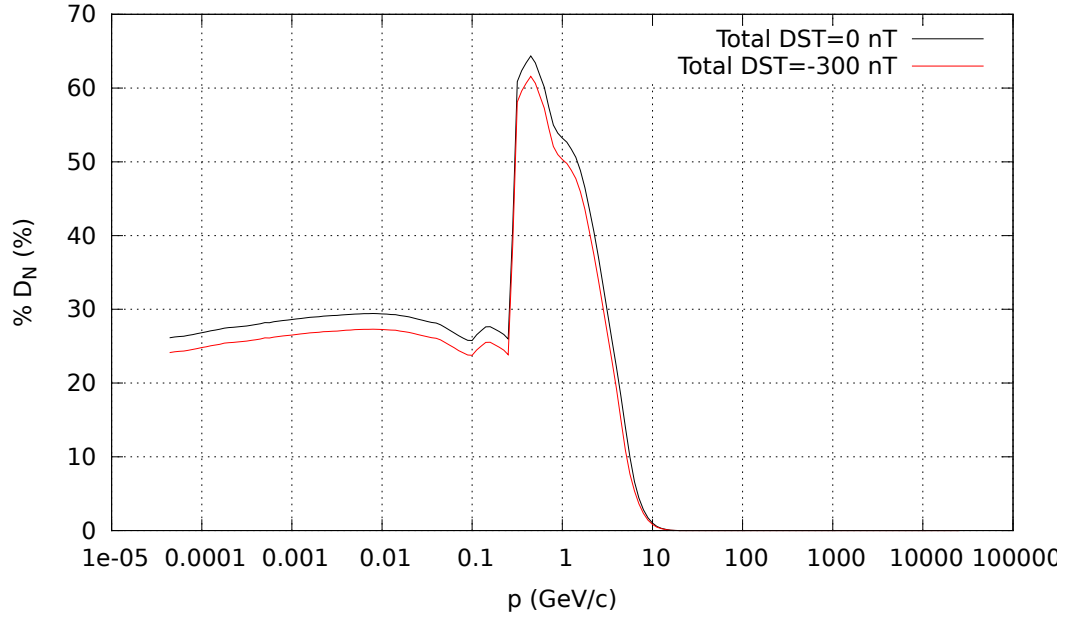


Figura 3.15: *Diferencia relativa porcentual de total de partículas entre las simulaciones sin campo y con campo geomagnético en condiciones seculares (negra) y de tormenta (roja) para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo, calculada según la ecuación (3.5).*

3.1.6. Comparación del efecto geomagnético en las distintas trayectorias

Para sintetizar los resultados obtenidos en esta sección y hacer una comparación entre las trayectorias, se presenta en las tablas 3.11 y 3.12 el porcentaje de partículas descartadas por efecto geomagnético $\%D_N$ en condiciones seculares y de tormenta respectivamente para cada una de las rutas.

Ruta	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	Otros	Total
BOG-BUE	44.1 %	40.4 %	41.0 %	40.0 %	36.4 %	82.5 %	78.5 %	40.3 %	48.0 %
BUE-MAD	43.0 %	39.4 %	39.9 %	38.8 %	35.3 %	81.2 %	77.2 %	39.4 %	46.9 %
JNB-SYD	6.7 %	5.7 %	5.9 %	4.2 %	3.3 %	20.1 %	17.5 %	5.1 %	8.1 %
NYC-TYO	9.0 %	7.9 %	8.1 %	6.9 %	5.8 %	21.8 %	19.6 %	7.6 %	10.3 %
SAO-JNB	28.4 %	25.3 %	25.9 %	22.7 %	19.4 %	66.5 %	61.6 %	26.3 %	32.3 %

Tabla 3.11: *Comparación para las distintas trayectorias del porcentaje de partículas descartadas $\%D_N$ (ecuación (3.5)) debido al efecto geomagnético en condiciones seculares ($DST=0$ nT).*

Ruta	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	Otros	Total
BOG-BUE	43.4 %	39.7 %	40.3 %	39.2 %	35.6 %	81.9 %	77.8 %	39.6 %	47.3 %
BUE-MAD	42.2 %	38.6 %	39.1 %	37.9 %	34.4 %	80.4 %	76.3 %	38.6 %	46.1 %
JNB-SYD	4.9 %	4.1 %	4.2 %	3.0 %	2.3 %	14.7 %	12.7 %	3.5 %	5.8 %
NYC-TYO	7.8 %	6.9 %	7.0 %	6.0 %	5.1 %	18.6 %	16.8 %	6.6 %	8.9 %
SAO-JNB	26.3 %	23.4 %	23.9 %	20.6 %	17.4 %	63.4 %	58.5 %	24.1 %	30.1 %

Tabla 3.12: *Comparación para las distintas trayectorias del porcentaje de partículas descartadas $\%D_N$ (ecuación (3.5)) debido al efecto geomagnético en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT).*

3.2. Cálculo comparativo del flujo

Se simulan lluvias en Bucaramanga en condiciones seculares para establecer una referencia con la cual comparar los resultados obtenidos en cada una de las trayectorias. Tanto para Bucaramanga como para cada punto característico de las rutas se realiza el filtrado de las partículas con las tablas de rigideces de Magnetocosmics y posteriormente en el caso de las rutas, se combinan los resultados de los puntos característicos para obtener el flujo de partículas con corrección por campo geomagnético en la totalidad de cada trayectoria.

Para cada una de las trayectorias en condiciones seculares y de tormenta geomagnética, se muestra el total de partículas N clasificadas según su especie (fotones, positrones, electrones, muones, neutrones, protones, otras partículas y el total de ellas) que inciden por metro cuadrado durante la duración de cada vuelo; el flujo de estas partículas, que es simplemente el número de partículas que inciden por metro cuadrado por segundo (ecuación (3.2)); y la fracción del número total de partículas correspondiente a cada especie.

Se muestra también la diferencia absoluta entre el número de partículas que inciden por metro cuadrado durante la duración de cada vuelo en cada ruta y en Bucaramanga¹:

$$\Delta N = N_{\text{ruta}} - N_{\text{BGA}}; \quad (3.6)$$

la diferencia absoluta del flujo de estas partículas:

¹El flujo total de partículas que inciden en Bucaramanga durante la duración de cada vuelo se obtiene multiplicando por el factor adecuado el flujo que se obtuvo después de haber hecho corrección por campo geomagnético a las simulaciones de las lluvias en esta ciudad, que se hicieron para un tiempo de dos horas. Esto es posible debido a que el flujo de primarios es constante e isótropo.

$$\Delta J = J_{\text{ruta}} - J_{\text{BGA}}; \quad (3.7)$$

y el incremento relativo de la cantidad de partículas calculado respecto al número de partículas en Bucaramanga:

$$d_N = \frac{N_{\text{ruta}} - N_{\text{BGA}}}{N_{\text{BGA}}} \quad (3.8)$$

Para cada trayectoria, se muestra la diferencia absoluta (ecuación (3.7)) en función del impulso de las partículas tanto en condiciones seculares como de tormenta. Adicionalmente, se muestra para cada especie el flujo integrado neto del total de partículas en función del tiempo de vuelo tanto para cada trayectoria así como el incremento relativo de esta cantidad (ecuación (3.8)) en las dos condiciones del campo geomagnético.

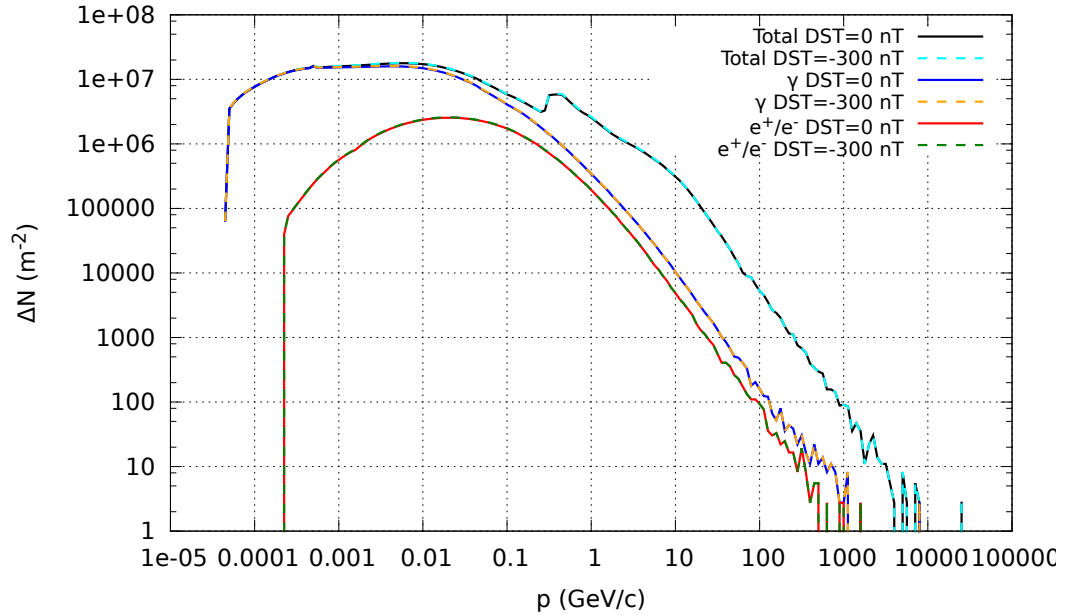
3.2.1. Ruta Bogotá - Buenos Aires

Especie	N(m ⁻²)	J(m ⁻² s ⁻¹)	Frac.(%)	ΔN(m ⁻²)	ΔJ(m ⁻² s ⁻¹)	d _N
γ	8.51E+08	42959	84.2	8.36E+08	42199	55.5
e ⁺	3.53E+07	1783	3.5	3.47E+07	1752	56.0
e ⁻	6.27E+07	3166	6.2	6.16E+07	3111	56.2
μ ⁺	1.04E+07	526	1.0	8.12E+06	410	3.5
μ ⁻	9.84E+06	497	1.0	7.85E+06	397	3.9
n ⁰	3.02E+07	1524	3.0	2.98E+07	1506	84.6
p ⁺	1.09E+07	553	1.1	1.09E+07	549	165.8
Otros	3.26E+05	16	0.0	3.23E+05	16	122.6
Total	1.01E+09	51024	100.0	9.89E+08	49940	46.1

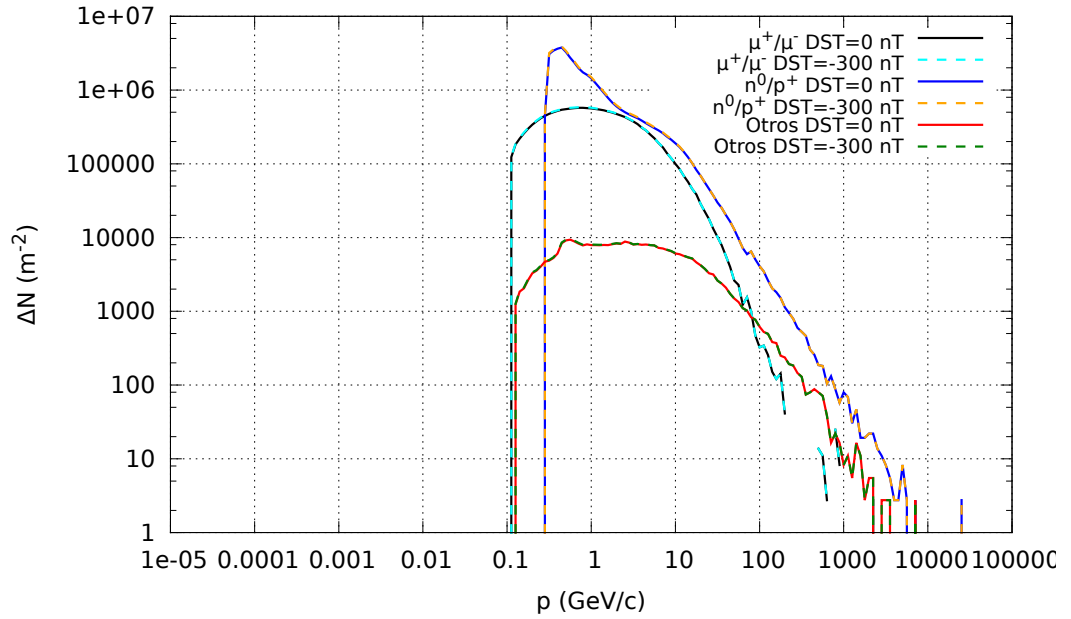
Tabla 3.13: *Flujo de secundarios en la trayectoria Bogotá - Buenos Aires en condiciones seculares (DST=0 nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.*

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	8.61E+08	43499	84.1	8.46E+08	42739	56.2
e^+	3.57E+07	1804	3.5	3.51E+07	1773	56.7
e^-	6.34E+07	3204	6.2	6.23E+07	3149	56.9
μ^+	1.06E+07	533	1.0	8.26E+06	417	3.6
μ^-	9.97E+06	504	1.0	7.99E+06	403	4.0
n^0	3.12E+07	1575	3.0	3.08E+07	1558	87.5
p^+	1.13E+07	570	1.1	1.12E+07	567	171.1
Otros	3.30E+05	17	0.0	3.27E+05	17	124.0
Total	1.02E+09	51706	100.0	1.00E+09	50622	46.7

Tabla 3.14: Flujo de secundarios en la trayectoria Bogotá - Buenos Aires en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.



(a) Total de partículas y componente electromagnética



(b) Muones, neutrones, protones y otras partículas

Figura 3.16: Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares (líneas continuas) y de tormenta (líneas discontinuas) para la trayectoria Bogotá - Buenos Aires.

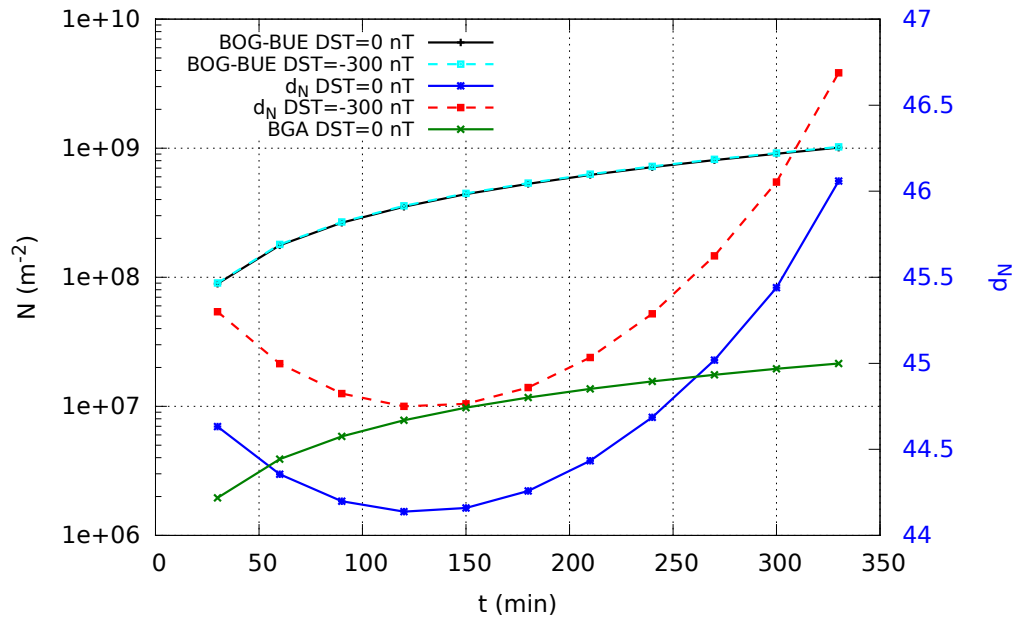


Figura 3.17: Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Bogotá - Buenos Aires (BOG-BUE). Se grafica la cantidad total de partículas N para Bucaramanga y para el vuelo así como el incremento relativo d_N (3.8) en condiciones seculares y de tormenta.

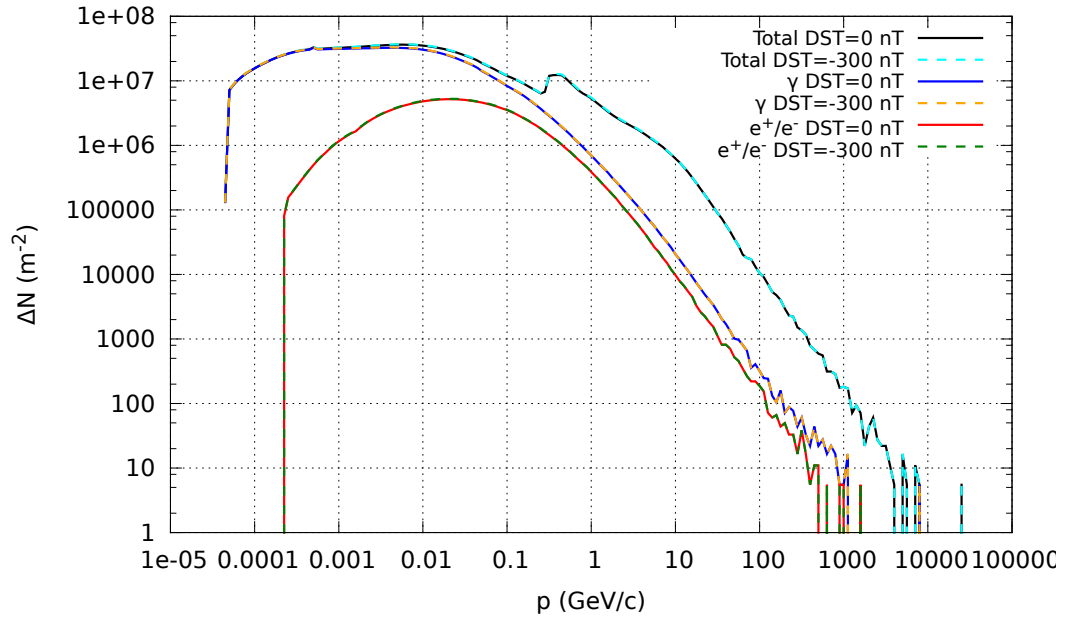
3.2.2. Ruta Buenos Aires - Madrid

Espece	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	1.74E+09	43815	84.0	1.70E+09	43055	56.6
e^+	7.19E+07	1814	3.5	7.06E+07	1783	57.0
e^-	1.28E+08	3224	6.2	1.25E+08	3168	57.3
μ^+	2.12E+07	536	1.0	1.66E+07	420	3.6
μ^-	2.01E+07	506	1.0	1.61E+07	406	4.0
n^0	6.47E+07	1633	3.1	6.40E+07	1615	90.7
p^+	2.32E+07	586	1.1	2.31E+07	583	175.9
Otros	6.63E+05	17	0.0	6.57E+05	17	124.6
Total	2.06E+09	52131	100.0	2.02E+09	51047	47.1

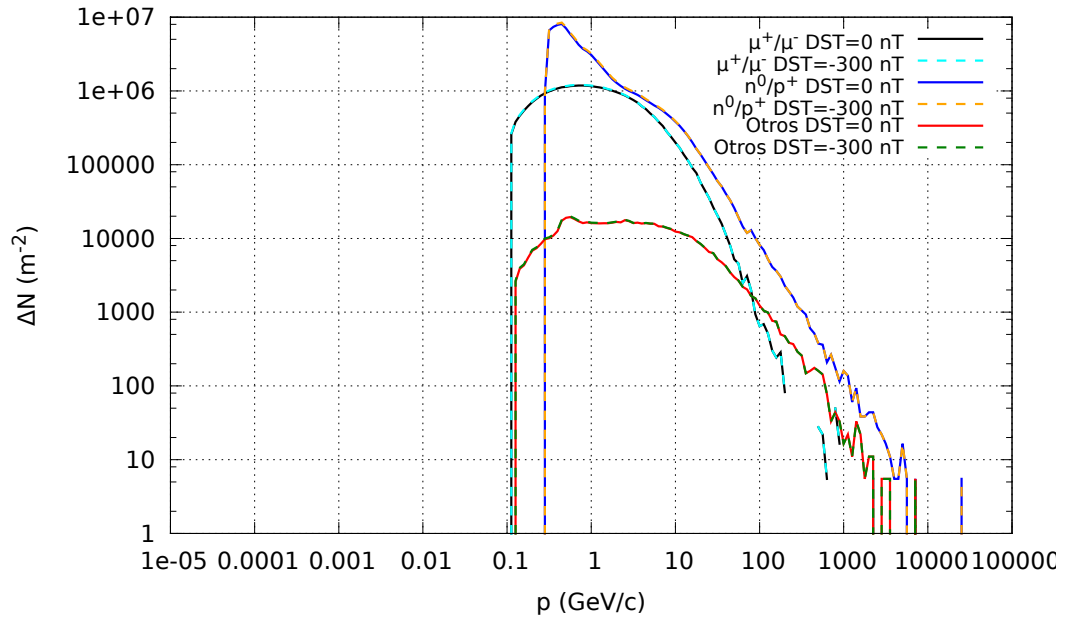
Tabla 3.15: *Flujo de secundarios en la trayectoria Buenos Aires - Madrid en condiciones seculares (DST=0 nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.*

Espece	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	1.76E+09	44417	84.0	1.73E+09	43657	57.4
e^+	7.28E+07	1837	3.5	7.15E+07	1806	57.8
e^-	1.29E+08	3266	6.2	1.27E+08	3210	58.0
μ^+	2.15E+07	544	1.0	1.70E+07	428	3.7
μ^-	2.03E+07	513	1.0	1.64E+07	413	4.1
n^0	6.73E+07	1700	3.2	6.66E+07	1682	94.5
p^+	2.41E+07	608	1.1	2.39E+07	604	182.5
Otros	6.71E+05	17	0.0	6.66E+05	17	126.2
Total	2.09E+09	52902	100.0	2.05E+09	51818	47.8

Tabla 3.16: *Flujo de secundarios en la trayectoria Buenos Aires - Madrid en condiciones de tormenta (DST=-300 nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.*



(a) Total de partículas y componente electromagnética



(b) Muones, neutrones, protones y otras partículas

Figura 3.18: Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares (líneas continuas) y de tormenta (líneas discontinuas) para la trayectoria Buenos Aires - Madrid.

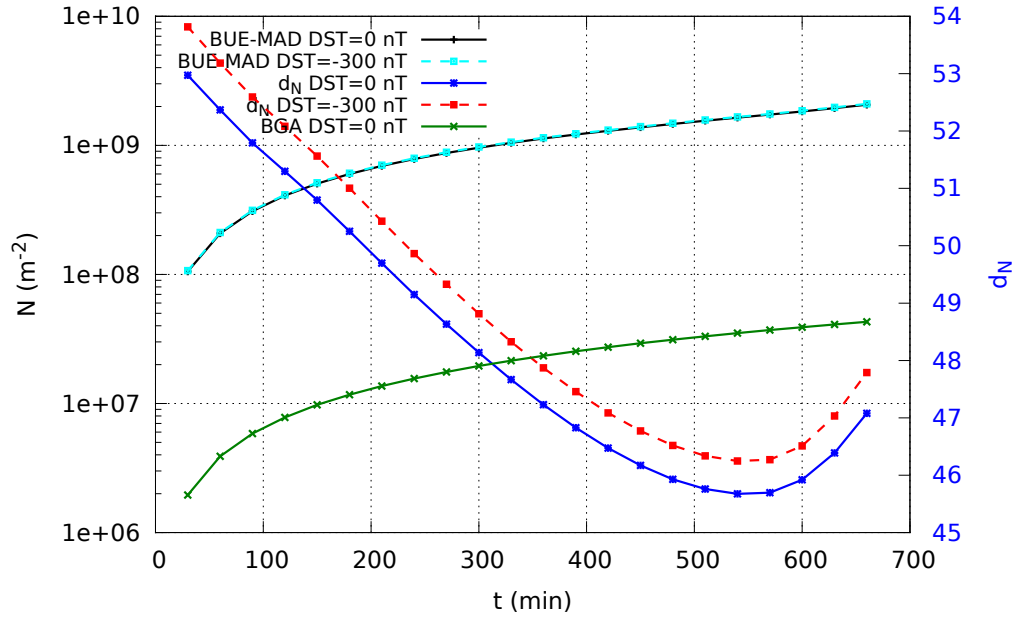


Figura 3.19: Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Buenos Aires - Madrid (BUE-MAD). Se grafica la cantidad total de partículas N para Bucaramanga y para el vuelo así como el incremento relativo d_N (3.8) en condiciones seculares y de tormenta.

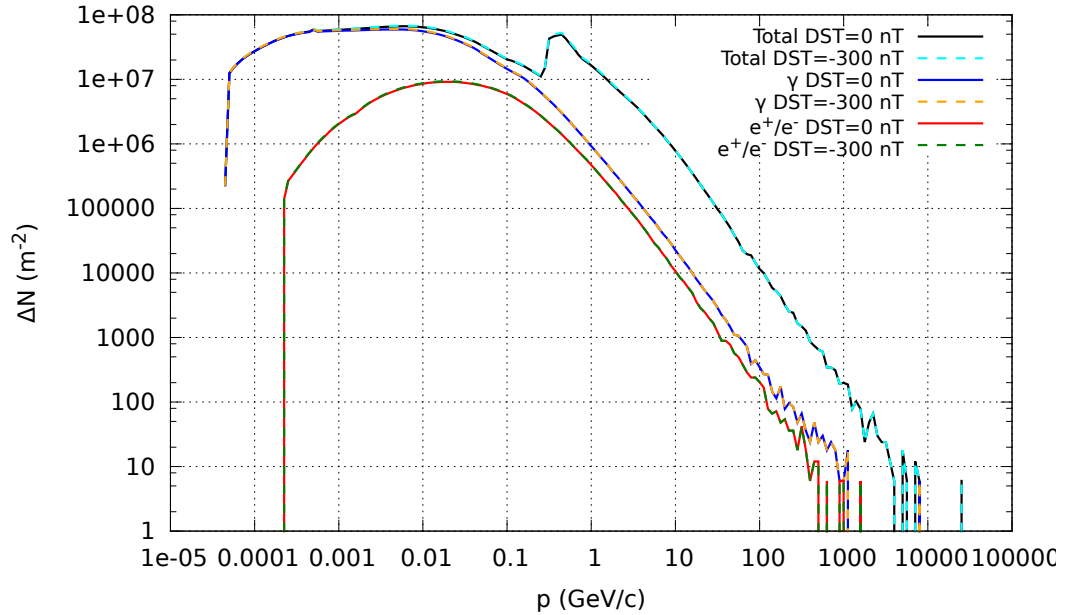
3.2.3. Ruta Johannesburgo - Sydney

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	3.10E+09	71659	79.4	3.06E+09	70898	93.3
e^+	1.22E+08	2824	3.1	1.21E+08	2793	89.3
e^-	2.18E+08	5050	5.6	2.16E+08	4994	90.3
μ^+	3.62E+07	839	0.9	3.12E+07	723	6.2
μ^-	3.27E+07	756	0.8	2.83E+07	656	6.5
n^0	3.00E+08	6937	7.7	2.99E+08	6919	388.7
p^+	9.14E+07	2116	2.3	9.13E+07	2113	638.0
Otros	1.13E+06	26	0.0	1.13E+06	26	195.6
Total	3.90E+09	90207	100.0	3.85E+09	89123	82.2

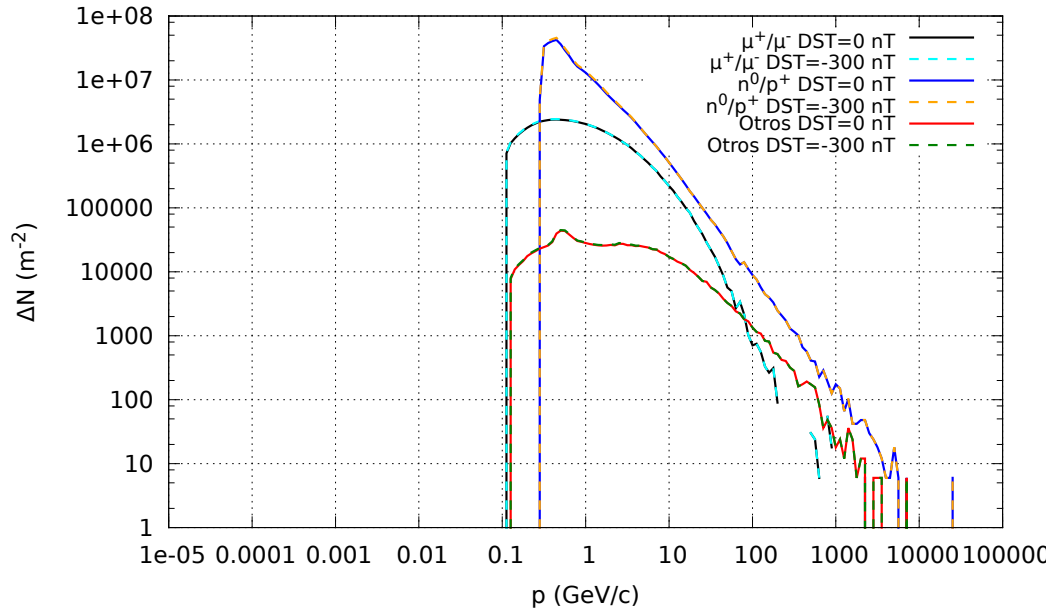
Tabla 3.17: Flujo de secundarios en la trayectoria Johannesburgo - Sydney en condiciones seculares ($DST=0$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.

Espece	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	3.16E+09	73087	79.1	3.12E+09	72327	95.1
e^+	1.24E+08	2872	3.1	1.23E+08	2841	90.9
e^-	2.22E+08	5139	5.6	2.20E+08	5084	91.9
μ^+	3.67E+07	850	0.9	3.17E+07	735	6.3
μ^-	3.30E+07	764	0.8	2.87E+07	664	6.6
n^0	3.20E+08	7408	8.0	3.19E+08	7390	415.1
p^+	9.68E+07	2241	2.4	9.67E+07	2238	675.7
Otros	1.15E+06	27	0.0	1.14E+06	27	199.0
Total	3.99E+09	92389	100.0	3.94E+09	91304	84.2

Tabla 3.18: Flujo de secundarios en la trayectoria Johannesburgo - Sydney en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.



(a) Total de partículas y componente electromagnética



(b) Muones, neutrones, protones y otras partículas

Figura 3.20: Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares (líneas continuas) y de tormenta (líneas discontinuas) para la trayectoria Johannesburgo - Sydney.

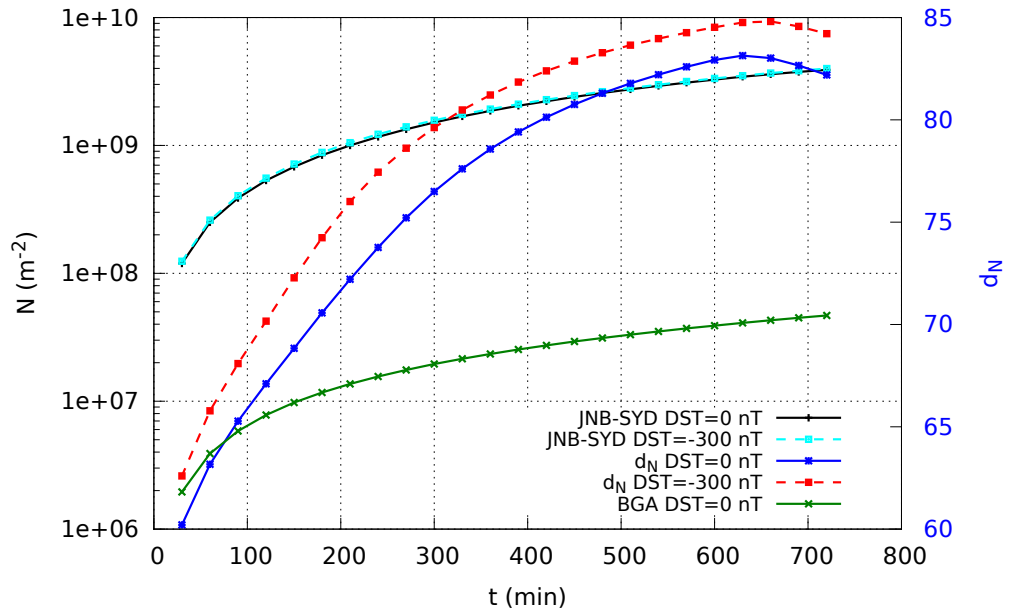


Figura 3.21: Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Johannesburgo - Sydney (JNB-SYD). Se grafica la cantidad total de partículas N para Bucaramanga y para el vuelo así como el incremento relativo d_N (3.8) en condiciones seculares y de tormenta.

3.2.4. Ruta Nueva York - Tokyo

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	3.27E+09	69934	79.4	3.24E+09	69174	91.0
e^+	1.29E+08	2758	3.1	1.28E+08	2727	87.2
e^-	2.31E+08	4932	5.6	2.28E+08	4877	88.1
μ^+	3.82E+07	816	0.9	3.28E+07	700	6.1
μ^-	3.45E+07	736	0.8	2.98E+07	636	6.3
n^0	3.18E+08	6793	7.7	3.17E+08	6776	380.6
p^+	9.66E+07	2063	2.3	9.64E+07	2060	621.9
Otros	1.19E+06	25	0.0	1.19E+06	25	190.4
Total	4.12E+09	88059	100.0	4.07E+09	86975	80.2

Tabla 3.19: *Flujo de secundarios en la trayectoria Nueva York - Tokyo en condiciones seculares ($DST=0$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.*

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	3.31E+09	70826	79.2	3.28E+09	70065	92.2
e^+	1.30E+08	2788	3.1	1.29E+08	2757	88.2
e^-	2.33E+08	4988	5.6	2.31E+08	4933	89.1
μ^+	3.85E+07	823	0.9	3.31E+07	708	6.1
μ^-	3.47E+07	742	0.8	3.00E+07	642	6.4
n^0	3.31E+08	7073	7.9	3.30E+08	7055	396.3
p^+	1.00E+08	2136	2.4	9.98E+07	2133	644.0
Otros	1.21E+06	26	0.0	1.20E+06	26	192.4
Total	4.18E+09	89402	100.0	4.13E+09	88318	81.5

Tabla 3.20: *Flujo de secundarios en la trayectoria Nueva York - Tokyo en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.*

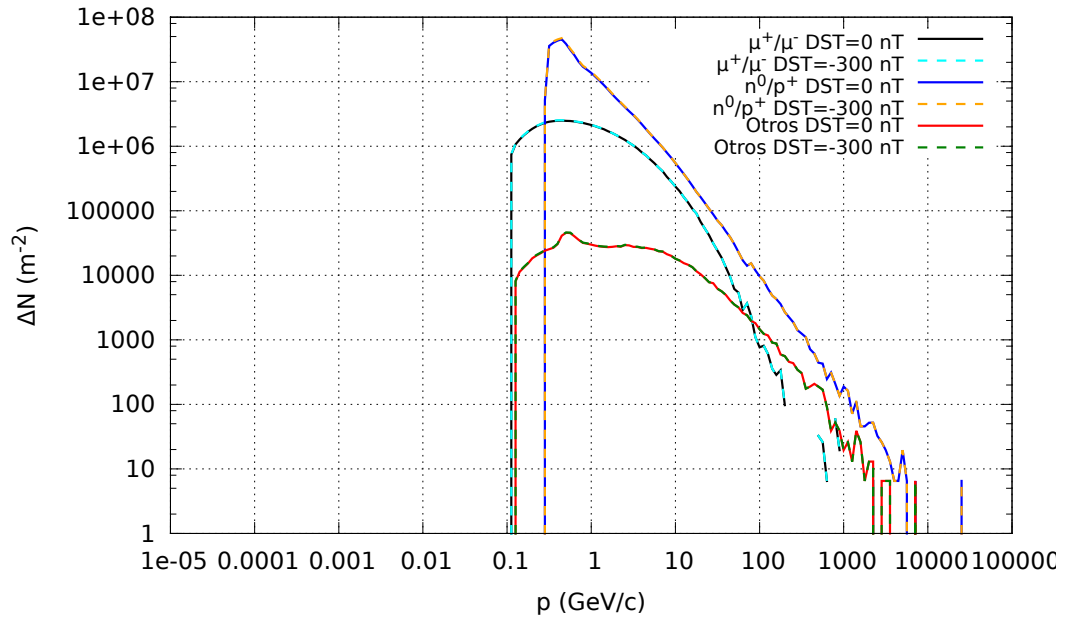
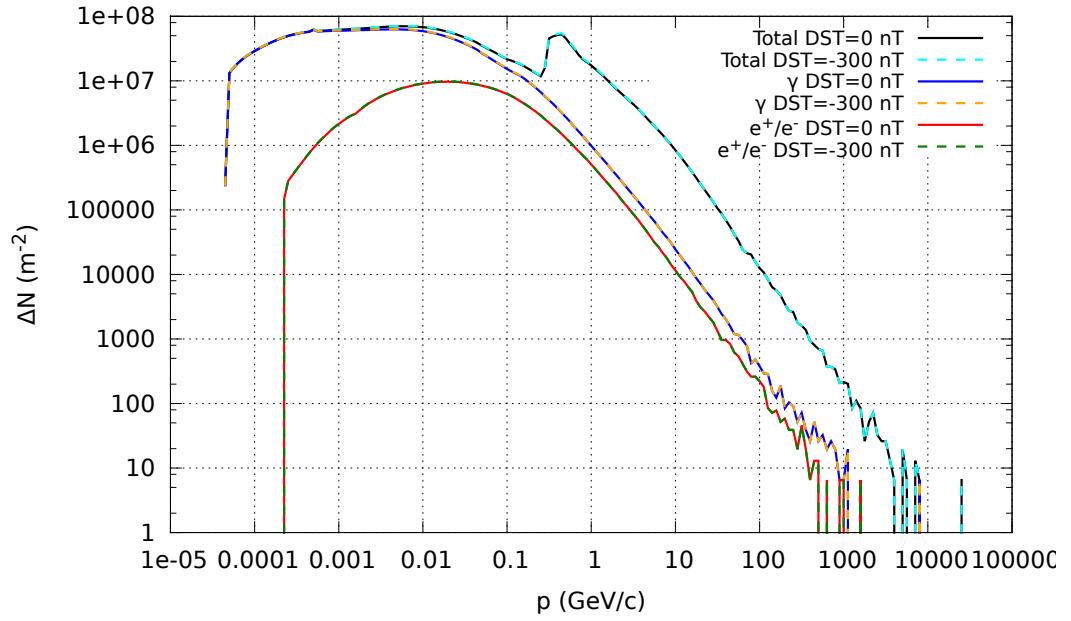


Figura 3.22: Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares (líneas continuas) y de tormenta (líneas discontinuas) para la trayectoria Nueva York - Tokyo.

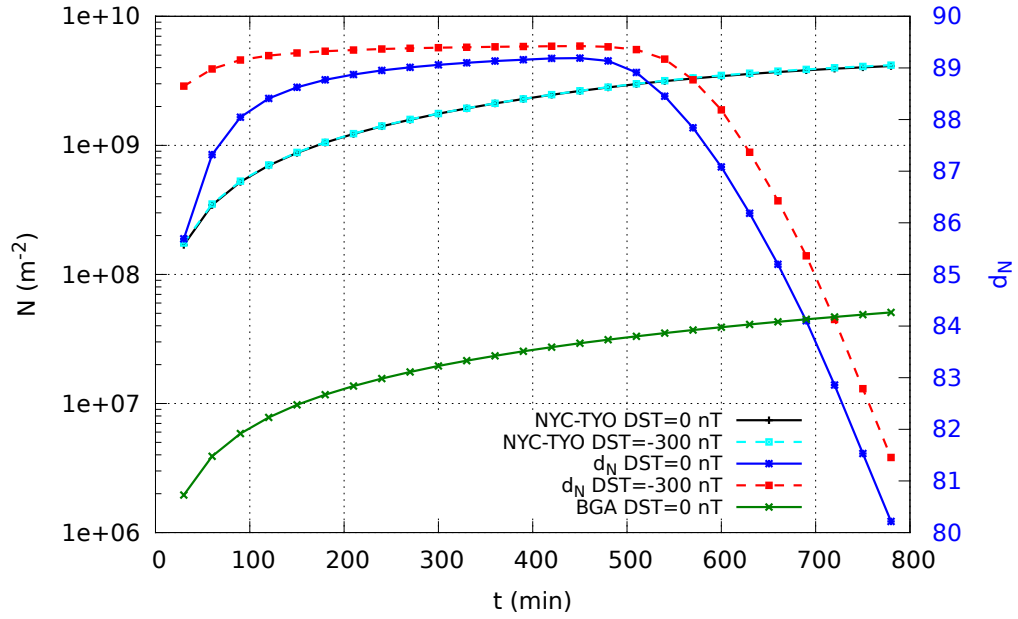


Figura 3.23: Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Nueva York - Tokyo (NYC-TYO). Se grafica la cantidad total de partículas N para Bucaramanga y para el vuelo así como el incremento relativo d_N (3.8) en condiciones seculares y de tormenta.

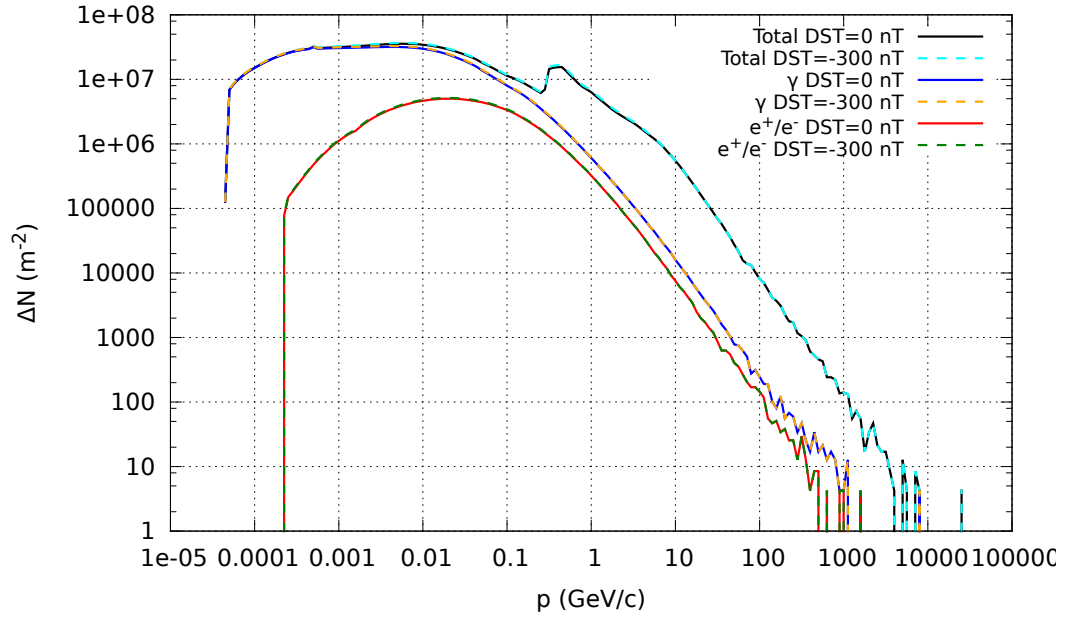
3.2.5. Ruta Sao Paulo - Johannesburgo

Especie	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	1.68E+09	54983	82.8	1.66E+09	54222	71.3
e^+	6.84E+07	2235	3.4	6.74E+07	2204	70.5
e^-	1.22E+08	3975	6.0	1.20E+08	3920	70.8
μ^+	2.07E+07	677	1.0	1.72E+07	562	4.9
μ^-	1.93E+07	631	0.9	1.62E+07	530	5.3
n^0	8.92E+07	2914	4.4	8.86E+07	2897	162.7
p^+	3.02E+07	986	1.5	3.01E+07	982	296.6
Otros	6.22E+05	20	0.0	6.18E+05	20	151.7
Total	2.03E+09	66422	100.0	2.00E+09	65337	60.3

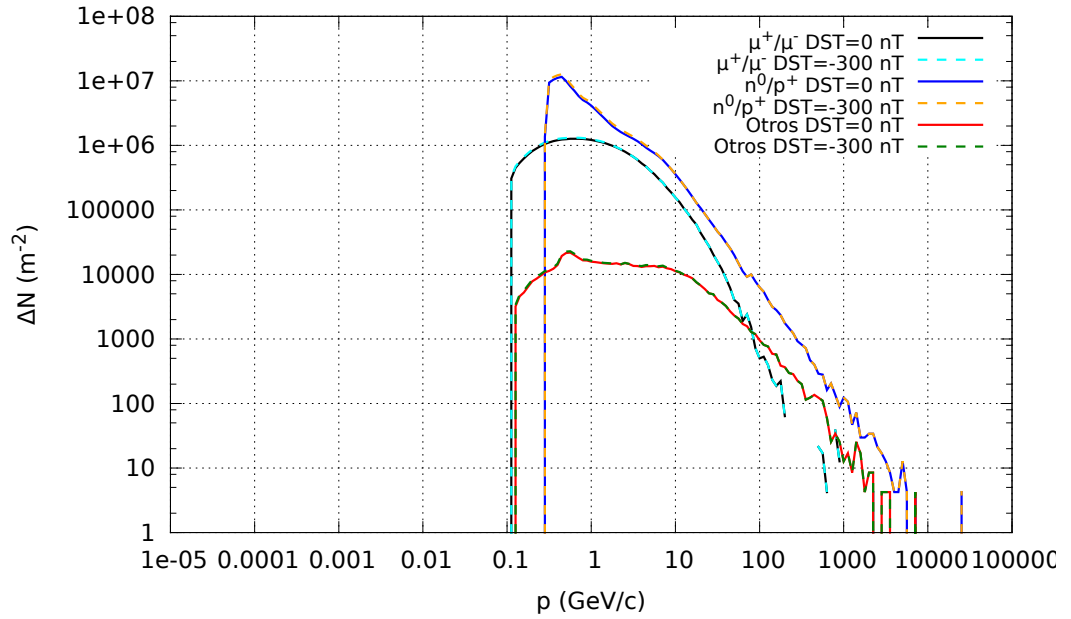
Tabla 3.21: Flujo de secundarios en la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones seculares ($DST=0$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.

Espece	$N(m^{-2})$	$J(m^{-2}s^{-1})$	Frac.(%)	$\Delta N(m^{-2})$	$\Delta J(m^{-2}s^{-1})$	d_N
γ	1.73E+09	56584	82.5	1.71E+09	55824	73.4
e^+	7.02E+07	2294	3.3	6.93E+07	2263	72.4
e^-	1.25E+08	4082	6.0	1.23E+08	4027	72.8
μ^+	2.13E+07	696	1.0	1.77E+07	580	5.0
μ^-	1.98E+07	646	0.9	1.67E+07	546	5.4
n^0	9.72E+07	3177	4.6	9.67E+07	3159	177.5
p^+	3.26E+07	1065	1.6	3.25E+07	1062	320.6
Otros	6.41E+05	21	0.0	6.36E+05	21	156.2
Total	2.10E+09	68565	100.0	2.06E+09	67481	62.2

Tabla 3.22: Flujo de secundarios en la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT) y su comparación con el flujo en Bucaramanga.



(a) Total de partículas y componente electromagnética



(b) Muones, neutrones, protones y otras partículas

Figura 3.24: Distribución en impulso de la diferencia absoluta (3.7) en condiciones seculares (líneas continuas) y de tormenta (líneas discontinuas) para la trayectoria Sao Paulo - Johannesburgo.

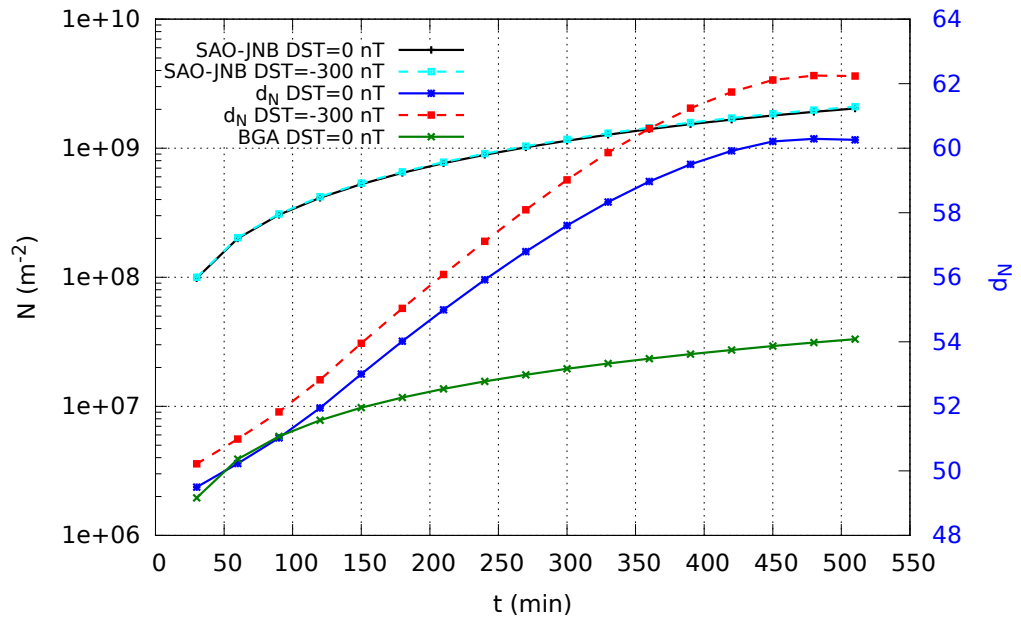


Figura 3.25: Flujo integrado del total de partículas en función del tiempo para la ruta Sao Paulo - Johannesburgo (SAO-JNB). Se grafica la cantidad total de partículas N para Bucaramanga y para el vuelo así como el incremento relativo d_N (3.8) en condiciones seculares y de tormenta.

3.2.6. Comparación de los resultados obtenidos para diferentes trayectorias

Para sintetizar los resultados obtenidos en esta sección, se muestra en las tablas 3.23 y 3.24 el incremento relativo d_N (ecuación (3.8)) para los cálculos en condiciones seculares y de tormenta respectivamente. Adicionalmente, en la tabla 3.24 se muestra la diferencia relativa porcentual entre el número de partículas obtenido para condiciones seculares y de tormenta, calculado como:

$$\%n = \frac{N_{sec} - N_{tor}}{N_{sec}} \times 100 \% \quad (3.9)$$

Ruta	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	Otros	Total
BOG-BUE	55.5	56.0	56.2	3.5	3.9	84.6	165.8	122.6	46.1
BUE-MAD	56.6	57.0	57.3	3.6	4.0	90.7	175.9	124.6	47.1
JNB-SYD	93.3	89.3	90.3	6.2	6.5	388.7	638.0	195.6	82.2
NYC-TYO	91.0	87.2	88.1	6.1	6.3	380.6	621.9	190.4	80.2
SAO-JNB	71.3	70.5	70.8	4.9	5.3	162.7	296.6	151.7	60.3

Tabla 3.23: Comparación para las distintas trayectorias del incremento relativo d_N (ecuación (3.8)) en condiciones seculares ($DST=0$ nT).

Ruta	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	Otros	Total
BOG-BUE	56.2	56.7	56.9	3.6	4.0	87.5	171.1	124.0	46.7
BUE-MAD	57.4	57.8	58.0	3.7	4.1	94.5	182.5	126.2	47.8
JNB-SYD	95.1	90.9	91.9	6.3	6.6	415.1	675.7	199.0	84.2
NYC-TYO	92.2	88.2	89.1	6.1	6.4	396.3	644.0	192.4	81.5
SAO-JNB	73.4	72.4	72.8	5.0	5.4	177.5	320.6	156.2	62.2

Tabla 3.24: Comparación para las distintas trayectorias del incremento relativo d_N (ecuación (3.8)) en condiciones de tormenta ($DST=-300$ nT).

Ruta	γ	e^+	e^-	μ^+	μ^-	n^0	p^+	Otros	Total
BOG-BUE	1.2 %	1.1 %	1.1 %	1.9 %	1.3 %	3.3 %	3.7 %	1.2 %	1.0 %
BUE-MAD	1.1 %	1.3 %	0.8 %	1.4 %	1.0 %	4.0 %	3.9 %	1.2 %	1.5 %
JNB-SYD	1.9 %	1.6 %	1.8 %	1.4 %	0.9 %	6.7 %	5.9 %	1.8 %	2.3 %
NYC-TYO	1.2 %	0.8 %	0.9 %	0.8 %	0.6 %	4.1 %	3.5 %	1.7 %	1.5 %
SAO-JNB	3.0 %	2.6 %	2.5 %	2.9 %	2.6 %	9.0 %	7.9 %	3.1 %	3.4 %

Tabla 3.25: Comparación para las distintas trayectorias de la diferencia relativa porcentual %n (ecuación (3.9)) entre la cantidad de partículas que inciden en condiciones seculares y de tormenta.

3.3. Discusión de resultados

Con este trabajo se buscó desarrollar un método computacional que permitiera el cálculo detallado del flujo de partículas al que se ve expuesta una aeronave a lo largo de distintas rutas de vuelo y en distintas condiciones del campo geomagnético. Con el fin de tener una amplia variabilidad geomagnética, se seleccionaron cinco trayectorias de vuelo que cubrían la mayoría del globo terráqueo: Bogotá - Buenos Aires, Buenos Aires - Madrid, Johannesburgo - Sydney, Nueva York - Tokyo y Sao Paulo - Johannesburgo. Se realizaron simulaciones de lluvias en un único punto geográfico (Bucaramanga) a una altura de 11 km inyectando primarios mediante la ecuación (1.4) y la parametrización de la tabla 1.1². Al inyectar primarios de esta manera en las simulaciones, no se tiene en cuenta la interacción de los rayos cósmicos con el campo geomagnético a alturas superiores a 112.8 km. De manera que para tener en cuenta este efecto en los cálculos, se subdividieron las trayectorias en tramos de media hora y en un punto característico de cada uno de estos tramos se calcularon las rigideces de corte en la parte superior de la atmósfera, es decir, a 112.8 km de altura. Con dichas rigideces se realizó el filtrado de los primarios inyectados y se estimó el flujo de partículas en cada uno de los tramos de las trayectorias. Finalmente, se sumaron los flujos de cada tramo para obtener el total de partículas en cada ruta. Este procedimiento se hizo para condiciones seculares y de tormenta geomagnética.

En aras de ahorrar tiempo de cómputo y realizar un cálculo a primer orden, el método aplicado en este estudio tuvo en cuenta distintas aproximaciones como considerar que la altura de vuelo de los aviones era constante e igual a 11 km a lo largo de cualquier trayectoria y considerar para cualquier punto de la Tierra el mismo modelo atmosférico y un campo geomagnético homogéneo desde los 11 km hasta los 112.8 km de altura. Para demostrar la validez de las aproximaciones del modelo atmosférico y del campo geomagnético homogéneo se hicieron simulaciones de lluvias en un punto cercano al polo sur y en otro cercano al polo norte y se comparó el flujo en dichos puntos con el flujo de las simulaciones genéricas utilizadas para los

²Esta estrategia de inyección de primarios fue desarrollada por Asorey H. [22]

cálculos en las trayectorias. Se encontró que en las simulaciones de las trayectorias existe una subestimación del total de partículas cercana al 30 %, pero cabe resaltar que esto sería bajo unas condiciones muy especiales, es decir, que los vuelos fueran polares y se llevaran a cabo en invierno. De manera que en cuanto al aspecto atmosférico y el del campo geomagnético local, la incertidumbre de los cálculos presentados en este trabajo están por debajo de este valor. Cabe resaltar que el efecto discutido sobre el modelo atmosférico es un efecto menor comparado con otras incertezas, como por ejemplo que CORSIKA hace la asignación del modelo atmosférico a un sitio determinado únicamente por su latitud³. El efecto atmosférico sobre la propagación de los rayos cósmicos podría ser estudiado en un próximo trabajo de investigación.

Como era de esperarse, el efecto geomagnético sobre el flujo de rayos cósmicos depende de la latitud de las trayectorias. Entre mayor sea la latitud, menor será el blindaje proporcionado por el campo geomagnético. En el caso de las trayectorias de latitudes medias, Bogotá - Buenos Aires y Buenos Aires - Madrid, el campo geomagnético en condiciones seculares filtra casi el 50 % del total de las partículas; cerca del 10 % en las rutas cercanas a los polos, Johannesburgo - Sydney y Nueva York - Tokyo; y aproximadamente un 30 % en la ruta de latitud media que atraviesa la anomalía del Atlántico Sur, esto es, Sao Paulo - Johannesburgo. En el caso del campo geomagnético en condiciones de tormenta, estos porcentajes disminuyen tan solo un 2 % o menos. (véase tablas 3.11 y 3.12). En las gráficas 3.3, 3.6, 3.9, 3.12, 3.15 y en el apéndice A, se presenta la diferencia relativa porcentual $\%D_N$ (ecuación (3.5)) entre el flujo de secundarios cuando no existe campo geomagnético y cuando está presente, tanto en condiciones seculares como de tormenta. En estas gráficas se puede ver que el efecto geomagnético sobre los primarios causa que secundarios de baja energía sean descartados de las lluvias, se observa que para valores de impulso cercanos a 10 GeV/c, el porcentaje de secundarios descartados es prácticamente nulo en todas las trayectorias. En las gráficas de la diferencia relativa entre el total de partículas con y sin campo geomagnético (gráficas 3.3, 3.6, 3.9, 3.12 y 3.15), se observa un pico a aproximadamente 0.5 GeV/c, el cual se debe a que los neutrones dominan el decrecimiento de partículas a esa energía según lo reportado en [36], donde también se afirma que dicha propiedad que resulta útil en los monitores de neutrones para estudiar la dinámica del campo geomagnético. En las tablas 3.11 y 3.12, que comparan el valor de $\%D_N$ para las distintas familias de partículas en las distintas trayectorias, se observa que los tipos de secundarios que se ven más afectados por la interacción de los primarios con el campo geomagnético son los neutrones y los protones, los neutrones ligeramente más que los protones. Queda abierta la pregunta de investigar por qué esto ocurre.

Con el fin de analizar el comportamiento de las rigideces de corte a lo largo de cada una de las trayectorias, en las figuras 3.1, 3.4, 3.7, 3.10 y 3.13 se muestra la rigidez de corte media en función del tiempo de vuelo tanto en condiciones seculares como de tormenta del campo geomagnético. Como la rigidez de corte R_C es una medida cuantitativa del blindaje que ofrece el campo geomagnético frente a los rayos cósmicos, se espera que las rigideces de corte sean mayores en el ecuador y menores en los polos. Por ejemplo para la ruta Buenos Aires - Madrid, que va de una latitud media del hemisferio sur hacia una latitud media del hemisferio norte

³Por ejemplo, el desierto del Sahara tendría el mismo modelo atmosférico que el Amazonas simplemente por estar en la misma latitud (en módulo).

pasando por el ecuador se comprueba este hecho observando en la figura 3.4 que la rigidez parte de determinado valor, luego aumenta cuando pasa por el ecuador y finalmente vuelve a caer. Un análisis similar puede hacerse para el resto de las trayectorias, asimismo se puede comprobar que la relación inversa de la rigidez de corte con la latitud se observa para todos los ángulos cenitales y en condiciones seculares como en condiciones de tormenta. Para las rutas Johannesburgo - Sydney y Nueva York - Tokyo puede observarse en las figuras 3.7 y 3.10 cómo las rigideces de corte, para todos los ángulos cenitales considerados, se hacen cero al momento de pasar cerca de los polos. En estas gráficas también se observa que para ángulos cenitales mayores, las rigideces de corte son mayores, o equivalentemente se puede decir que para poder incidir en determinado punto, un primario requiere más energía si su dirección de arribo es horizontal que si es vertical.

Con el fin de analizar las diferencias entre las rigideces calculadas para condiciones seculares y de tormenta geomagnética se presenta en las gráficas 3.2, 3.5, 3.8, 3.11 y 3.14, la diferencia relativa porcentual $\%D_{RC}$, calculada según la expresión (3.1), en función del tiempo de vuelo para todas las trayectorias. Se encuentra en todos los casos que esta variación aumenta con la latitud, lo cual concuerda con lo reportado en [39]. Por ejemplo para la ruta Bogotá - Buenos Aires esta diferencia alcanza valores solo del 4 % (ver gráfica 3.2), mientras que la ruta Johannesburgo - Sydney alcanza un 90 % (ver gráfica 3.8). Para las rutas Buenos Aires - Madrid (gráfica 3.5) y Sao Paulo - Johannesburgo (gráfica 3.14), se observan valores intermedios. En el caso de la ruta Nueva York - Tokyo aparecen valores negativos del 100 % en la gráfica 3.11, lo cual es anormal y probablemente se deba a errores en el método numérico utilizado, puesto que las rigideces en dichos puntos son casi cero.

Para todas las trayectorias analizadas, se encontró que las dosis calculadas en condiciones de tormenta geomagnética son mayores que en condiciones seculares, lo cual es coherente con el hecho de que la intensidad del campo geomagnético disminuye durante una tormenta de este tipo (ver sección 1.6). Sin embargo, las diferencias observadas entre los resultados obtenidos en ambos casos es pequeña, de apenas un 3.4 % para el total de partículas en la trayectoria Sao - Paulo Johannesburgo y valores menores en el resto de las trayectorias, tal como se observa en la tabla 3.25. La principal diferencia relativa entre el flujo de partículas en condiciones seculares y de tormenta ocurre nuevamente para neutrones y protones, con un 9.0 % y 7.9 % respectivamente en la ruta Sao - Paulo Johannesburgo y valores menores en el resto de trayectorias. En las distribuciones en impulso de las distintas familias de secundarios, representadas en las gráficas 3.16, 3.18, 3.20, 3.22 y 3.24, tampoco se observa diferencia alguna entre ambas condiciones del campo geomagnético. Como resultado de estos cálculos, se encuentra entonces que una super tormenta caracterizada por un índice DST de -300 nT (ver sección 1.6), no introduce un aumento significativo en el flujo de rayos cósmicos a la altura de los vuelos comerciales. Sin embargo, cabe resaltar que el índice DST caracteriza un aspecto de lo que sucede en el campo geomagnético externo y no considera fenómenos relacionados por ejemplo con el efecto heliosférico lejano, los cuales pueden introducir una variación en el flujo de rayos cósmicos, pero estos no fueron incluidos en esta tesis.

Para tener una idea de la magnitud de los cálculos hechos, se compara el flujo obtenido de secundarios para cada una de las trayectorias en condiciones seculares y de tormenta

con el flujo de secundarios en Bucaramanga en condiciones seculares, lo cual se resume en las tablas 3.23 y 3.24. Se observa, por ejemplo que para condiciones seculares del campo geomagnético, el flujo del total de partículas en las rutas de latitudes medias Bogotá - Buenos Aires y Buenos Aires - Madrid, es casi 50 veces mayor que el flujo en Bucaramanga; el flujo de las rutas cercanas a los polos (Johannesburgo - Sydney y Nueva York - Tokyo) es casi 80 veces mayor; y el flujo en la ruta Johannesburgo - Sydney es de aproximadamente 60 veces mayor. No se observan diferencias significativas en estos incrementos relativos en el caso de tormenta geomagnética. Finalmente, en las gráficas 3.17, 3.19, 3.21, 3.23 y 3.25 se muestra cómo evoluciona la cantidad acumulada del total de partículas que inciden en cada trayectoria y en Bucaramanga durante el tiempo de vuelo, tanto en condiciones seculares como de tormenta. Adicionalmente se muestra en estas gráficas el incremento relativo d_N (ecuación (3.8)) que compara el flujo en cada ruta con el flujo en Bucaramanga.

Capítulo 4

Conclusiones

Con este trabajo se logró hacer un cálculo de la cantidad de partículas que inciden en cinco rutas de vuelo diferentes en condiciones seculares y dinámicas del campo geomagnético. Con los resultados obtenidos es posible obtener el número de partículas que inciden en cada trayectoria por tipo de partícula y por energía, así como una descripción geomagnética detallada de cada una de las rutas seleccionadas.

Se comprobó que el flujo de partículas a la altura de vuelo de los aviones es afectado por el campo geomagnético según la latitud de la trayectoria. El blindaje que proporciona el campo geomagnético frente a la incidencia de rayos cósmicos está caracterizado cuantitativamente por la rigidez de corte y en general, lo que se pudo observar fue que para mayores latitudes las rigideces de corte son menores y por tanto el flujo de partículas es mayor. En el caso de las rutas cercanas a los polos, como Nueva York - Tokyo y Sao Paulo - Johannesburgo, se estimó que la interacción de los primarios con el campo geomagnético causa una reducción de apenas un 10 % del total de secundarios producidos, siendo el flujo de partículas en estas rutas aproximadamente 80 veces superior que el flujo en Bucaramanga a nivel del suelo. Para las rutas que atraviesan latitudes medias y ecuatoriales, como los son Bogotá - Buenos Aires y Buenos Aires - Madrid, se calculó que debido al efecto geomagnético mencionado, se filtra casi un 50 % del total de secundarios, de manera que el flujo en estas trayectorias es aproximadamente 50 veces mayor que en Bucaramanga a nivel del suelo. Finalmente, para la ruta Johannesburgo - Sydney, que atraviesa latitudes medias cruzando la anomalía del Atlántico Sur, estas cantidades toman valores intermedios, siendo el porcentaje de secundarios filtrados por efecto geomagnético de aproximadamente un 30 % y la cantidad de partículas que inciden en esta ruta casi 60 veces mayor que en Bucaramanga.

Se comprobó que debido a esta interacción de los primarios con el campo geomagnético, los secundarios descartados en las simulaciones son partículas de baja energía. Lo cual es acorde con el hecho de que el campo geomagnético deflecta a los primarios de baja energía e impide su arribo al punto de observación y son estos primarios los que producirán secundarios de baja energía. Se encontró que para impulsos superiores a aproximadamente 10 GeV/c, el porcentaje

de secundarios descartados era casi nulo en todas las trayectorias. Los tipos de secundarios que más fueron afectados por este filtro geomagnético fueron protones y neutrones.

Al comparar los resultados obtenidos para condiciones seculares y de tormenta geomagnética, no se observaron diferencias significativas en la cantidad de partículas que inciden en las trayectorias ni en sus distribuciones en impulso. Esto permite afirmar que una disminución del campo geomagnético externo caracterizada por un índice DST de -300 nT, no produce un cambio significativo en el flujo de partículas a la altura de los vuelos comerciales. Sin embargo, en este trabajo no se consideraron efectos heliósfericos lejanos característicos de las tormentas geomagnéticas, los cuales sí pueden generar una variación en el flujo de partículas.

Las simulaciones de lluvias realizadas se validaron encontrando para la distribución de muones un ajuste tipo $\cos^2\theta \sin\theta$, el cual es típico de este tipo de partículas. Asimismo, la incertidumbre de los resultados obtenidos para las rutas de vuelo se estimó en un 30 % para el caso crítico de una trayectoria polar que se da durante el invierno, de manera que la incertidumbre en las trayectorias usadas en este trabajo es ciertamente menor a este valor.

Como futuro trabajo de investigación a partir de esta tesis es posible hacer un refinamiento de los cálculos incluyendo la corrección por el blindaje que ofrece el fuselaje del avión. Posteriormente, se podría cuantificar el impacto sobre el tejido biológico haciendo el cálculo de la dosis efectiva mediante los pesos adecuados para cada especie de partícula.

Este trabajo fue presentado en los siguientes eventos en modalidad de póster:

- *X Latin American Symposium on High Energy Physics* (SILAFAE) 2014 en Medellín, Colombia.
- Simposio Andino de Astrofísica Relativista 2015. Bucaramanga, Colombia.

Adicionalmente, este trabajo fue publicado en: S. Pinilla, H. Asorey and L. Núñez, Cosmic Rays Induced Background Radiation on Board of Commercial Flights, Nuclear and Particle Physics Proceedings, in press (2015), doi:10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.139

Apéndice A

Porcentaje de partículas filtradas por corrección geomagnética

A.1. Ruta Bogotá - Buenos Aires

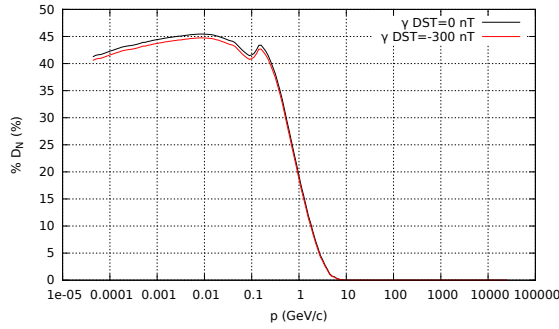


Figura A.1: *Diferencia relativa porcentual de γ .*

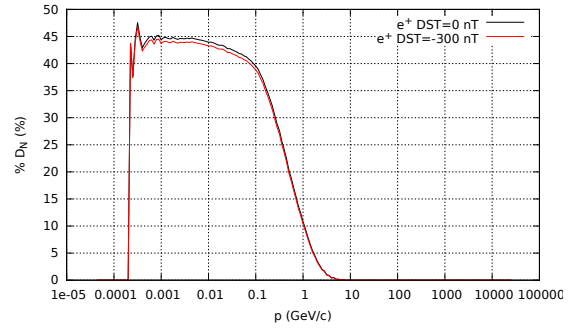


Figura A.2: *Diferencia relativa porcentual de e^+ .*

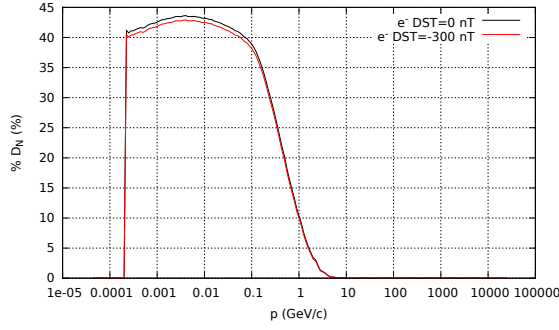


Figura A.3: *Diferencia relativa porcentual de e^- .*

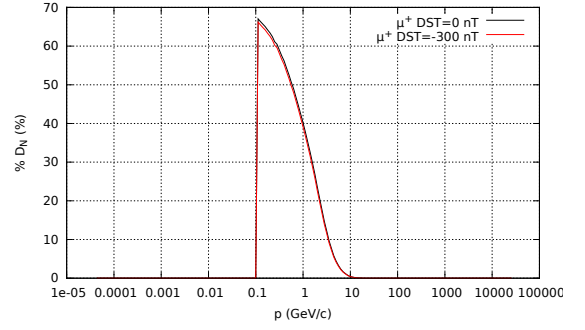


Figura A.4: *Diferencia relativa porcentual de μ^+ .*

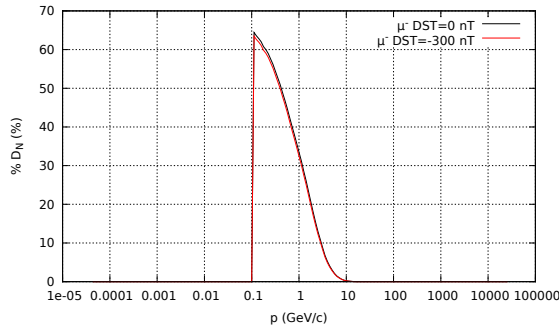


Figura A.5: *Diferencia relativa porcentual de μ^- .*

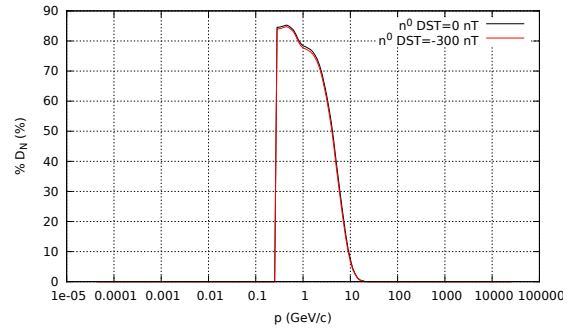


Figura A.6: *Diferencia relativa porcentual de n^0 .*

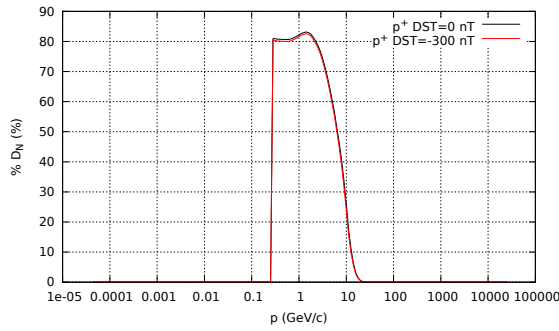


Figura A.7: *Diferencia relativa porcentual de p^+ .*

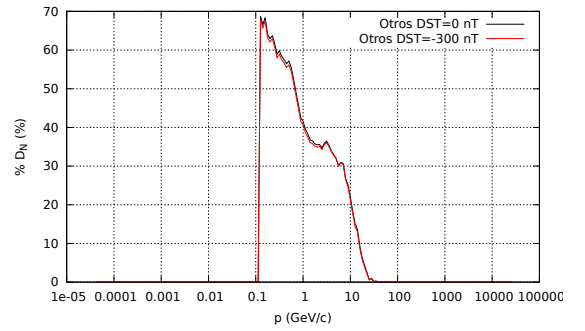


Figura A.8: *Diferencia relativa porcentual de otras partículas.*

A.2. Ruta Buenos Aires - Madrid

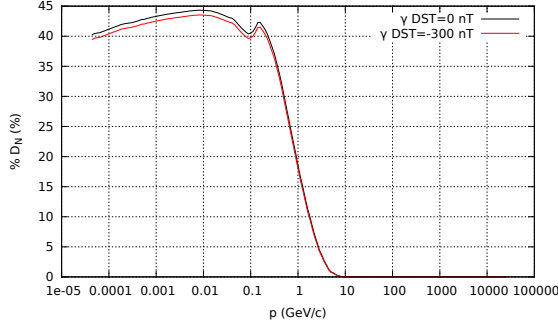


Figura A.9: *Diferencia relativa porcentual de γ .*

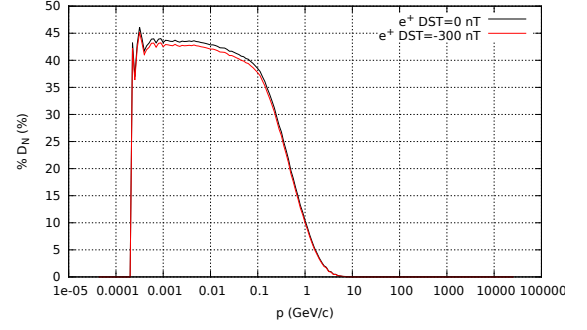


Figura A.10: *Diferencia relativa porcentual de e^+ .*

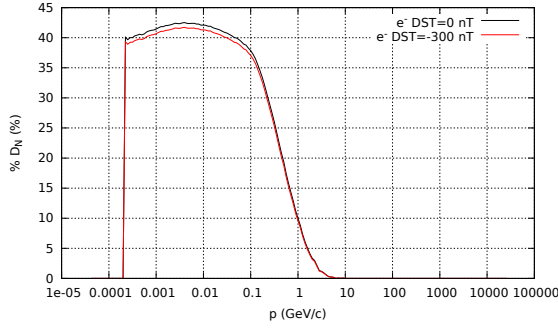


Figura A.11: *Diferencia relativa porcentual de e^- .*

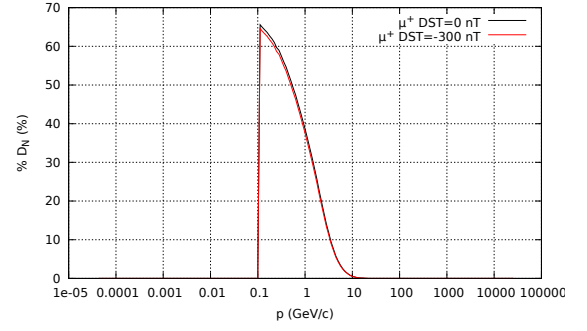


Figura A.12: *Diferencia relativa porcentual de μ^+ .*

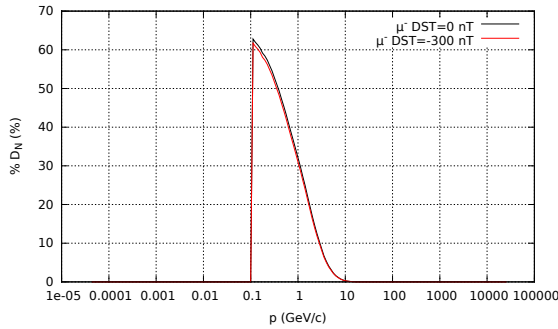


Figura A.13: *Diferencia relativa porcentual de μ^- .*

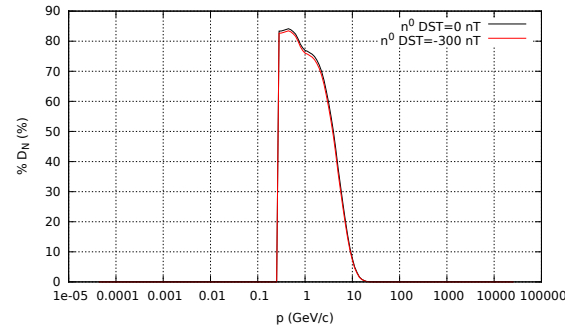


Figura A.14: *Diferencia relativa porcentual de n^0 .*

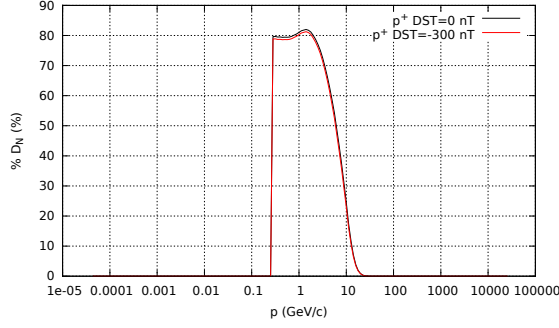


Figura A.15: *Diferencia relativa porcentual de p^+ .*

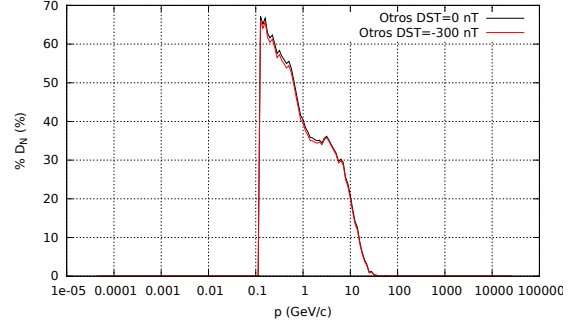


Figura A.16: *Diferencia relativa porcentual de otras partículas.*

A.3. Ruta Johannesburgo - Sydney

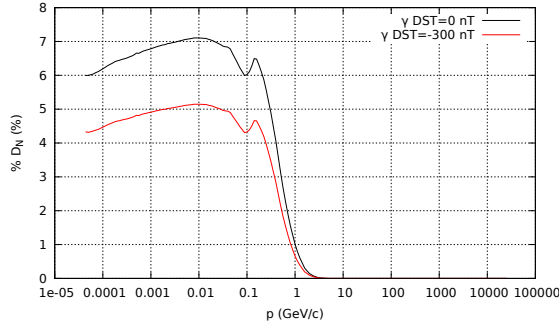


Figura A.17: *Diferencia relativa porcentual de γ .*

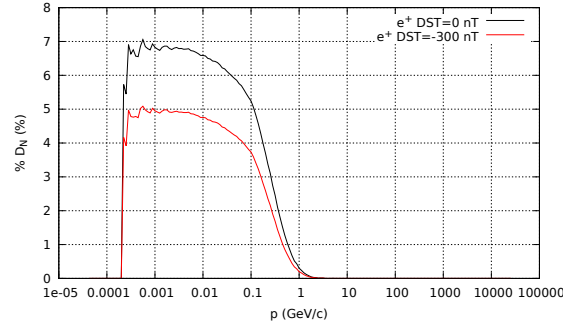


Figura A.18: *Diferencia relativa porcentual de e^+ .*

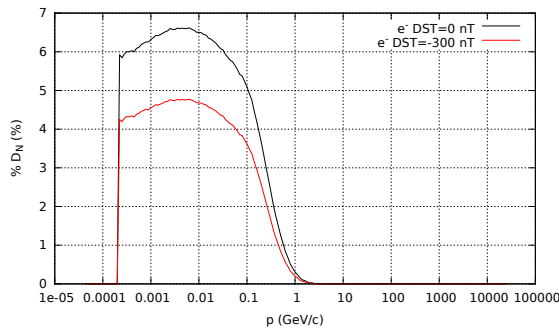


Figura A.19: *Diferencia relativa porcentual de e^- .*

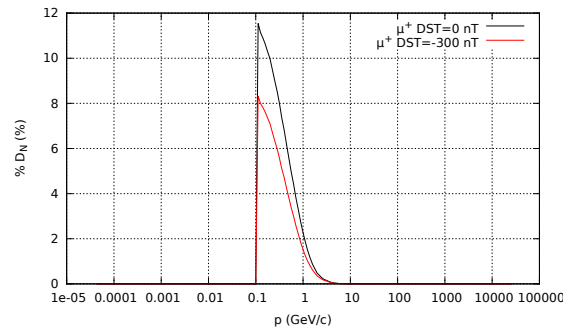


Figura A.20: *Diferencia relativa porcentual de μ^+ .*

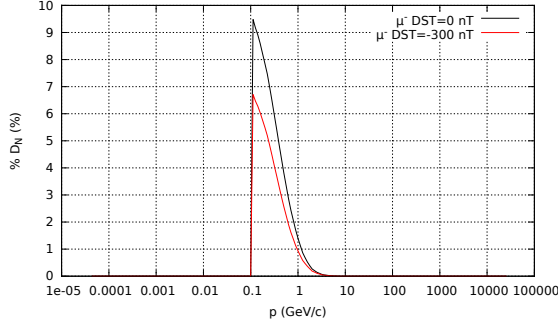


Figura A.21: *Diferencia relativa porcentual de μ^- .*

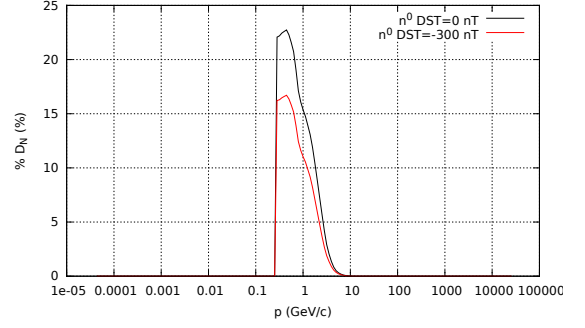


Figura A.22: *Diferencia relativa porcentual de n^0 .*

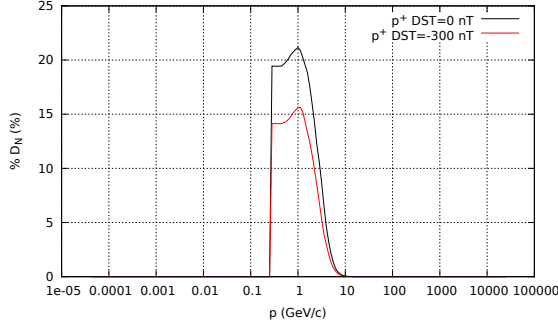


Figura A.23: *Diferencia relativa porcentual de p^+ .*

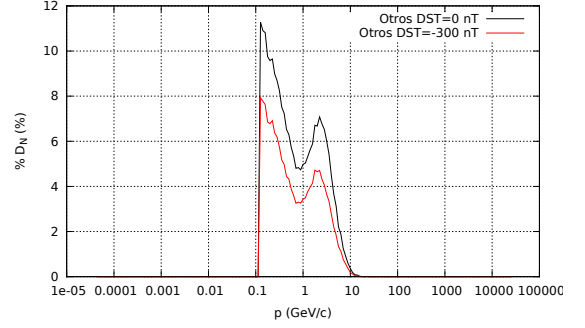


Figura A.24: *Diferencia relativa porcentual de otras partículas.*

A.4. Ruta Nueva York - Tokyo

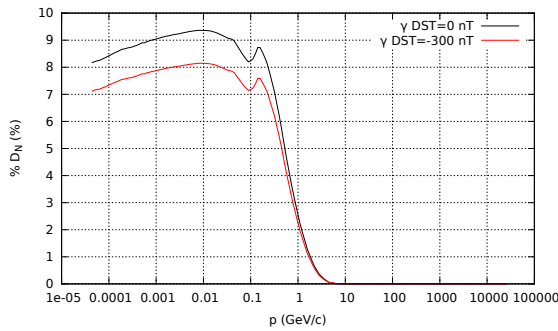


Figura A.25: *Diferencia relativa porcentual de γ .*

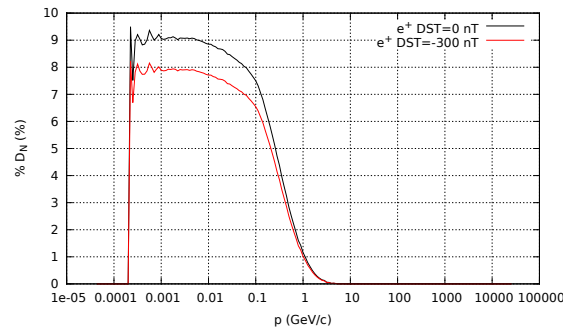


Figura A.26: *Diferencia relativa porcentual de e^+ .*

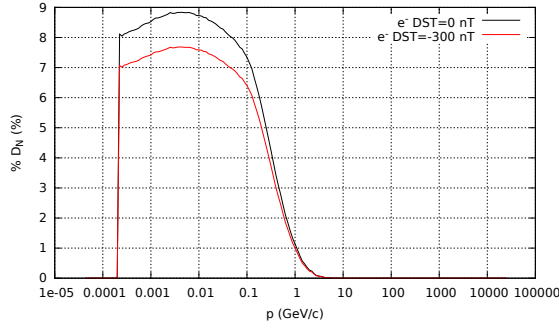


Figura A.27: *Diferencia relativa porcentual de e^- .*

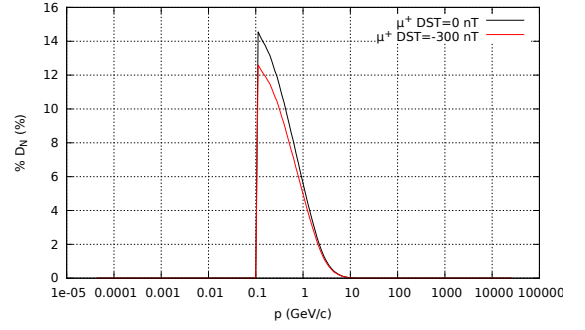


Figura A.28: *Diferencia relativa porcentual de μ^+ .*

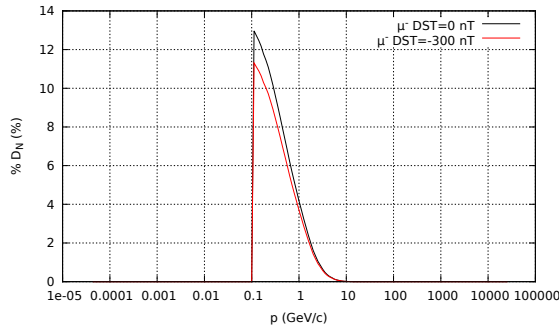


Figura A.29: *Diferencia relativa porcentual de μ^- .*

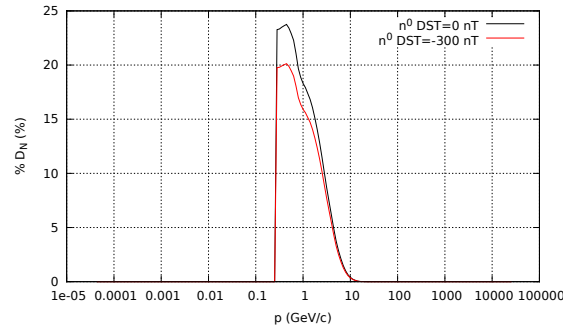


Figura A.30: *Diferencia relativa porcentual de n^0 .*

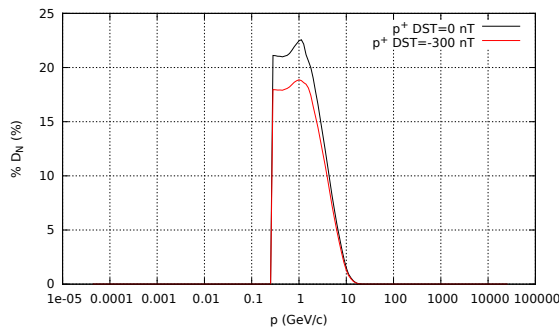


Figura A.31: *Diferencia relativa porcentual de p^+ .*

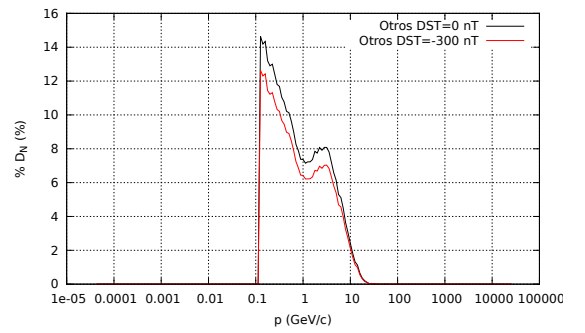


Figura A.32: *Diferencia relativa porcentual de otras partículas.*

A.5. Ruta Sao Paulo - Johannesburg

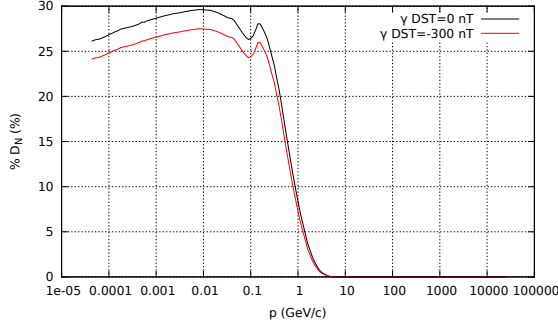


Figura A.33: *Diferencia relativa porcentual de γ .*

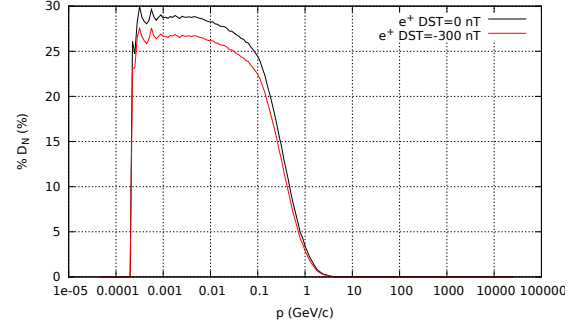


Figura A.34: *Diferencia relativa porcentual de e^+ .*

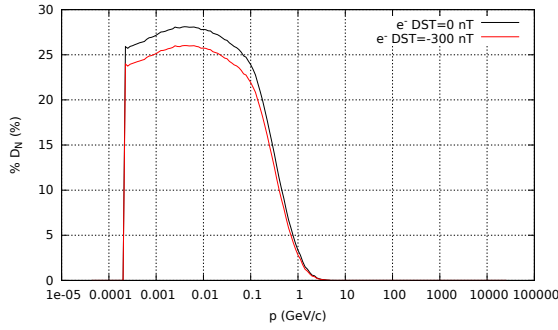


Figura A.35: *Diferencia relativa porcentual de e^- .*

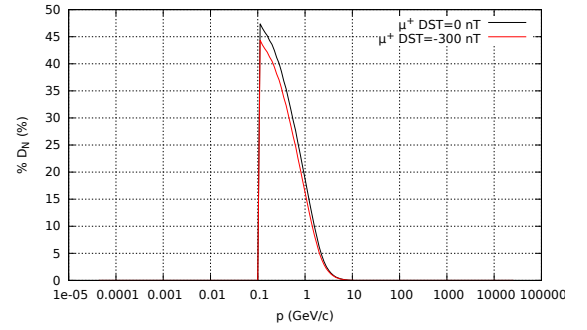


Figura A.36: *Diferencia relativa porcentual de μ^+ .*

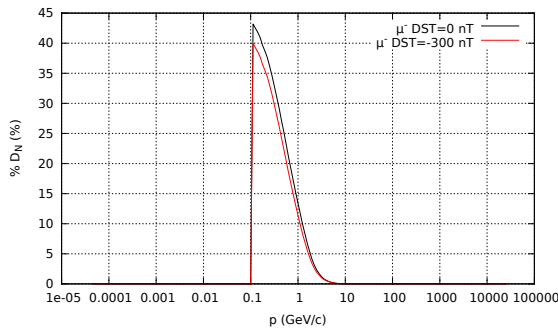


Figura A.37: *Diferencia relativa porcentual de μ^- .*

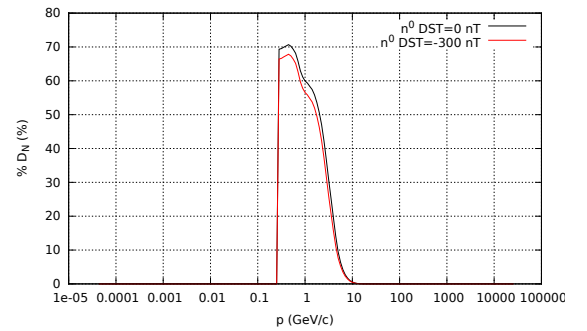


Figura A.38: *Diferencia relativa porcentual de n^0 .*

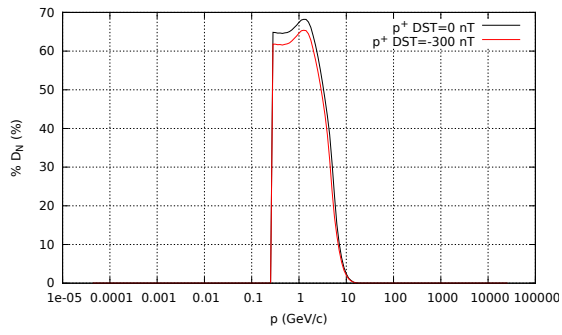


Figura A.39: *Diferencia relativa porcentual de p^+ .*

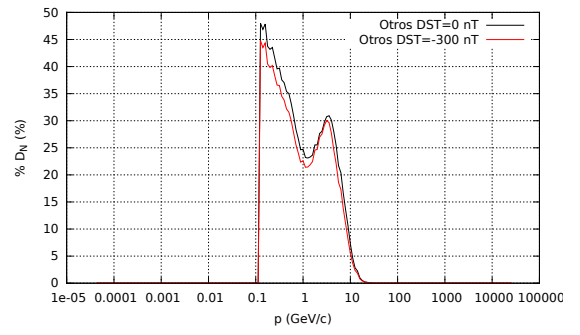


Figura A.40: *Diferencia relativa porcentual de otras partículas.*

Bibliografía

- [1] Sanlorenzo M, Wehner MR, Linos E, and et al. The risk of melanoma in airline pilots and cabin crew: A meta-analysis. *JAMA Dermatology*, 151(1):51–58, January 2015. [20](#)
- [2] M. Salhab and K. Mokbel. Breast cancer risk in flight attendants: an update. *International Journal of Fertility and Women's Medicine*, 51(5):205–207, October 2006. [20](#)
- [3] E. Lynge. Risk of breast cancer is also increased among Danish female airline cabin attendants. *BMJ (Clinical research ed.)*, 312(7025):253, January 1996. [20](#)
- [4] E. Pukkala, A. Auvinen, and G. Wahlberg. Incidence of cancer among Finnish airline cabin attendants, 1967-92. *BMJ (Clinical research ed.)*, 311(7006):649–652, September 1995. [20](#)
- [5] Eero Pukkala, Mika Helminen, Tor Haldorsen, Niklas Hammar, Katja Kojo, Anette Linnarsjö, Vilhjálmur Rafnsson, Hrafn Tulinius, Ulf Tveten, and Anssi Auvinen. Cancer incidence among Nordic airline cabin crew. *International Journal of Cancer. Journal International Du Cancer*, 131(12):2886–2897, December 2012. [20](#)
- [6] K. Kojo, E. Pukkala, and A. Auvinen. Breast cancer risk among Finnish cabin attendants: a nested case-control study. *Occupational and Environmental Medicine*, 62(7):488–493, July 2005. [20](#)
- [7] *Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma-radiation, and Neutrons*. IARC, January 2000. [20](#)
- [8] Hajo Zeeb, Maria Blettner, Ingo Langner, Gaël P. Hammer, Terri J. Ballard, Mariano Santaquilani, Maryanne Gundestrup, Hans Storm, Tor Haldorsen, Ulf Tveten, Niklas Hammar, Annette Linnarsjö, Emmanouel Velonakis, Anastasia Tzonou, Anssi Auvinen, Eero Pukkala, Vilhjálmur Rafnsson, and Jón Hrafnkelsson. Mortality from Cancer and Other Causes among Airline Cabin Attendants in Europe: A Collaborative Cohort Study in Eight Countries. *American Journal of Epidemiology*, 158(1):35–46, January 2003. [20](#)
- [9] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Annals of the ICRP*, 37(2-4):1–332, 2007. [21](#)
- [10] M. K. Lim. Cosmic rays: are air crew at risk? *Occupational and Environmental Medicine*, 59(7):428–432, January 2002. [21](#)

- [11] J. F. Bottollier-Depois, P. Beck, M. Latocha, V. Mares, D. Matthiä, W. Rühm, and F. Wissmann. Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Galactic Cosmic Radiation. Technical report, European Radiation Dosimetry Group e. V., Braunschweig, May 2012. [21](#)
- [12] L. Desorgher. MAGNETOCOSMICS Software User Manual, 2006. [21](#), [47](#)
- [13] D. Heck and T. Pierog. *Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide (Version 7.3500)*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013. [21](#), [47](#), [55](#), [56](#)
- [14] Per Carlson and Alessandro De Angelis. Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays. *The European Physical Journal H*, 35(4):309–329, April 2011. [23](#)
- [15] Nicola Giglietto. The contribution by Domenico Pacini to the Cosmic Ray Physics. *arXiv:1101.0398 [hep-ex, physics:physics]*, January 2011. arXiv: 1101.0398. [24](#)
- [16] V. F. Hess. Observations in low level radiation during seven free balloon flights. *Phys. Zeit*, 13:1084–1091, 1912. [24](#)
- [17] R. A. Millikan and G. Harvey Cameron. High Frequency Rays of Cosmic Origin III. Measurements in Snow-Fed Lakes at High Altitudes. *Physical Review*, 28(5):851–868, November 1926. [25](#)
- [18] Luisa Bonolis. Walther Bothe and Bruno Rossi: the birth and development of coincidence methods in cosmic-ray physics. *arXiv:1106.1365 [physics, physics:quant-ph]*, June 2011. arXiv: 1106.1365. [26](#)
- [19] Pierre Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, and Robley A. Fréon. Extensive Cosmic-Ray Showers. *Reviews of Modern Physics*, 11(3-4):288–291, July 1939. [26](#)
- [20] Laurie M. Brown and Lillian Hoddeson, editors. *The Birth of Particle Physics*. Cambridge University Press, Cambridge Cambridgeshire; New York, October 1986. [26](#)
- [21] William F. Hanlon. *The Energy Spectrum of Ultra High Energy Cosmic Rays Measured by the High Resolution Fly's Eye Observatory in Stereoscopic Mode*. ProQuest, 2008. [27](#)
- [22] H. Asorey. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. PhD thesis, Instituto Balseiro. Universidad Nacional de Cuyo. Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2012. [28](#), [31](#), [57](#), [61](#), [96](#)
- [23] P. K. F. Grieder, editor. *Cosmic Rays at Earth*. Elsevier Science, Amsterdam ; New York, 1 edition edition, August 2001. [28](#), [29](#), [31](#), [32](#), [33](#), [34](#), [60](#)
- [24] Barbara Wiebel-Sooth, Peter L. Biermann, and Hinrich Meyer. Cosmic Rays VII. Individual element spectra: prediction and data. *arXiv:astro-ph/9709253*, September 1997. arXiv: astro-ph/9709253. [28](#)
- [25] L. Cazon. Extensive Air Showers: from the muonic smoking guns to the hadronic backbone. *arXiv:1301.3340 [astro-ph, physics:hep-ph]*, January 2013. arXiv: 1301.3340. [31](#)

- [26] Thomas K. Gaisser. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1990. [31](#)
- [27] *Treatise on Geophysics*. Elsevier, April 2015. [34](#), [36](#), [37](#), [38](#)
- [28] A. A. Logachev and V. P. Zajarov. *Exploración magnética*. Reverte, 1978. [35](#)
- [29] I. G. Gass, Peter J. Smith, and R. C. L. Wilson. *Introducción a las ciencias de la tierra*. Reverte, 1980. [36](#)
- [30] William Lowrie. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, September 2007. [37](#), [38](#)
- [31] J. J. Love and K. J. Remick. Magnetic indices. In *Encyclopedia of Geomagnetism & Paleomagnetism*, pages 509–512. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2007. [39](#)
- [32] Y. Cerrato, E. Saiz, C. Cid, and M. A. Hidalgo. Geomagnetic Storms: Their Sources and a Model to Forecast the Dst Index. *Lecture Notes and Essays in Astrophysics*, 1:165–176, September 2004. [39](#)
- [33] J. J. Masías. *Estudios de actividad solar mediante modulación de rayos cósmicos galácticos*. PhD thesis, Instituto Balseiro. Universidad Nacional de Cuyo. Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2012. [40](#), [45](#), [46](#)
- [34] C. C. Finlay, S. Maus, C. D. Beggan, T. N. Bondar, A. Chambodut, T. A. Chernova, A. Chulliat, V. P. Golovkov, B. Hamilton, M. Hamoudi, R. Holme, G. Hulot, W. Kuang, B. Langlais, V. Lesur, F. J. Lowes, H. Lühr, S. Macmillan, M. Manda, S. McLean, C. Manoj, M. Menvielle, I. Michaelis, N. Olsen, J. Rauberg, M. Rother, T. J. Sabaka, A. Tangborn, L. Tøffner-Clausen, E. Thébaud, A. W. P. Thomson, I. Wardinski, Z. Wei, and T. I. Zvereva. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183(3):1216–1230, January 2010. [41](#), [56](#)
- [35] Christopher Finlay Susan Macmillan. The International Geomagnetic Reference Field. pages 265–276, 2010. [41](#), [56](#)
- [36] M. Suárez. *Modulación de rayos cósmicos secundarios a nivel del suelo por cambios en el campo geomagnético*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015. [41](#), [42](#), [97](#)
- [37] E. E. Woodfield, M. W. Dunlop, R. Holme, J. A. Davies, and M. A. Hapgood. A comparison of Cluster magnetic data with the Tsyganenko 2001 model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A6):A06248, 2007. [42](#)
- [38] D. J. Cooke, J. E. Humble, M. A. Shea, D. F. Smart, N. Lund, I. L. Rasmussen, B. Byrnek, P. Goret, and N. Petrou. On cosmic-ray cut-off terminology. *Il Nuovo Cimento C*, 14(3):213–234, May 1991. [44](#)
- [39] D. F. Smart and M. A. Shea. A review of geomagnetic cutoff rigidities for earth-orbiting spacecraft. *Advances in Space Research*, 36(10):2012–2020, 2005. [45](#), [98](#)

- [40] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1998. [47](#), [55](#), [57](#)
- [41] F.X. Kneizys, L.W. Abreu, G.P. Anderson, J.H. Chetwynd, E.P. Shettle, A. Berk, L.S. Bernstein, D.C. Robertson, P. Acharya, L.S. Rothman, J.E.A. Selby, W.O. Gallery, and S.A. Clough. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. *Phillips Laboratory, Hanscom AFB, MA*, 1731, 1996. [56](#)
- [42] J. Wentz, I. M. Brancus, A. Bercuci, D. Heck, J. Oehlschläger, H. Rebel, and B. Vulpescu. Simulation of Atmospheric Muon and Neutrino Fluxes with CORSIKA. *Physical Review D*, 67(7), April 2003. arXiv: hep-ph/0301199. [56](#)
- [43] Yi-Hong Kuo. *Determination of the angular distribution of cosmic rays at sea level*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010. [60](#), [61](#)
- [44] Elton Ho. Cosmic Ray Muon Detection using NaI Detectors and Plastic Scintillators, 2010. [60](#)
- [45] Halil Arslan, Mehmet Bektasoglu, Halil Arslan, and Mehmet Bektasoglu. Geant4 Simulation Study of Deep Underground Muons: Vertical Intensity and Angular Distribution, Geant4 Simulation Study of Deep Underground Muons: Vertical Intensity and Angular Distribution. *Advances in High Energy Physics, Advances in High Energy Physics*, 2013, 2013:e391573, October 2013. [60](#)