

Nuevo método para determinar los pesos estadísticos de radiación y tejido humano en la
evaluación de dosis de radiación absorbida efectiva para la aviación en la atmósfera
terrestre

César Yohán Pérez Arias

Trabajo de Grado para optar al título de Físico

Director

Ph.D. Fernando Andrés Quiñonez Granados

Co-Director

Ph.D. Luís Alberto Núñez de Villavicencio

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2020

*Dedicado a
mi familia*

Agradecimientos

Se necesita mucha valentía para levantarse contra cualquier adversidad, palabras que plasman las enseñanzas de mi papá y lo profundamente agradecido que estoy con él. Con el ánimo de cada día de mi mamá, mis hermanas Yésica y Lina, y mi hermano Jan Carlos, siempre tenía una inspiración para cumplir mis sueños. Gracias a mis profesores Fernando y Luís, por brindarme su apoyo y ver el camino de un investigador. A mi amor Lauren, por estar siempre a mi lado brindándome mucho cariño. Gracias a todas esas personas que fueron parte de mi vida al acogerme y brindarme todo su cariño en mi estadía en Bucaramanga. Y finalmente, esto no pudo realizarse sin la ayuda desde lo más alto y grande, Dios.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	20
1.1. Objetivo general	20
1.2. Objetivos específicos	20
2. Rayos cósmicos en la atmósfera terrestre	21
2.1. Historia de la investigación de la radiación y los rayos cósmicos	21
2.2. El espectro de rayos cósmicos	28
2.3. Lluvias atmosféricas extendidas	32
2.4. La estructura de la atmósfera	35
2.5. Características del campo geomagnético	37
2.6. Partículas a través de la materia	41
2.6.1. Momentos y secciones transversales	43
2.6.2. Poder de frenado	45
2.6.3. Longitud de radiación	47
2.6.4. Radiación Cherenkov	50
2.6.5. Radiación de Transición	52
2.6.6. Pérdida de energía por fotones	52

2.7. Principios, cantidades dosimétricas y de radioprotección	54
2.7.1. Clasificación de la radiación	54
2.7.2. Fluencia	55
2.7.2.1. Fluencia de partículas	55
2.7.2.2. Fluencia de energía	55
2.7.3. Transferencia de Energía Lineal LET	56
2.7.4. Exposición de Radiación	57
2.7.5. Magnitudes limitadoras	57
2.7.5.1. Dosis absorbida	58
2.7.5.2. Dosis equivalente	58
2.7.5.3. Dosis efectiva	62
2.7.6. Magnitudes operacionales	63
2.7.6.1. Equivalente de dosis ambiental	64
2.7.6.2. Equivalente de dosis personal	64
2.8. Radiobiología Básica	65
2.8.1. Irradiación de Células	65
2.8.1.1. Acción directa en el daño celular por radiación	65
2.8.1.2. Acción indirecta en el daño celular por radiación	65
2.8.1.3. Destino de las células irradiadas	66
2.8.2. Tipo de Daño a la Radiación	67
2.8.2.1. Escala de tiempo	67

PESOS ESTADÍSTICOS DE RADIACIÓN Y TEJIDO	6
2.8.2.2. Clasificación del daño por radiación	68
2.8.2.3. Efectos somáticos y genéticos	69
2.8.2.4. Efectos estocásticos y deterministas	69
2.9. Herramientas de Simulación	70
2.9.1. CARI-7A	70
2.9.2. ROOT	71
2.9.3. GATE	71
3. Métodos y estimaciones generales sobre los cálculos	74
3.1. Selección de la ruta	74
3.2. Modelo antropomórfico del maniquí de prueba	75
3.3. Simulación de las lluvias	77
3.4. Conteo de partículas	79
3.5. Parámetros de las simulaciones en GATE	83
3.5.1. Geometría	83
3.5.2. Física	84
3.5.3. Fuente	85
3.6. Cálculos radiación Cherenkov	85
3.7. 3. Pesos Estadísticos de Radiación	86
4. Resultados	88
4.1. Dosis de radiación para esferas de órganos	90

4.2. Dosis de radiación para esferas de agua con los mismos radios para órganos	93
4.3. Cálculo de pesos de radiación y tejido	96
4.4. Radiación Cherenkov	101
5. Discusión de los Resultados	106
6. Conclusiones	113
Referencias Bibliográficas	117

Lista de Figuras

Figura 1.	Röntgen y el descubrimiento de los rayos X.	23
Figura 2.	Röntgen y el descubrimiento de los rayos X.	26
Figura 3.	Incremento de la tasa de ionización con la altitud. Experimentos de Hess y Kolhörster.	27
Figura 4.	Incremento de la tasa de ionización con la altitud. Experimentos de Hess y Kolhörster.	27
Figura 5.	Espectro de rayos cósmicos.	30
Figura 6.	Esquema de una EAS.	33
Figura 7.	Evolución de las EAS iniciadas por un fotón, un protón y un núcleo de hierro, con $E_p = 10^{15}$ eV.	34
Figura 8.	Representación esquemática de la atmósfera que muestra su perfil de temperatura	37
Figura 9.	Sección transversal esquemática de la magnetósfera.	38
Figura 10.	Rigidez de corte en función de la latitud geomagnética para partículas positivas verticalmente incidentes a cenit de 0° , 45° Este y 45° Oeste	39
Figura 11.	Modulación de la actividad solar por rayos cósmicos.	41
Figura 12.	Poder de frenado de masa.	47

Figura 13. Pérdida de energía fraccional por longitud de radiación en el plomo en función de la energía de electrones o positrones.	48
Figura 14. Probabilidad de que la interacción de un fotón.	54
Figura 15. Clasificación de la radiación.	55
Figura 16. Pesos de radiación w_R para neutrones a diferentes energías	60
Figura 17. Ruta Dubái (OMDB)- Los Ángeles (KLAX)	74
Figura 18. Espectro de energía de los neutrones	78
Figura 19. Espectro de energía de los neutrones	79
Figura 20. Tipo de volumen sólido	83
Figura 21. Simulación en GATE de una esfera irradiada por partículas.	88
Figura 22. Número de fotones Cherenkov producidos por electrones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm	102
Figura 23. Número de fotones Cherenkov producidos por positrones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm	102
Figura 24. Número de fotones Cherenkov producidos por protones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm	103
Figura 25. Número de fotones Cherenkov producidos por muones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm	103
Figura 26. Número de fotones Cherenkov producidos por piones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm	104

Lista de Tablas

Tabla 1.	Definiciones de constantes comúnmente usadas.	41
Tabla 2.	Parámetros que describen la interacción de la radiación con la materia.	42
Tabla 3.	Pesos de radiación w_R .	60
Tabla 4.	Factor de ponderación del tejido w_T .	63
Tabla 5.	Duración del vuelo y ciudades de origen y destino con sus respectivos aeropuertos.	75
Tabla 6.	Propiedades de los tejidos para un hombre adulto.	76
Tabla 7.	Cálculo de la fluencia a partir de los histogramas	80
Tabla 8.	Área de la sección transversal para cada órgano.	81
Tabla 9.	Número de partículas para cada órgano en la ruta Ruta Dubái (OMDB)- Los Ángeles (KLAX)	82
Tabla 10.	Volumen sólido de una esfera.	84
Tabla 11.	Dosis de radiación para esferas de órganos, medidas en μSv .	91
Tabla 12.	Porcentaje de dosis de radiación D_R para esferas de órganos.	92
Tabla 13.	Dosis total de radiación para esferas de órganos, medidas en mSv.	92
Tabla 14.	Dosis de radiación para esferas de agua, medidas en μSv .	94
Tabla 15.	Porcentaje de dosis de radiación D_R para esferas de agua.	95

Tabla 16.	Dosis total de radiación para esferas de agua.	95
Tabla 17.	Pesos de radiación w_R .	97
Tabla 18.	Factor de ponderación del tejido w_T .	98
Tabla 19.	Dosis equivalente para esferas de tejido, medidas en μSv .	99
Tabla 20.	Dosis efectiva para esferas de tejido, medidas en mSv .	100
Tabla 21.	Número de fotones Cherenkov y energía que llevan estos fotones Cherenkov producidos por e^- , e^+ , p , μ^\pm y π^\pm .	104
Tabla 22.	Dosis producidas por e^- , e^+ , p , μ^\pm y π^\pm .	105

Resumen

Título: Nuevo método para determinar los pesos estadísticos de radiación y tejido humano en la evaluación de dosis de radiación absorbida efectiva para la aviación en la atmósfera terrestre ¹.

Autor: Pérez Arias, César Yohán².

Palabras Clave: Vuelos comerciales, Rayos cósmicos, Lluvias atmosféricas extendidas, Dosis de radiación.

Descripción: El propósito de este trabajo fue desarrollar un método de determinación de los pesos estadísticos de radiación w_R y tejido w_T , en el cálculo de dosis de radiación efectiva absorbidas por humanos adultos que vuelan en la ruta aérea comercial Dubái (OMDB)- Los Ángeles (KLAX) en condiciones seculares extremas, con una rigidez de corte del 0,4 GeV y acorde a un ciclo solar mínimo. El modelo antropomórfico de los tripulantes del avión, lo representamos como esferas de tejido, para un hombre adulto promedio con una masa de 75 [Kg]. Los resultados de dosis efectiva durante el vuelo, es prácticamente el doble que el límite umbral ocupacional durante un año, con una dosis efectiva de 39,93 [mSv/año], del valor de referencia propuestos por la ICRP-103, con una dosis efectiva 20 [mSv/año]. Además, se logró hacer el cálculo de las dosis absorbidas debida a la radiación Cherenkov producida por el paso de partículas cargadas en nuestro maniquí de prueba. Se observó una mayor producción de fotones Cherenkov en la banda UVC (100-280nm) del ultravioleta y prácticamente contribuye en la mayor parte la dosis absorbida. Los resultados de estas dosis no superan los límites ocupacionales. Por simplicidad de los cálculos, no se consideró el fuselaje del avión.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Fernando Andrés Quiñonez Granados (Director), Luís Alberto Núñez (Co-Director).

Abstract

Title: New method to determine the statistical weights of radiation and human tissue in the evaluation of effective absorbed radiation dose for aviation in the Earth's atmosphere ³.

Author: Pérez Arias, César Yohán⁴.

Keywords: Commercial flights, Cosmic rays, Extended atmospheric rains, Radiation dose.

Description: The purpose of this work was to develop a method for determining the statistical weights of radiation w_R and tissue w_T , in the calculation of effective radiation doses absorbed by adult humans flying on the Dubai commercial air route (OMDB) - Los Angeles (KLAX) in extreme secular conditions, with a shear stiffness of 0.4 GeV and according to a minimum solar cycle. We represent the anthropomorphic model of the plane's crew as spheres of tissue, for an average adult man with a mass of 75 [Kg]. The results of effective dose during the flight is practically double the occupational threshold limit for one year, with an effective dose of 39.93 [mSv/year], of the reference value proposed by ICRP-103, with a dose effective 20 [mSv/year]. Furthermore, it was possible to calculate the absorbed doses due to the Cherenkov radiation produced by the passage of charged particles in our test manikin. A higher production of Cherenkov photons was observed in the UVC band (100-280nm) of the ultraviolet and practically contributes most of the absorbed dose. The results of these doses do not exceed occupational limits. For simplicity of calculations, the fuselage of the aircraft was not considered.

³ Bachelor thesis

⁴ Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Fernando Andrés Quiñonez Granados (Advisor), Luís Alberto Núñez (Co-Advisor).

Introducción

Con el aumento en el número de operaciones de aviones comerciales, en las últimas décadas, el acto de medir el nivel de dosis de radiación ionizante recibido por la tripulación, ha sido de gran atención de los investigadores. La razón proviene del hecho de que la tasa de dosis derivada de la radiación cósmica en la atmósfera, que es una fuente de exposición siempre presente y más importante para el monitoreo a largo plazo, aumenta considerablemente con la altitud, por lo que la tripulación puede superar la dosis límite anual de exposición pública propuesta por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP-103 (Protection, 2007)), que es 1 mSv. De ese modo, se incluye las exposiciones a los rayos cósmicos a altitudes aeronáuticas como parte de la exposición ocupacional en un sistema de protección radiológica en 1990 (on Radiological Protection, 1991).

El riesgo de cáncer es la principal preocupación de salud, asociada con la exposición a la radiación ionizante a las dosis relativamente bajas recibidas por los miembros de la tripulación. También hay evidencia de cataratas en astronautas y abortos espontáneos a dosis inusualmente bajas (Cucinotta et al., 2001),(Grajewski et al., 2015). Otros efectos conocidos de la radiación ionizante incluyen el daño al sistema nervioso central y un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular (Schauer and Linton, 2009). Para el hijo de un miembro de la tripulación irradiado durante el desarrollo prenatal, los mayores riesgos son la muerte en el útero y el cáncer mortal. Un niño también corre el riesgo de heredar defectos genéticos debi-

do a la radiación recibida por uno o ambos padres antes de la concepción del niño (Wilson et al., 2005, 2003).

Una importante variable de estado atmosférico, es el campo de radiación ionizante, impulsada por fenómenos meteorológicos espaciales. La Tierra es continuamente bombardeada con partículas altamente energéticas del espacio exterior. Las dos fuentes de radiación ionizante en la atmósfera son: los siempre presentes rayos cósmicos galácticos de fondo, con orígenes fuera del sistema solar y los eventos transitorios de partículas energéticas solares, que están asociados con erupciones en la superficie del Sol con duraciones de varias horas o hasta días con una intensidad muy variable.

Las partículas cósmicas son desviadas por el campo magnético terrestre y los niveles de dosis atmosféricos son más altos en latitudes altas y disminuyen hacia el ecuador donde el blindaje magnético es más fuerte. Además, el sol continuamente emite protones y electrones que, generalmente no tienen suficiente energía como para penetrar en el campo magnético terrestre. El viento solar produce un campo magnético que desvía la radiación cósmica entrante, resultado del ciclo de 11 años del sol observado en los monitores de radiación cósmica en tierra o el número de manchas solares (Gaisser et al., 1990).

La evaluación de la dosis y la cuantificación de los niveles de radiación ionizante, es de particular interés para la industria de la aviación, ya que es una fuente de exposición

humana a la radiación de alta transferencia lineal de energía (LET). Esta radiación es efectiva para romper directamente las cadenas de ADN en el tejido biológico o para producir radicales químicamente activos en el tejido que alteran la función de la célula, los cuales pueden provocar cáncer u otros efectos adversos para la salud. En consecuencia, existe una mayor preocupación sobre los posibles resultados de salud entre los pasajeros y la tripulación en el sector de la aviación comercial y privada (Wilson et al., 2005, 2003).

Como resultado, existe una creciente necesidad de medir y predecir los niveles de radiación en tiempo real a altitudes donde surcan los vuelos con el fin de proporcionar una evaluación continua de la exposición a la radiación ionizante y rastrear los niveles de exposición de la tripulación, así como también dar a conocer una base de datos para evaluar el impacto de la radiación ionizante en el sistema global de transporte aéreo como un todo, especialmente en vista del exponencial actual y futuro.

En 1994, la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos reconoció formalmente que las tripulaciones de aeronaves están expuestas a riesgos de radiaciones ionizantes (Copeland, 2013). La aceptación por parte de la sociedad de los riesgos asociados con la radiación depende de los beneficios que se obtengan del uso de la radiación. No obstante, los riesgos deben restringirse y mediante la aplicación de normas de seguridad radiológica. Por lo tanto, es esencial que las actividades relacionadas con la exposición a la radiación estén sujetas a ciertas normas de seguridad para proteger a las personas expuestas

a la radiación, ya sea desde el punto de vista laboral, con fines de diagnóstico o terapéuticos médicos o como miembros del público.

El daño de la radiación ionizante se denomina efecto estocástico si el riesgo, pero no la gravedad del efecto, es una función de la dosis efectiva. En general, se acepta que no se requiere una dosis mínima (denominada dosis umbral) para inducir un efecto estocástico (Hall and Giaccia, 2006). Esto se debe a que el mecanismo de los efectos estocásticos hacen que las células se reparan a sí mismas de forma incorrecta. Por ejemplo, una sola célula mal reparada puede eventualmente conducir al cáncer. Los efectos estocásticos también incluyen trastornos genéticos en generaciones sucesivas y la pérdida de vidas por tales efectos. El riesgo es acumulativo y persiste durante toda la vida de la persona expuesta. Por lo tanto, las personas expuestas a la radiación ionizante tienen un mayor riesgo de cáncer a lo largo de la vida, y su progeñie tiene un mayor riesgo de heredar trastornos genéticos. Los cánceres inducidos por radiación no se pueden distinguir de los cánceres del mismo tipo iniciados por otras causas, y no se puede predecir qué individuos en un grupo irradiado desarrollarán cáncer (Beir et al., 1990). Independientemente de en qué momento de la vida una persona recibe la dosis causante, los tumores inducidos por la radiación tienden a suceder cuando aparecen tumores del mismo tipo en la población no irradiada (Hall and Giaccia, 2006).

En esta tesis se propone un método computacional para calcular los pesos estadísticos de radiación w_R y tejido w_T , en el cálculo de dosis de radiación efectiva absorbidas por huma-

nos adultos que vuelan en rutas aéreas comerciales. Con el fin de tener un blindaje del campo magnético menos efectivo contra la radiación externa, se seleccionó la ruta Dubái (OMDB) - Los Ángeles (KLAX). Con el fin de estudiar el fondo de radiación durante un vuelo y su modulación por efectos, como el tiempo de exposición y eventos solares, se hacen simulaciones basadas en GATE es un software de código abierto basada en Geant4 (Agostinelli et al., 2003), la cual estima mediante métodos de Monte Carlo, los efectos de radiaciones ionizantes en tejidos. GATE encapsula herramientas versátiles, modulares, adaptadas para realizar simulaciones en medicina nuclear. El modelo antropomórfico de los tripulantes del avión, nuestro maniquí de prueba, lo representamos como una esfera. En el cálculo de la cantidad de dosis absorbidas para cada tejido, estas dependen no sólo del tipo de radiación incidente, sino también del tamaño y el tejido considerado, resaltando así una contribución mayoritaria en las dosis por parte de los protones y positrones, con un porcentaje del 48,86% y 42,48%, respectivamente, en un rango de energía entre 10^{-5} y 10^2 GeV. Los resultados de dosis efectiva durante el vuelo, es prácticamente el doble que el límite umbral ocupacional durante un año, valor de referencia propuestos por la ICRP-103, con una dosis efectiva 20 [mSv/año].

Adicionalmente, se estimará la dosis de radiación debida a fotones Cherenkov, causada por el paso de partículas altamente energéticas en nuestro maniquí de prueba, considerando las tres bandas del ultravioleta. Para el cálculo del número de fotones Cherenkov producido por las partículas cargadas y mediante ROOT, se hará una sistematización de los cálculos. Se observó que son producidos, en mayor número, fotones en la banda UVC (100-280nm)

de ultravioleta, seguido de la banda UVA (315-400nm). La mayor distribución y número de fotones Cherenkov, la mayor contribución en las dosis es por parte de los electrones y positrones, con una suma total de 3,208 [μGy].

Este trabajo está organizado en 5 capítulos de la siguiente manera: Al inicio, se da una breve descripción del estado actual de la investigación de los efectos de la radiación ionizante a la altura de vuelo de los aviones y sus motivaciones; en el capítulo 2 se presenta la teoría de los rayos cósmicos y su interacción con la atmósfera y el campo geomagnético, cantidades dosimétricas y de radioprotección y radiobiología Básica, teoría necesaria para comprender los resultados de este trabajo; en el capítulo 3 se dan detalles sobre las simulaciones realizadas y las aproximaciones utilizadas; en el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las trayectorias, mostrando el cálculo de los pesos de radiación w_R y tejido w_T y así calcular las dosis efectivas durante el vuelo y la discusión de estos resultados en el capítulo 5; finalmente, en el capítulo 6 se muestran las conclusiones de esta tesis.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general.

- Crear un nuevo método de determinación de los pesos estadísticos de radiación y tejido, en el cálculo de dosis de radiación efectiva absorbidas por humanos adultos que vuelan en rutas aéreas comerciales.

1.2. Objetivos específicos.

- Desarrollar una cadena de simulación detallada para estimar la dosis producida por Rayos Cósmicos Galácticos (GCR), en distintos tipos de tejido humano, tomando en cuenta la dinámica Tierra-Sol.
- Calcular la dosis absorbida por distintos tipos de tejido humano al ser irradiados por chubascos de partículas a lo largo de rutas aéreas.
- Estimar la dosis de radiación efectiva debida a fotones Cherenkov en las tres bandas del ultravioleta para todas las rutas aéreas consideradas.
- Usar los nuevos pesos estadísticos de radiación y tejido para calcular las dosis de radiación efectiva.

2. Rayos cósmicos en la atmósfera terrestre

2.1. Historia de la investigación de la radiación y los rayos cósmicos. Durante poco más un siglo se ha trabajado para profundizar el conocimiento y ampliar las aplicaciones de la radiación y otras nuevas formas de la energía. Los años entre 1895 y el comienzo del siglo XX fueron un periodo notable para la ciencia de la radiación. En sus primeros estudios, la exposición a esta radiación procedía de dos tipos de fuentes naturales: de los materiales radiactivos y la radiación cósmica que llega del espacio, el sol y las estrellas. La historia de la investigación de los rayos cósmicos es un relato romántico de aventura científica. Durante este siglo, investigadores de rayos cósmicos han escalado montañas, flotado sobre globos de aire caliente y viajado a los rincones lejanos de la tierra en su deseo por entender a estas partículas que se mueven velozmente desde el espacio. Sus exploraciones han resuelto misterios científicos y revelado muchos más. A continuación una breve historia de la investigación de la radiación y los rayos cósmicos.

Terminando la tarde del viernes 8 de noviembre de 1895, el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen, mientras experimentaba con los tubos Hittorff-Crookes⁵ y la bobina de

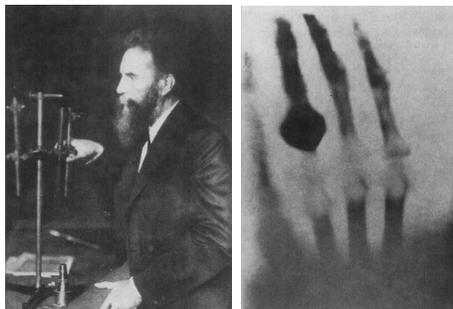
⁵ Consiste en un tubo de vidrio al vacío, por el cual circula gas de diferentes elementos a baja presión, que al aplicarles electricidad adquieren fluorescencia.

Ruhmkorff⁶, se producía simultáneamente una luz fluorescente en una pantalla de platino-cianuro de bario colocada a cierta distancia en un banco. Sorprendido por este efecto, a pesar de constatar el correcto recubrimiento del tubo, probó en repetidas ocasiones colocando la pantalla fluorescente a mayor distancia y, además de interponer diferentes elementos entre el tubo y la pantalla, obteniendo de manera constante el mismo resultado. En el momento de interponer los diferentes objetos, Röntgen se asombra de visualizar la sombra espectral de los huesos y tejidos blandos de sus propias manos en la pantalla fluorescente. También comprobó que algunos metales, especialmente platino y plomo, producían sombras en la pantalla, y más aún, pudo registrar gráficamente utilizando láminas fotográficas. Empezó a ser claro para Röntgen que esta era una nueva forma de luz, invisible para el ojo y que nunca había sido observada o registrada. Así fueron descubiertos los rayos X y nació la radiología (Eisenberg, 1992). En 1901 recibió el premio Nobel de Física.

⁶ Es un generador eléctrico que permite obtener tensiones muy elevadas, del orden de los miles o decenas de miles de voltios a partir de una fuente de corriente continua.

Figura 1

Izquierda: Fotografía de Röntgen de 1906, cuando era Director del Instituto de Física de la Universidad de Munich. Derecha: Radiografía original de la mano de la señora Röntgen. Extraído de (Guerrero, 1995).



En 1896, Henry Becquerel descubrió que ciertas sales de uranio emiten radiaciones espontáneamente⁷. En 1897 se le unió Marie Curie, quien estudiaba su doctorado. Marie pronto descubrió que otro elemento, el torio, también exhibía la misma emisión de rayos que el uranio y ella sugirió el término “radioactividad” para este fenómeno. El estudio del nuevo fenómeno y su desarrollo posterior se debe a los esposos Marie y Pierre Curie, quienes encontraron otras sustancias radiactivas: el polonio y el radio. Además, se apreció que en procesos llamados decaimientos radiactivos, estos elementos tenían numerosos descendientes, los cuales también eran radiactivos Stannard and Baalman Jr (1988). En 1903, Henry Becquerel, Marie Curie y Pierre Curie recibieron el Premio Nobel de Física por su trabajo sobre la radiactividad.

⁷ Propiedad de los isótopos de algunos elementos químicos que son inestables, emitiendo partículas.

En 1928, durante el Congreso Mundial de Radiología, se decidió crear la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) para que estudiase los efectos biológicos de los Rayos X y el Radio, y efectuase las primeras recomendaciones para su utilización segura. Esa organización adquiere la configuración actual en 1950, después de conocer los efectos devastadores de la energía nuclear, para cubrir con más eficacia el campo de la protección de las radiaciones y emitir las recomendaciones que son recogidas por la legislación de todos los países del mundo.

Por otro lado, antes del desarrollo del primer ciclotrón, creado por E. Lawrence en 1932 (Lawrence and Livingston, 1932), la única fuente de partículas con energía suficiente para producir nuevas partículas eran los rayos cósmicos. Las primeras observaciones se dieron en laboratorios de física, donde se veía que un electrómetro cargado y aislado, con el tiempo se descargaba sin ningún tipo de acción externa. Se creía que la radiactividad natural era el origen de este fenómeno. La tasa de descarga fue entonces utilizada para medir el nivel de radiactividad.

En 1900, C.T.R. Wilson sugirió que el origen de dicha ionización podría ser una radiación extraterrestre, extremadamente penetrante. Sin embargo, sus investigaciones en túneles con roca sólida no mostraron ninguna reducción en la ionización (Wilson, 1901). En 1903 Rutherford & Cooke Rutherford and Cooke (1903) y McLennan & Burton (McLennan and Burton, 1903) mostraron que la ionización se redujo significativamente cuando el electroscopio

pio estaba rodeado de escudos de metal, mantenido libre de impurezas radiactivas.

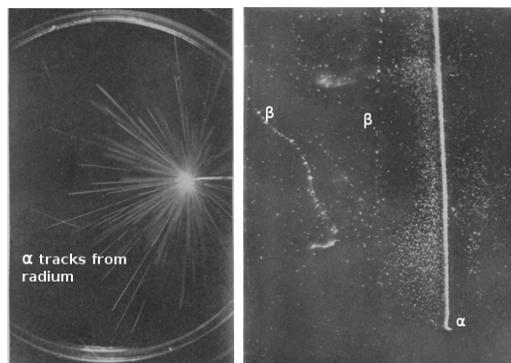
En 1909, Theodore Wulf, del Instituto de Física del Colegio Ignatus de Valkenburg, Holanda, modificó el electroscopio, hasta una sensibilidad de 1 voltio y haciéndolo transportable. Se suponía que la radiación provenía de la Tierra, esperando encontrar una rápida disminución de la radiación a medida que se alejaban de la superficie, midiendo así, tasas que decaían de un valor de 6 iones $s^{-1}cm^{-3}$ a 3,5 iones $s^{-1}cm^{-3}$ en la punta de la Torre Eiffel (Wulf, 1910) a 330 m s.n.m. No se encontró la disminución que se esperaba y en algunos casos parecía haber evidencia de que la radiación realmente aumentó. Si como se pensaba en la época, esas tasas provenían de radiación gamma, ese nivel de radiación correspondería a una altura de 80 m s.n.m.

Para 1911, Doménico Pacini por su lado, realizó observaciones de las tasas de ionización en montañas, sobre el mar y en Lagos. Al comparar las mediciones obtenidas al nivel del mar, con las obtenidas sobre la superficie en el Lago Bracciano (a 160 m s.n.m.) y a tres metros de profundidad, concluyó que bajo el agua la tasa disminuía, y por lo tanto debe haber una fuente adicional a la radiactividad natural. Informó de estas mediciones, los resultados que se derivaron y su interpretación en una nota titulada "*La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque*" (Radiación penetrante en la superficie de y en el agua) (Pacini, 1912).

Para el siguiente año, en 1912 C.T.R. Wilson obtiene las primeras imágenes de la trayectoria de partículas α y β en la cámara de niebla (Wilson, 1912). Cuando una partícula ionizante pasaba a través de la cámara, el vapor de agua se condensaba en los iones resultantes y la traza de la partícula era visible en la nube de vapor. Wilson, junto con Arthur Compton, recibió el Premio Nobel de física en 1927 por su trabajo en la cámara de niebla.

Figura 2

Izquierda: Fotografía de Röntgen de 1906, cuando era Director del Instituto de Física de la Universidad de Munich. Derecha: Radiografía original de la mano de la señora Röntgen. Extraído de (Guerrero, 1995).



Intrigado por los resultados confusos obtenidos por Wulf y sus colegas, el joven físico austríaco, Victor Hess, obtuvo el apoyo de la Academia Imperial Austríaca de Ciencias y del Royal Aero Club de Austria, consiguiendo una serie de globos para estudiar la radiación. En el vuelo final, el 7 de agosto de 1912, alcanzó una altitud de 5350 m s.n.m., llevando dos cámaras de ionización herméticamente selladas. Encontró que la tasa de ionización inicialmente disminuyó, pero que a unos 1500 m s.n.m. empezó a subir, hasta que a 5000 m s.n.m. fue más del doble de la tasa de superficie. Hess concluyó que los resultados de estas

observaciones pueden explicarse mejor por el supuesto de que la radiación, con un poder de penetración muy alto que entra desde arriba en la atmósfera y provoca parcialmente, incluso en las capas atmosféricas inferiores, la ionización en los instrumentos cerrados (Hess, 1912). El desarrollo de esta investigación, le valió a Hess el premio Nobel de Física en 1936. Los resultados de Hess fueron confirmados posteriormente por Werner Kolhörster (Kolhörster, 1913) en una serie de vuelos de hasta 9200 m s.n.m.

Figura 3

Incremento de la tasa de ionización con la altitud. Izquierda: En el vuelo final, el 7 de agosto de 1912, Victor Hess dispone de dos cámaras de ionización herméticamente selladas. Derecha: Ascenso de Kolhörster (1913,1914). Extraído de (De Angelis, 2011).

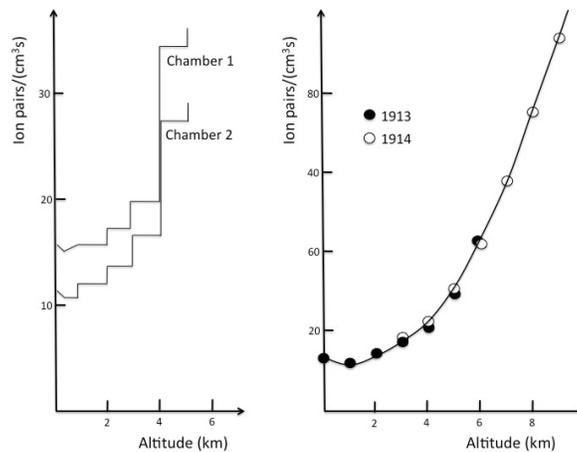


Figura 4

Incremento de la tasa de ionización con la altitud. Izquierda: En el vuelo final, el 7 de agosto de 1912, Victor Hess dispone de dos cámaras de ionización herméticamente selladas. Derecha: Ascenso de Kolhörster (1913,1914). Extraído de (De Angelis, 2011).

En 1927, en un viaje de Amsterdam a Java, J. Clay (Clay, 1927) observó una variación de la intensidad de los rayos cósmicos con la latitud, con una menor intensidad cerca del ecuador, estableciendo así que antes de entrar en el campo magnético de la Tierra, la

mayor parte de los rayos cósmicos primarios eran partículas cargadas. Posteriormente, en 1933, Bruno Rossi (Rossi, 1930) demostró que si los rayos cósmicos eran predominantemente de una carga u otra, debía haber un efecto este-oeste.

Ya en 1934, Baade y Zwicky (Baade and Zwicky, 1934), vincularon la aparición de supernovas con la formación de estrellas de neutrones y la generación de rayos cósmicos y para el año 1938, Pierre Auger (Auger et al., 1939) descubre las Lluvias Atmosféricas Extensas conocidas como EAS (Extensive Air Showers), por sus siglas en inglés. En 1947 C. Lattes, G. Occhialini y C. Powell descubren el pión (Lattes et al., 1947), y G. Rochester y C. Butler descubren el Kaón (Rochester and Butler, 1947).

Fermi consideró en 1949 los rayos cósmicos como un gas de partículas cargadas relativistas que se movían en campos magnéticos interestelares (Fermi, 1949). Su trabajo sentó las bases para la moderna teoría de la aceleración y el transporte de los rayos cósmicos. El modelo básico del origen de los rayos cósmicos galácticos fue desarrollado por Ginzburg y Syrovatskii en 1964 (Ginzburg and Syrovatskii, 1964).

2.2. El espectro de rayos cósmicos. Después de más de 100 años de investigación, sabemos que el sistema solar está permanentemente bombardeado por un flujo de partículas altamente energéticas. Sus energías se extienden desde el rango 10^6 eV hasta 10^{20} eV. El componente principal que llega a la parte superior de la atmósfera incluye todas las partículas y núcleos estables cargados, como también se encuentran algunos núcleos inestables (con

vidas mayores de 10^6 años).

Al flujo de partículas como función de su energía, es llamado espectro de rayos cósmicos. La figura 5 muestra el espectro de energía de los rayos cósmicos desde $\sim 10^8$ eV hasta $\sim 10^{20}$ eV, medida por un gran número de experimentos diferentes, desde pequeños detectores a bordo de globos y satélites, hasta enormes conjuntos de tanques en el suelo, cubriendo superficies de más de 3000 km². En el espectro de energía, para el rango menos energético, $E_p \lesssim 10^{10}$ eV (la energía del primario se representa E_p), las partículas cargadas entrantes son moduladas por el viento solar, el plasma magnetizado en expansión generado por el Sol, que desacelera y excluye parcialmente los rayos cósmicos galácticos de menor energía del sistema solar interno. Existe una anticorrelación significativa entre la actividad solar (que tiene un ciclo alternativo de 11 años) y la intensidad de los rayos cósmicos para estas energías (Gaisser et al., 1990).

Para energías mayores a $E_p \gtrsim 10^{10}$ eV (donde la contribución de las partículas procedentes del Sol, es insignificante) el espectro diferencial de energía puede ser descrito por una ley de potencia:

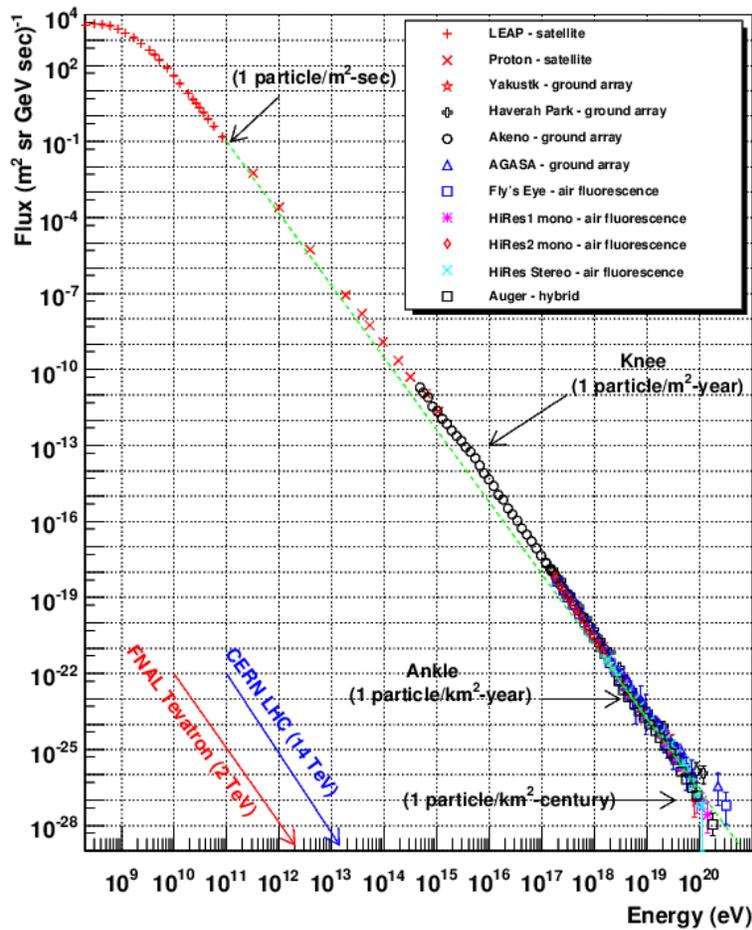
$$\left(\frac{dN}{dE_p} \right) \propto E_p^\alpha, \quad (1)$$

donde el parámetro α es el índice espectral diferencial del flujo de rayos cósmicos y

es aproximadamente igual a ~ -3 . Para energías de E_p en el rango $10 \text{ GeV} < E_p < 1 \text{ PeV}$, es dominado por H ($\sim 88\%$), He ($\sim 10\%$) y elementos del grupo C – N – O ($\sim 1\%$) (Wiebel-Sooth et al., 1997).

Figura 5

Se observa un cambio significativo del valor de α , en las tres regiones donde se indican con las flechas negras. Las flecha roja y azul, indican la energía de centro de masa equivalente alcanzado en el colisionador Tevatrón en Fermilab y en el colisionador LHC en el CERN. La línea discontinua muestra un espectro proporcional a E^{-3} . Extraído de (Hanlon, 2009).



En el espectro, hay dos puntos de transición (donde la pendiente del espectro cambia)

que son claramente visibles. Esta característica define tres intervalos de energía en el espectro. El punto de transición a $E_p \sim 3 \times 10^{15}$ eV se denomina *rodilla*, donde el índice espectral cae de $\alpha = -2.7$ a $\alpha = -3$. Encima de la rodilla, el flujo integral de rayos cósmicos disminuye en un factor ~ 50 cuando la energía aumenta en un orden de magnitud. Por debajo de la rodilla, el flujo disminuye en un factor ~ 100 cuando la energía aumenta en un factor de 10. A energías de $E_p \sim 2 \times 10^{18}$ eV, el espectro se vuelve más plano de nuevo en correspondencia con el segundo punto de transición, llamado *tobillo*, y finalmente alcanzar el valor final del índice espectral $\alpha = -4.2$ para $E_p \sim 4 \times 10^{19}$ eV.

La mayoría de los modelos asocian a la rodilla con un cambio de composición hacia elementos pesados (Hoerandel, 2003), producido por el agotamiento de los mecanismos de aceleración galácticos para elementos livianos. La siguiente estructura, el tobillo, se asocia con la transición del espectro de rayos cósmicos galácticos al espectro de origen extragaláctico, aunque también podría originarse en la producción de pares durante la propagación en un flujo dominado por protones. La observación del corte a $E_p \sim 40 \times 10^{19}$ eV, consistente con la observación del llamado efecto GZK, corresponde a una disminución en el flujo de rayos cósmicos debida a la interacción de UHECR⁸ con el fondo de radiación de microondas, que fue predicha por Greisen (Greisen, 1966) y Zatsepin y Kuz'min (Zatsepin and Kuzmin, 1966).

⁸ Ultra High Energy Cosmic Ray, por sus siglas en inglés.

El **espectro diferencial**, que puede ser total o de un determinado elemento químico, está definido como:

$$\varphi_{E,\Omega}(E^*; Z) = \frac{d^4 N(Z)}{da dt dE^* d\Omega} \quad (2)$$

donde N es el número de partículas de carga Z , a es un área de detección, t es un tiempo de medición, E^* es la energía de partículas por nucleón y Ω es el ángulo sólido. La superposición de todos los espectros de rayos cósmicos primarios con cargas de $Z = 1$ a $Z = 28$ se denominara **espectro de energía total**.

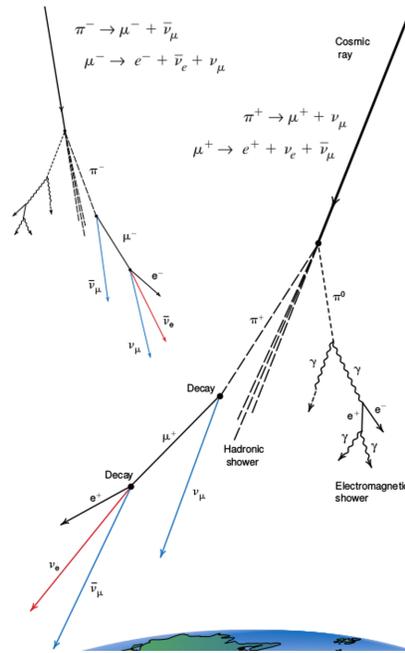
2.3. Lluvias atmosféricas extendidas. Se define como lluvia atmosférica extendida (EAS, por sus siglas en inglés) a la cascada de partículas debida a la interacción de un rayo cósmico primario con la atmósfera. A medida que los primarios se propagan entre la atmósfera, en dirección a la superficie, dan origen a nuevas partículas que se denominan secundarios en una serie de colisiones sucesivas con núcleos de los constituyentes atmosféricos (N_2, O_2, Ar). Así el número de secundarios y la extensión de la EAS dependerá de la altura sobre el nivel del mar.

La interacción de un primario con la atmósfera, ocurre típicamente entre 10 km y 40 km sobre la superficie terrestre y genera cascadas de partículas cuya cantidad, en el punto máximo del desarrollo, es proporcional a la energía del primario. En la figura 6, se muestra

el esquema de una EAS. Las partículas se distribuyen en tres componentes principales: la componente electromagnética (formada por electrones/positrones e^\pm y fotones γ), la componente muónica⁹ (formada por muones μ^\pm provenientes del decaimiento de mesones cargados, típicamente π^\pm y K^\pm), y la componente hadrónica (formada por hadrones, nucleones y algunos núcleos livianos). La relación numérica entre las tres componentes está directamente relacionada con el tipo de primario, pero normalmente la componente electromagnética domina las distribuciones numérica ($\sim 70\%$) y energética ($\sim 85\%$) de la energía del primario.

Figura 6

Esquema de una EAS. Al llegar a la Tierra, los rayos cósmicos de alta energía chocan con los núcleos presentes en la atmósfera superior. Extraído de (Louis et al., 1997).

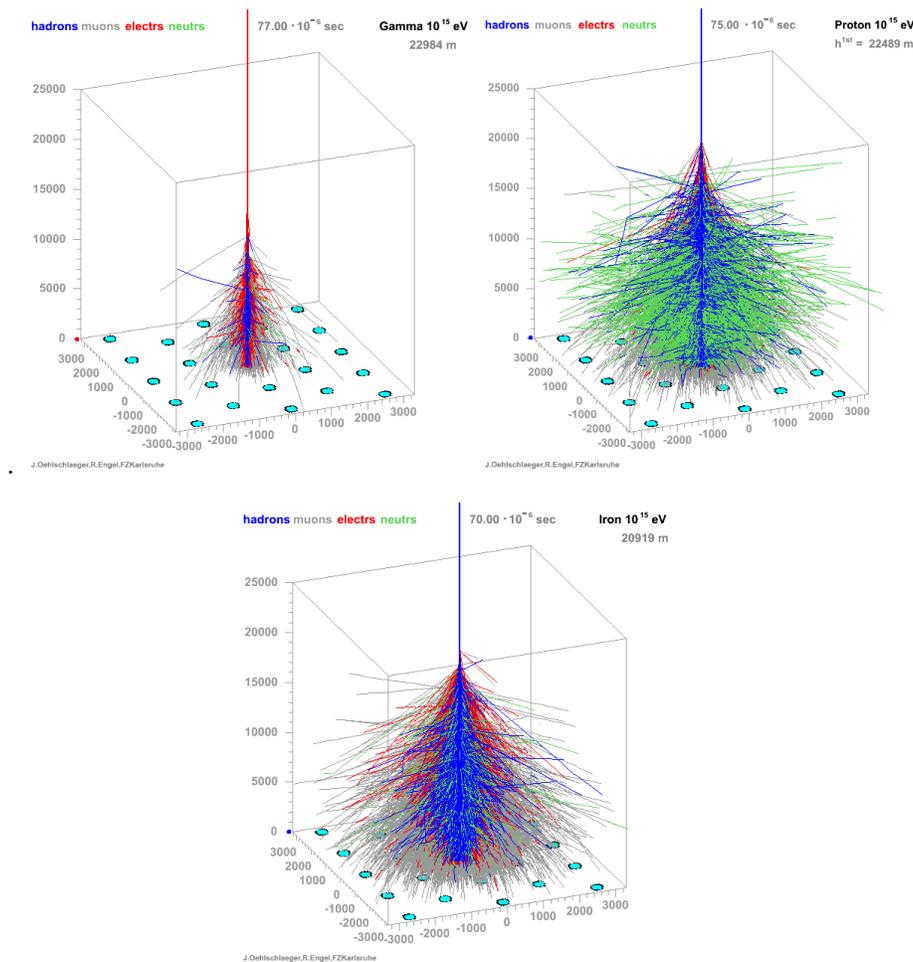


⁹ La componente de neutrinos que permanecen no detectados con la instrumentación estándar, debido a la pequeña sección transversal de estas partículas. (Grieder, 2001)

De igual modo, en la figura 7, se muestra el perfil de tres cascadas simuladas a través de la atmósfera que son iniciadas por un fotón, un protón y un núcleo de hierro, todas con la misma energía de 10^{15} eV. Las trayectorias son sólo de partículas que tienen una energía 10 GeV.

Figura 7

Evolución de las EAS. La componente electromagnética se muestra en rojo, los hadrones en azul, los muones en gris y partículas neutras en verde. Las partículas más extendidas en la región inferior de la atmósfera, son en su mayoría muones. Extraído de <https://www.ikp.kit.edu/corsika/index.php>



2.4. La estructura de la atmósfera. La atmósfera de la Tierra es un gran volumen de gas, compuesta principalmente por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%), con una densidad de casi 10^9 partículas por cm^3 sobre el nivel del mar. Con el aumento de la altitud, la densidad del aire disminuye al igual que el número de moléculas y núcleos por unidad de volumen. Dado que la atmósfera real es un sistema complejo, con frecuencia se utiliza una representación aproximada, denominado *atmósfera exponencial isotérmica estándar* Grieder (2001).

El parámetro principal relativo al desarrollo de una cascada de secundarios, es la cantidad de materia por encima de cualquier capa atmosférica, en la que el primario ha interactuado. Esta cantidad se denomina *profundidad atmosférica* (vertical) X_v . Esta profundidad es la integral en altitud de la densidad atmosférica ρ por encima del nivel de observación h :

$$X_v = \int_h^{\infty} \rho(h') dh', \quad (3)$$

Asumiendo la atmósfera como gas ideal, $\rho = Mp/kT$, donde k es la constante de Boltzmann, M es la masa molar del aire ($M = 0.02896 \text{ kg mol}^{-1}$), p es el peso atmosférico por unidad de superficie S y:

$$T(h) = \frac{M p}{k \rho} = -\frac{M}{k} \frac{g X_v}{dX_v/dh}, \quad (4)$$

con $T(h)$ la temperatura de la atmósfera en función de la altura. Las regiones específi-

cas dentro de la atmósfera se definen según su variación de temperatura, como se muestra en la figura 8. La temperatura de la tropósfera (que se extiende desde el suelo hasta 10 – 20 km de altura) disminuye aproximadamente con una altitud creciente a una rapidez de $\sim -6,5$ K/km.

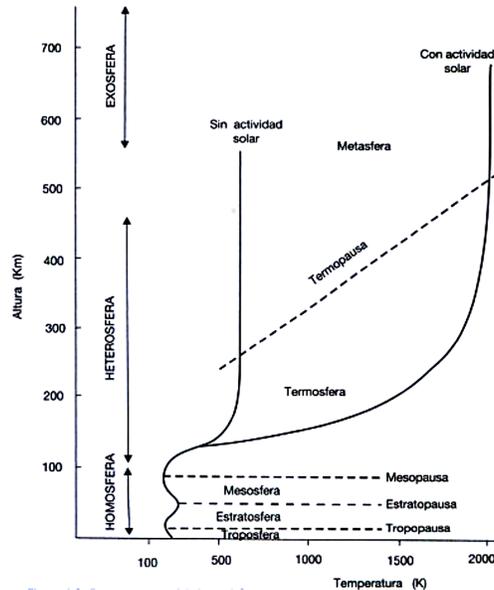
Sin embargo, en una primera aproximación, la atmósfera es considerada como un gas isotérmico con $T(h) = const.$ Bajo esta *aproximación isotérmica*, la ecuación 3 se puede integrar fácilmente:

$$X_v = X_v^{atm} e^{-h/h_0}, \quad (5)$$

con $X_v^{atm} = 1,030 \text{ g cm}^{-2}$. La escala de longitud atmosférica h_0 es definido como $h_0 = kT/Mg$. Usando el valor numérico de M y la temperatura de la superficie de la tierra ($T \simeq 290\text{K}$), entonces $h_0 \sim 8,4$ km. En regiones donde los rayos cósmicos interactúan, para una temperatura entre 210 – 240K, $h_0 \sim 6 - 7$ km.

Figura 8

Representación esquemática de la atmósfera que muestra su perfil de temperatura. Extraído de (López, 2012)



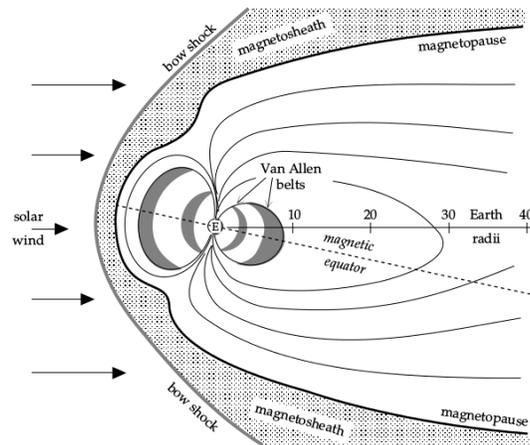
2.5. Características del campo geomagnético. El campo externo es muy complejo. La figura 9 muestra un representación esquemática del campo. Una corriente de partículas cargadas eléctricamente (que consiste principalmente en electrones, protones y núcleos de helio) es recibida constantemente, emitida por el Sol. Desde la tierra al sol (1 UA^{10}), la densidad del viento solar es de aproximadamente 7 iones por cm^3 y produce un campo magnético de aproximadamente 6 nT (Lowrie, 2007). El viento solar interactúa con el campo magnético de la tierra para formar una región llamada *magnetosfera*. A distancias mayores que unos pocos radios de la tierra, la interacción altera en gran medida el campo magnético.

¹⁰ Unidad astronómica (A.U. por sus siglas en inglés) es la distancia promedio entre la tierra y el Sol, la cual es aproximadamente 150 millones de kilómetros

A una gran distancia (alrededor de 15 radios terrestres) desde la tierra, en el lado diurno, el viento solar supersónico colisiona con la delgada atmósfera superior. Dentro de la región de choque de arco, el viento solar se ralentiza y se calienta. Después de atravesar el frente de choque, el viento solar se desvía alrededor de la tierra en una región de movimiento turbulento llamada *Magnetosheath*. Las partículas cargadas del viento solar constituyen corrientes eléctricas que refuerzan y comprimen el campo geomagnético en el lado diurno y estira en el lado nocturno de la tierra. Esto da como resultado una cola geomagnética o *magnetotail*, que se extiende a grandes distancias desde la tierra. La transición entre el campo magnético deformado y el magnetosheath se llama *magnetopausa*. Las partículas cargadas que penetran la magnetopausa quedan atrapadas por las líneas del campo geomagnético y forman los cinturones de radiación de Van Allen.

Figura 9

Sección transversal esquemática de la magnetósfera. Muestra varias regiones de interacción del campo magnético de la tierra con el viento solar. Extraído de (Lowrie, 2007)



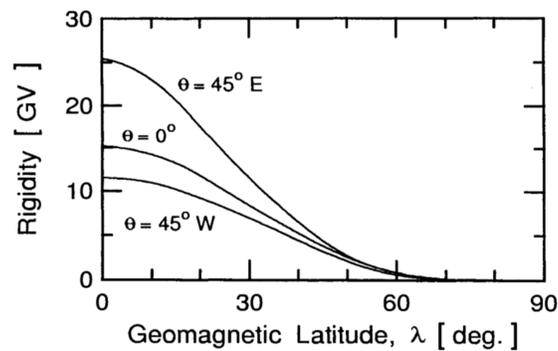
La rigidez, es una magnitud muy útil para caracterizar partículas cargadas que atraviesan un campo magnético, lo cuál es:

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{p}c}{Ze} \quad (6)$$

donde \mathbf{p} es el momento lineal, c la velocidad de la luz y Ze la carga eléctrica; \mathbf{R} suele expresarse en GV. Esta magnitud es esencial ya que para una rigidez inicial dada, la trayectoria de la partícula queda determinada para una configuración magnética dada. Definimos la *rigidez de corte*, R_c a la mínima rigidez que debe tener la partícula para arribar a un punto dado de la superficie terrestre. Se debe enfatizar que, en general, las coordenadas geomagnéticas y geográficas no son las mismas y el R_c depende de la ubicación y el tiempo. La figura 10 muestra la rigidez de corte en función de la latitud geomagnética para partículas positivas incidentes verticales e incidentes bajo un ángulo cenital de 45° desde el este y el oeste, respectivamente.

Figura 10

Rigidez de corte en función de la latitud geomagnética (representada aquí como λ), para partículas positivas verticalmente incidentes a cenit de 0° , 45° Este y 45° Oeste. Extraído de (Grieder, 2001)

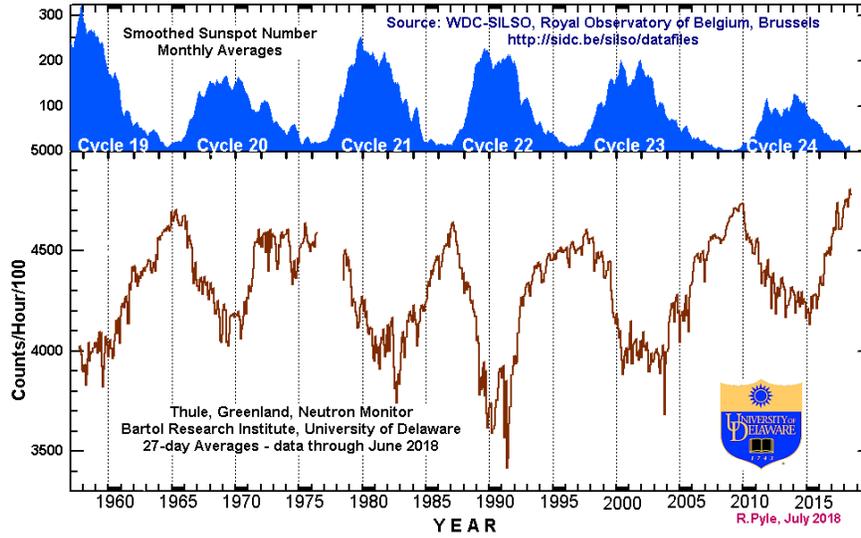


El transporte de rayos cósmicos galácticos en la heliósfera es uno de los tópicos de mayor interés en la física espacial, dada su estrecha relación con los niveles de radiación en el espacio interplanetario del sistema solar, cuyo estudio se enmarca dentro de lo que se conoce como climatología espacial. Dicho transporte es modulado por distintos mecanismos físicos, a su vez estos pueden dividirse en procesos de gran escala: relacionados con el campo magnético heliosférico, fenómenos transitorios: los generados por la eyección de materia solar, o respecto a su duración, que van desde varios ciclos solares, como los procesos relacionados con la dinámica solar, hasta de algunas horas, como los producidos por transitorios en la actividad a pequeña escala que se propagan junto con el viento solar cercano a la Tierra.

El estudio de las variaciones del flujo de rayos cósmicos suministra información sobre dicho transporte en la heliósfera, tanto interior como exterior, así como las partículas que ingresan al sistema solar provenientes del medio interestelar. A principios de la década de 1950 se desarrollaron los primeros monitores de neutrones, los cuales posibilitaron dicho estudio, logrando medir los flujos de rayos cósmicos (ver figura 11) con energías mayores que 1 GeV, al detectar neutrones secundarios con energías mayores que 10 MeV.

Figura 11

La modulación solar se refiere a la influencia que el Sol ejerce sobre la intensidad de los rayos cósmicos galácticos. A medida que aumenta la actividad solar (panel superior), la tasa de recuento registrada por un monitor de neutrones en Thule, Groenlandia disminuye (panel inferior). Extraído de *www.sidc.be/silso/datafiles*



2.6. Partículas a través de la materia. La notación y los valores numéricos importantes

se muestran en las tablas 2 y 1.

Tabla 1

Definiciones de constantes comúnmente usadas.

Constantes	Descripción
$m_e c^2 = 0.510998928(11) \text{ MeV}$	Masa del Electrón $\times c^2$.
$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = 1/137.035999074(44)$	Estructura Fina
$r_e = \frac{\alpha\hbar c}{m_e c^2} = 2.8179403267(27) \text{ fm}$	Radio clásico del Electrón.
$N_A = 6.02214129(27) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	Número de Avogadro.
$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307075 \text{ MeV mol}^{-1} \text{ cm}^2$	
$E_s = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha}} m_e c^2 = 21.2052 \text{ MeV}$	Escala de energía.
$\hbar\omega_p = \sqrt{4\pi N_e r_e^3} m_e c^2 / \alpha = \sqrt{\rho(Z/A)} \times 28.816 \text{ eV}$	Energía de Plasma.

Tabla 2

Parámetros que describen la interacción de la radiación con la materia.

Símbolo	Unidades	Descripción
M	MeV/c^2	Masa de la partícula incidente.
$E = \gamma M c^2$	MeV	Energía de la partícula incidente.
$T = (\gamma - 1) M c^2$	MeV	Energía cinética de la partícula incidente.
W	MeV	Energía transferida a un Electrón en una colisión simple.
k	MeV	Energía del Fotón de Bremsstrahlung.
z	1	Número de Carga de la Partícula Incidente.
Z	1	Número Atómico del Blanco Absorbente.
A	1	Masa Atómica del Blanco.
I	eV	Energía de Excitación Media.
ρ	g cm^{-3}	Densidad del Blanco Absorbente.
$\delta(\beta\gamma)$	g cm^{-3}	Corrección a la Densidad debido a ionización por pérdida de energía.
N_e	(unidades de r_e) ⁻³	Densidad de Electrones.
w_j	1	Fracción del j -ésimo elemento en un compuesto o mezcla.
n_j	1	Número de átomos de clase j en un compuesto o mezcla.
X_0	g cm^{-2}	Longitud de Radiación.
$E_c^{e^-}$	MeV	Energía Crítica para Electrones
$E_c^{\mu^-}$	GeV	Energía Crítica para Muones
R_M	g cm^{-2}	Radio de Molière.

2.6.1. Momentos y secciones transversales. Las interacciones electrónicas de partículas cargadas con velocidad $v = \beta c$, ocurren en colisiones simples con pérdidas de energía W dan lugar a ionización, a excitación atómica o colectiva. Muy frecuentemente las pérdidas de energía son pequeñas, para el 90% de todas las colisiones las perdidas de energía son menores que 100 eV, en blancos absorbentes delgados, toman lugar pocas colisiones y la pérdida de energía total mostrará una gran varianza (Bichsel, 2006).

Para partículas proyectiles más pesadas que el electrón con carga ze , la dispersión debida a *electrones libres* se describe mediante la sección transversal diferencial de Rutherford como función de W y β (Rossi, 1965), así:

$$\frac{d\sigma_R}{dW} = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2 z^2}{\beta^2} \frac{\left(1 - \beta^2 \frac{W}{W_{max}}\right)}{W^2}, \quad (7)$$

donde W_{max} es la máxima energía entregada en una colisión y viene dada por:

$$W_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}, \quad (8)$$

para electrones proyectiles, la máxima energía entregada en una colisión es:

$$W_{max} = m_e c^2 (\gamma - 1), \quad (9)$$

pero debido a que las partículas son idénticas, entonces sería la mitad, $W_{max}/2$. Los resultados son los mismos si la energía transferida es ϵ , o si la energía transferida es $W_{max} - \epsilon$. Aunque realmente los electrones no están libres, así que W es finita y depende de la estructura atómica. Para *electrones ligados en átomos*, Bethe (Bethe, 1930) obtuvo la sección transversal diferencial como función de W y β como:

$$\frac{d\sigma_B}{dW} = B(W) \frac{d\sigma_R}{dW}, \quad (10)$$

donde $B(W)$ es el factor de corrección. La teoría de Bethe es válida para energías por encima del valor tal que los efectos atómicos no son importantes. Para altas energías σ_B es modificado por la polarización del medio y varía con el cambio de la densidad del medio. El número medio de colisiones con pérdida de energía entre W y $W + dW$ que ocurren en una distancia δx es $N_e \delta x (\frac{d\sigma}{dW}) dW$, donde $\frac{d\sigma}{dW}$ contiene todas las contribuciones. N_e se mide ya sea en electrones/g, $N_e = N_A Z/A$ o; electrones/cm³, $N_e = N_A \rho Z/A$. Conviene introducir los momentos:

$$M_j(\beta) = N_e \delta x \int dW W^j \frac{d\sigma}{dW}, \quad (11)$$

donde reconocemos:

- M_0 es el número promedio de colisiones.
- M_1 es la pérdida de energía promedio.

- $(M_2 - M_1)^2$ es la varianza, etc. etc.

2.6.2. Poder de frenado. El poder de Frenado de Masa de un material el que está siendo atravesado por partículas cargadas, se define como:

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}. \quad (12)$$

La cantidad $S = dE/dx$ se conoce como el *poder de frenado lineal*. En general es la suma de las contribuciones de colisión elástica con los electrones, las pérdidas por radiación de frenado cerca a los electrones ligados y des-excitación atómica (radiativas) y la perdida de energía por interacción con los nucleones (ver figura 12), lo cual es:

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_e + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_n \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_e &= \frac{1}{\rho} S_e. \quad \text{Poder de frenado electrónico de masa.} \\ \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{rad} &= \frac{1}{\rho} S_{rad}. \quad \text{Poder de frenado radiativo de masa.} \\ \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_n &= \frac{1}{\rho} S_n. \quad \text{Poder de frenado nuclear de masa.} \end{aligned}$$

La tasa de pérdida de energía promedio para partículas a energías intermedias $0.1 \leq$

$\beta\gamma \leq 1000$, puede ser descrita por la ecuación de Bethe:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right], \quad (14)$$

para electrones proyectiles, el primer momento (dividido por dx) se calcula para la dispersión de Møller para el electrón (Uehling, 1954) más rápido:

$$\begin{aligned} -\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = & \frac{1}{2} K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{(m_e c^2)^2 \beta^2 \gamma^2 (\gamma - 1)}{2I^2} \right) \right. \\ & \left. + (1 - \beta^2) - \left(\frac{2\gamma - 1}{\gamma^2} \right) \ln 2 + \frac{1}{8} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 - \delta \right], \end{aligned} \quad (15)$$

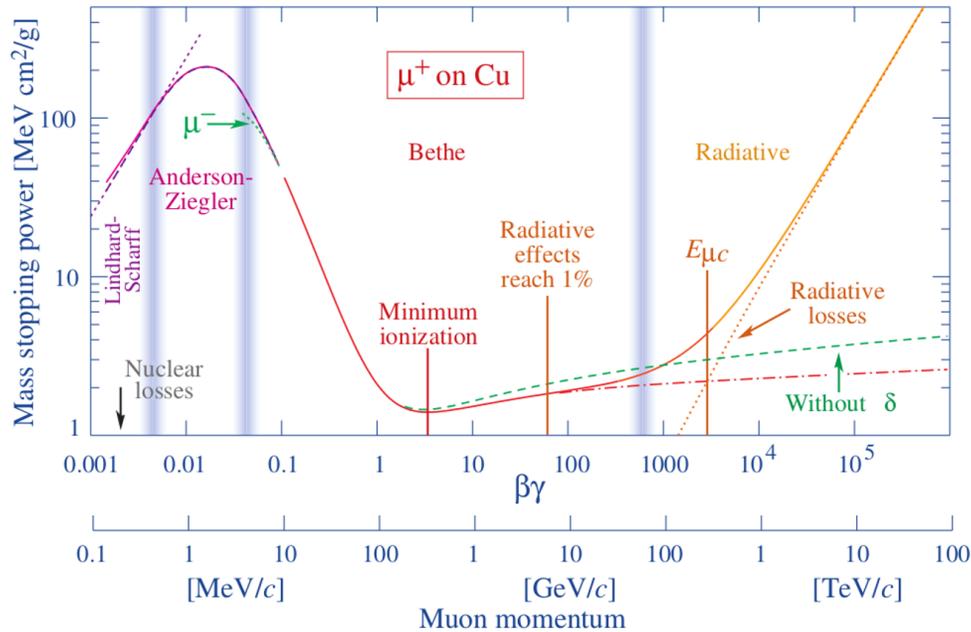
mientras que para positrones proyectiles, la dispersión Bhabba¹¹ no presenta el problema de partículas idénticas así que $W_{max} = m_e c^2 (\gamma - 1)$, y el primer momento queda:

$$\begin{aligned} -\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = & \frac{1}{2} K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{(m_e c^2)^2 \beta^2 \gamma^2 (\gamma - 1)}{2I^2} \right) + 2 \ln 2 \right. \\ & \left. - \frac{\beta^2}{12} \left(23 + \frac{14}{\gamma + 1} + \frac{10}{(\gamma + 1)^2} + \frac{4}{(\gamma + 1)^3} \right) - \delta \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

¹¹ La dispersión de Bhabha es el proceso de dispersión electrón-positrón.

Figura 12

Poder de frenado de masa para muones positivos en cobre en función de $\beta\gamma = p/Mc$ en nueve órdenes de magnitud en momento (12 órdenes de magnitud en energía cinética). Las curvas sólidas indican el poder de frenado total. Las líneas punteadas con la etiqueta μ^\pm ilustran el efecto Barkas, la dependencia de detener la carga de proyectiles a muy bajas energías (Barkas et al., 1956). Extraído de (Groom and Klein, 2000).



2.6.3. Longitud de radiación.

Los electrones de alta energía principalmente pierden energía por bremsstrahlung, mientras que los fotones por producción de pares electrón-positrón. La energía a la cual la energía perdida por un bremsstrahlung es igual a la energía perdida por ionización, es llamada la energía crítica E_c . La cantidad de materia atravesada por una partícula que involucra las interacciones relacionadas de bremsstrahlung y de producción de pares, es llamada la longitud de radiación X_0 , cuyas unidades usuales son g/cm^2 . La longitud de radiación X_0 es:

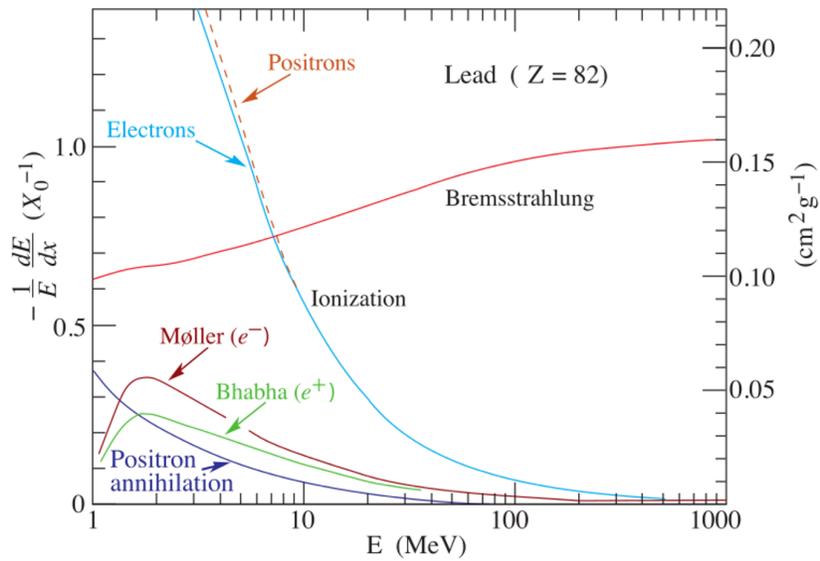
- La distancia media en la que el electrón pierde $1/e$ de su energía por bremsstrahlung,

o

- 7/9 del camino libre medio para la producción de pares por un fotón de alta energía.

Figura 13

Pérdida de energía fraccional por longitud de radiación en el plomo en función de la energía de electrones o positrones. La dispersión de electrones se considera como ionización cuando la pérdida de energía por colisión está por debajo de 0.255 MeV, y como dispersión de Møller (Bhabha) cuando está por encima. Extraído de (Groom and Klein, 2000).



La longitud de interacción viene dada por:

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} \left[Z^2 (L_{rad} - f(Z)) + Z L'_{rad} \right], \quad (17)$$

con $f(z)$ una suma infinita, pero para elementos con Z menor que el del Uranio, se

tiene una relación que es correcta hasta la cuarta cifra decimal:

$$f(Z) = a^2 \left[(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^2 + 0.0083a^4 - 0.002a^6 \right], \quad (18)$$

con $a = \alpha Z$. Para mezclas o compuestos su expresión es:

$$\frac{1}{X_0} = \sum_j \frac{w_j}{X_j}, \quad (19)$$

donde w_j y X_j son la fracción y la longitud de radiación para el elemento de clase j .

Para la pérdida de energía en mezclas o compuestos se tiene:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \sum_j w_j \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_j. \quad (20)$$

La sección eficaz de dispersión de electrones o positrones, colisionando sobre un material puede ser aproximada para el caso de apantallamiento completo mediante:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dk} = \frac{1}{k} 4\alpha r_e^2 \left[\left(\frac{4}{3} - \frac{4}{3}y + y^2 \right) \left[Z^2(L_{rad} - f(Z)) + ZL'_{rad} \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{9}(1-y)(Z^2 + Z) \right], \end{aligned} \quad (21)$$

aquí $y = k/E$ es la fracción entre la energía radiada por el fotón y la energía transferida por el electrón. El término en la segunda línea oscila entre el 1.7% y 2.5% del total. Si se desprecia esta contribución, entonces se puede escribir la sección eficaz de manera más

compacta como:

$$\frac{d\sigma}{dk} = \frac{A}{X_0 N_A k} \left(\frac{4}{3} - \frac{4}{3} y + y^2 \right). \quad (22)$$

El número de fotones emitidos en un rango de energía $[k_{min}, k_{max}]$, ya sea por el paso de electrones o positrones que ha recorrida una distancia $d \ll X_0$ dentro del material viene dado por:

$$N_\gamma = \frac{d}{X_0} \left[\frac{4}{3} \ln \left(\frac{k_{max}}{k_{min}} \right) - \frac{4(k_{max} - k_{min})}{3E} + \frac{k_{max}^2 - k_{min}^2}{2E^2} \right]. \quad (23)$$

2.6.4. Radiación Cherenkov. Cuando una partícula cargada atraviesa un medio dieléctrico a una velocidad mayor que la velocidad (de fase) de la luz en ese medio, genera una radiación electromagnética producto de la polarización y despolarización del medio al paso de la partícula. A esa pérdida por radiación se le conoce como Radiación Cherenkov (Cerenkov, P. A., 1937) y puede ser descrita por la llamada fórmula Frank-Tamm (Asorey, 2012)

$$\left(\frac{dE}{dl} \right)_{Cherenkov} = \left(\frac{Ze}{c} \right)^2 \int_{\beta^2 \epsilon(\omega) > 1} d\omega \left(1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon(\omega)} \right) \omega \quad (24)$$

donde dE/dl representa la energía radiada por la partícula luego de atravesar, con velocidad $\nu = \beta c$, una distancia dl ; $\epsilon(\omega)$ la permitividad dieléctrica relativa del medio respecto al vacío y Z el número atómico. La relación 24 claramente muestra una fuerte dependencia con la frecuencia. Para el agua y en el visible la radiación Cherenkov se produce en longitudes

de onda corta (de allí su tono azulado) mayormente en las bandas ultravioletas.

Luego de que la partícula recorre una longitud l en agua, producirá N fotones Cherenkov, esto es $E_l = \int_0^l dl' (dE/dl')$. Si consideramos que el índice de refracción no depende de la frecuencia, $n(\omega) \approx n$ y que los fotones de longitud de onda λ tienen una energía $E(\lambda) = 2\pi\hbar c/\lambda$, entonces es posible obtener el número de fotones producidos por una partícula cargada con velocidad $\nu = \beta c$ que atraviesa una distancia l (Asorey, 2012):

$$N = 2\pi\alpha_{EM}l \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}\right) \quad (25)$$

donde α_{EM} es la constante de estructura fina, mientras que λ_1 y λ_2 indican los límites de integración en longitud de onda de la ecuación 24. Claramente, dado que la cantidad de movimiento de una partícula de masa en reposo m_0 y velocidad $\nu = \beta c$ es $p = mv = \beta\gamma m_0 c$ tendremos que

$$\beta(p) = \left(1 + \left(\frac{m_0 c}{p}\right)^2\right)^{-1/2} \quad (26)$$

Con lo cual estamos en capacidad de determinar el número de fotones emitidos por una partícula con cantidad de movimiento p al recorrer una distancia l en un medio con un índice de refracción n constante. Es importante señalar que al considerarlo dependiente de la frecuencia, $n = n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)} \approx \sqrt{\epsilon(\omega)}$ se debe realizar la integral de la relación 24.

2.6.5. Radiación de Transición. Cuando una partícula con carga ze cruza la frontera entre el vacío y un material con frecuencia de plasma ω_p , la energía radiada es:

$$I = \alpha z^2 \gamma \hbar \omega_p / 3. \quad (27)$$

Cuando son fotones en lugar de electrones los que inciden sobre el material, alrededor de un pequeño porcentaje de la contribución de la absorción fononuclear alrededor de 10 o 20 MeV contribuirá a la producción de pares. El resto de las interacciones en el rango de energías desde 30 eV hasta 100 GeV resultará en dispersión Compton con electrones atómicos. La probabilidad de un fotón dado con longitud de atenuación λ produzca un par electrón-positrón (sin que primero ocurra dispersión Compton) en un material con espesor t viene dada por $P[1 - \exp(-t/\lambda)]$.

2.6.6. Pérdida de energía por fotones. De igual forma los fotones incidentes pierden energía al chocar con el material. La sección eficaz de creación de pares viene dada por:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{A}{X_0 N_A} \left(1 - \frac{4}{3} x(1-x) \right), \quad (28)$$

con $x = E/k$. Si se integra en dx se obtiene:

$$\sigma = \frac{7}{9} \frac{A}{X_0 N_A}. \quad (29)$$

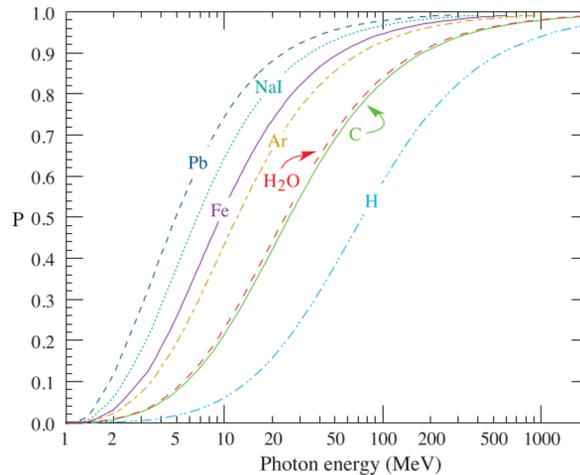
La ecuación de Bethe se puede integrar usando la CSDA (*Continuous Slowing Down Approximation*) para encontrar un rango en el cual la partícula pierde energía sólo a través de ionización y excitación atómica. Para electrones colisionando un blanco de Mo se puede apreciar la figura 14. La distribución de electrones secundarios, también llamados partículas δ , con energía cinética $E_K \gg I$ viene dada por

$$\frac{d^2 N}{dE_K dx} = \frac{1}{2} K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta_{prim}^2} \frac{F(E_K)}{E_K},$$

donde F es dependiente del espín, sus valores pueden ser encontrados en Rossi (1965). Un rayo δ con energía cinética E_K y momentum p es producido a un ángulo θ viene dado por $\cos \theta = \frac{E_K}{p} \frac{p_{max}}{W_{max}}$, en donde p_{max} es el momentum de un electrón con la máxima energía posible transferida W_{max} .

Figura 14

Corresponde a la probabilidad de que la interacción de un fotón resulte en una conversión del par electrón-positrón en función de la energía del fotón medida, excepto por un pequeño porcentaje de la contribución foto-nuclear alrededor de 10 a 20 MeV, esencialmente todas las interacciones en este rango de energía resultan en dispersión Compton. Extraído de (Groom and Klein, 2000).

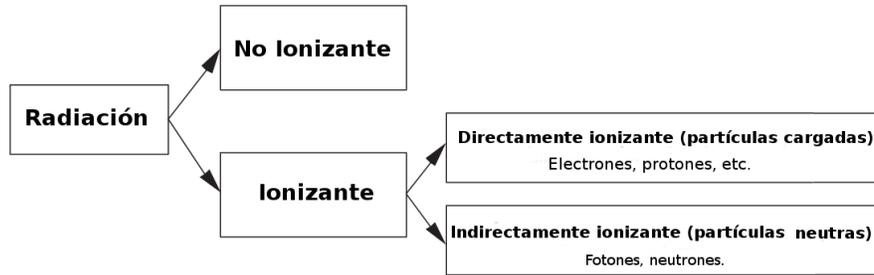


2.7. Principios, cantidades dosimétricas y de radioprotección. La dosimetría de la radiación trata los métodos para una determinación cuantitativa de la energía depositada en un medio determinado mediante radiaciones ionizantes directa o indirectamente. Se han definido varias cantidades y unidades para describir la radiación y las cantidades dosimétricas más comúnmente utilizadas.

2.7.1. Clasificación de la radiación. Como se muestra en la figura 15, la radiación se clasifica en dos categorías principales, ionizante y no ionizante, dependiendo de su capacidad para ionizar la materia. El potencial de ionización de los átomos (es decir, la energía mínima requerida para ionizar un átomo) varía desde unos pocos electronvoltios para los elementos alcalinos hasta 24.5 eV para el helio. La radiación no ionizante (NIR), es un

término colectivo para designar a los campos electromagnéticos, el campo eléctrico estático y el campo magnético con frecuencias entre 0 y 300 GHz. De igual modo, la radiación ionizante (IR), es el nombre dado a las partículas nucleares emitidas y fotones con alta energía.

Figura 15
Clasificación de la radiación.



2.7.2. Fluencia.

2.7.2.1. Fluencia de partículas. Es el número de partículas dN que cruza una esfera de sección eficaz dA :

$$\Phi = \frac{dN}{dA} [m^{-2}] \tag{30}$$

2.7.2.2. Fluencia de energía. Es la energía radiante dR incidente sobre la esfera de sección eficaz dA :

$$\Psi = \frac{dR}{dA} [J/m^2] \tag{31}$$

donde dR es la energía radiante ($R = Q_e$). Las distribuciones de la fluencia de partículas

y de la fluencia de energía vs la energía para un intervalo de energía entre E y $E + dE$ son:

$$\Phi_E = \frac{d\Phi}{dE} = \frac{d^2 N}{dE dA} \quad y \quad \Psi_E = \frac{d\Psi}{dE} = \frac{d^2 R}{dE dA} \quad (32)$$

La relación entre estas distribuciones es:

$$\Psi_E = E\Phi_E. \quad (33)$$

2.7.3. Transferencia de Energía Lineal LET. La energía media de transferencia L_Δ de un material, el cual es el impactado por partículas cargadas es:

$$L_\Delta = \frac{dE_\Delta}{dl}, \quad (34)$$

donde dE_Δ es la energía media perdida por las partículas cargadas debido a interacciones electrónicas atravesando una distancia dl , menos la suma media de las energías cinéticas que exceden el *cut-off* Δ de todos los electrones liberados por las partículas cargadas. La LET que es equivalente al poder de frenado lineal, medida en $\text{keV}/\mu\text{m}$, puede ser expresada como:

$$L_\Delta = S_e - \frac{dE_{ke,\Delta}}{dl}. \quad (35)$$

Si no existe un cut-off entonces se obtiene la LET no restringida $L_\infty = L$.

2.7.4. Exposición de Radiación. Mide el valor absoluto de la carga total media dq de los iones de un signo producidos cuando todos los electrones y positrones liberados o creados por fotones incidentes sobre la masa dm de aire seco, son completamente detenidos en el aire seco. La ionización producida por los electrones emitidos en los procesos de relajación atómica/molecular es incluida en dq ; la ionización debido a los fotones emitidos por procesos radiativos, como fotones de bremsstrahlung y de fluorescencia, no son incluidos en dq . Se define como:

$$X = \frac{dq}{dm} [C/kg] \quad (36)$$

2.7.5. Magnitudes limitadoras. En protección radiológica, hay una buena base física establecida, basada en pruebas científicas sólidas y datos epidemiológicos, como se ve expuesto en los informes de las Naciones Unidas (UNSCEAR¹²) (on the Effects of Atomic Radiation et al., 2008) y la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (Council et al., 2006), en conjunto con las nuevas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP¹³) ha sido publicadas en el informe ICRP-103 (Protection, 2007). La ICRP clasificó los efectos de la radiación que causan reacciones tisulares como efectos deterministas y utilizó el término efectos estocásticos para el cáncer y enfermedades hereda-

¹² United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, por sus siglas en inglés.

¹³ International Commission on Radiological Protection, por sus siglas en inglés

bles inducidas por la radiación.

2.7.5.1. Dosis absorbida. Se define la dosis absorbida D , generada por una determinada partícula, como la cantidad de energía depositada por unidad de masa en un material:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (37)$$

donde se mide en gray. En el sistema internacional, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. El espectro de radiación espacial es una mezcla compleja de protones, neutrones e iones pesados con energías desde unos pocos MeV/nucleón hasta TeV/nucleón. Todos estos componentes pueden tener una eficacia biológica relativa (RBE¹⁴) sustancialmente diferente. Por lo tanto, medir la dosis promediada sobre un tejido, no proporciona información sobre la respuesta biológica.

2.7.5.2. Dosis equivalente. Los estudios biológicos (on the Effects of Atomic Radiation et al., 1982) han mostrado que la probabilidad de efectos estocásticos sobre la salud, debidos a radiaciones ionizantes depende no solo de la dosis absorbida, sino también del tipo y energía de la radiación considerada. Ello es consecuencia de los diferentes procesos mediante los cuales se deposita la energía a nivel microscópico, que varían dependiendo del tipo

¹⁴ La RBE por sus siglas en inglés Relative Biological Effectiveness, se define como la relación entre la dosis de la partícula y la producida por un rayo γ que produce un efecto biológico equivalente.

de radiación. Para tener en cuenta dicho efecto, ICRP introdujo los denominados *factores de ponderación de radiación* o *pesos de radiación*.

La dosis equivalente en un órgano o tejido T , debida a la radiación R , se define como:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (38)$$

donde w_R es el factor de ponderación para la radiación R . En el caso de que existan radiaciones y energías con distintos valores de w_R , tabulados en 3 y los valores dependientes de la energía para los neutrones se proporcionan en la figura 16, la dosis equivalente es la suma:

$$H_T = \sum w_R D_{T,R} \quad (39)$$

donde es medida en sievert. En el sistema internacional de unidades, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

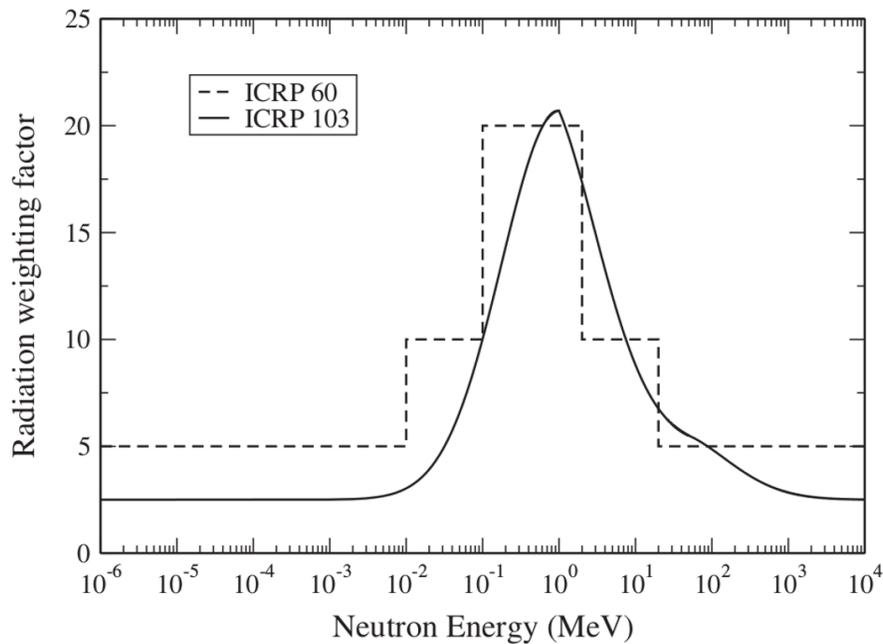
Tabla 3

Pesos de radiación w_R , como se recomienda en el último informe de la ICRP 103(Protection, 2007).

Tipo de radiación	w_R
Rayos X y Gamma	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas beta e iones pesados	20
Neutrones	2-20

Figura 16

Pesos de radiación w_R para neutrones a diferentes energías. La función de paso es de ICRP60 (on Radiological Protection, 1991), y la función continua es la última recomendación de ICRP-103(Protection, 2007). Estraído de (Durante, 2014).



En los Estados Unidos, el Consejo Nacional de Medidas y Protección de Radiaciones (NCRP¹⁵) recomienda modelar la dosis equivalente en tejido para energías superiores a 100 MeV, desde primeros principios como:

$$H_T = \frac{1}{m} \int dm \int dL Q(L) F_T(L) L \quad (40)$$

donde L la transferencia lineal de energía; m la masa del tejido, $F_T(L)$ la fluencia de la partícula a una determinada energía depositada L , a través del tejido T y $Q(L)$ el factor de calidad correspondiente a una energía depositada en un determinado tejido (Takahashi, 1995). La mayor incertidumbre de esta definición se concentra en la construcción del factor de calidad $Q(L)$. Q es función de la LET L viene dada por:

$$Q(L) = \begin{cases} 1, & L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0.32L - 2.2, & 10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300L^{-1/2}, & L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \end{cases} \quad (41)$$

Q ha sido reemplazado por el factor de peso de radiación en la definición de dosis equivalente, sin embargo Q aún se usa en el cálculo de dosis equivalente operacionales, cantidades usadas en monitoreo.

¹⁵ NCRP por National Council for Radiation Protection and Measurements.

2.7.5.3. Dosis efectiva. La probabilidad de aparición de efectos estocásticos depende no solo del tipo de radiación sino también del órgano considerado, es decir, no todos los órganos y tejidos del cuerpo humano son igualmente radiosensibles. Para estimar el riesgo de todos los efectos estocásticos, ya sea que el cuerpo esté expuesto de manera uniforme o no, la ICRP recomienda el uso de una dosis efectiva E , como:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_{T,R} w_T w_R D_{T,R} \quad (42)$$

donde H_T , es la dosis equivalente en tejido y w_T es el factor de ponderación para dicho órgano o tejido, tabulados en 4 con la condición:

$$\sum_T w_T = 1 \quad (43)$$

La cantidad E , es medida en sievert [Sv].

Tabla 4

Factores de ponderación del tejido w_T , como se recomienda en el último informe de la ICRP-103 (Protection, 2007).

Tejido/Organo	w_T
Pecho, médula ósea, pulmón, colon, estómago	0.12
Testículos	0.08
Vejiga, hígado, esofago, tiroide	0.04
Superficie ósea, cerebro, glándulas salivales, piel	0.01
El resto	0.12

2.7.6. Magnitudes operacionales. Las magnitudes limitadoras descritas anteriormente no pueden medirse puesto que para ello habría que situar los detectores en el interior de los órganos del cuerpo humano. Por esta razón, ICRU ha definido un grupo de magnitudes capaces de proporcionar en la práctica una aproximación razonable de las magnitudes limitadoras. Estas magnitudes medibles se definen a partir de la dosis equivalente en un punto del cuerpo humano o de un maniquí y su relación con las magnitudes limitadoras puede calcularse para condiciones de irradiación determinadas (ICRP, 1996), (ICRU, 1998).

Las magnitudes operacionales recomendadas fueron introducidas por ICRU en 1985 para diferentes aplicaciones de dosimetría personal y ambiental. Una descripción detallada de las mismas puede encontrarse en el informe ICRU 51 (ICRU, 1993). Para la vigilancia

de área se han introducido dos magnitudes que enlazan la irradiación externa con la dosis efectiva y con la dosis en la piel y el cristalino. Son el equivalente de dosis ambiental, $H^*(d)$ y el equivalente de dosis direccional $H'(d, \Omega)$. Para la vigilancia individual se recomienda el uso del equivalente de dosis personal $H_p(d)$.

2.7.6.1. Equivalente de dosis ambiental. El equivalente de dosis ambiental, $H^*(d)$, en un punto de un campo de radiación, es el equivalente de dosis que se produciría por el correspondiente campo alineado en el esfera ICRU, el cual es una esfera equivalente a tejido de 30cm de diámetro, de densidad 1 g/cm^3 y de una composición en masa de $\sim 76,2\%$ de O, $\sim 11,1\%$ de C, $\sim 10,1\%$ de H y $\sim 2,6\%$ de N, a una profundidad d sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado.

Su unidad en el SI es el sievert [Sv]. Para radiación fuertemente penetrante, se recomienda una profundidad de 10mm, lo cual se expresa como $H^*(10)$, mientras que para la débilmente penetrante se emplean 0,07mm para la piel y 3mm para el cristalino.

2.7.6.2. Equivalente de dosis personal. El equivalente de dosis personal, $H_p(d)$, es el equivalente de dosis en tejido blando, por debajo de un punto especificado del cuerpo y a una profundidad apropiada d . Su unidad en el SI es el sievert [Sv]. También en este caso, para radiación fuertemente penetrante, se recomienda una profundidad de 10mm, y para la débilmente penetrante se emplean 0,07mm para la piel y 3mm para el cristalino. $H_p(d)$ se puede medir con un detector que se lleva en la superficie del cuerpo cubierto con un espesor apropiado de material equivalente a tejido. Hay que tener en cuenta que esta magnitud se

define sobre el cuerpo humano y no sobre la esfera ICRU, como en el equivalente de dosis ambiental y direccional.

2.8. Radiobiología Básica.

2.8.1. Irradiación de Células. Cuando las células se exponen a la radiación ionizante, los efectos físicos entre la radiación y los átomos o moléculas de las células ocurren primero y el posible daño biológico a las funciones celulares sigue más adelante. Los efectos biológicos de la radiación resultan principalmente del daño al ADN, que es el objetivo más crítico dentro de la célula; sin embargo, también hay otros sitios en la célula que, cuando se dañan, pueden llevar a la muerte celular (sección 2.1 de (Joiner and van der Kogel, 2009)). Cuando la radiación ionizante se absorbe en material biológico, el daño a la célula puede ocurrir de dos maneras: directa o indirecta.

2.8.1.1. Acción directa en el daño celular por radiación. En acción directa, la radiación interactúa directamente con la célula. Los átomos del propio objetivo pueden ser ionizados o excitados a través de las interacciones de Coulomb, lo que lleva a la cadena de eventos físicos y químicos que eventualmente producen el daño biológico. La acción directa es el proceso dominante (LET) en la interacción de partículas de altas energías con el material biológico.

2.8.1.2. Acción indirecta en el daño celular por radiación. En acción indirecta, la radiación interactúa con otras moléculas y átomos (principalmente agua) dentro de la célula para producir radicales libres, que pueden, a través de la difusión en la célula, dañar la célula. En las interacciones de la radiación con el agua, se producen radicales libres

extremadamente reactivos de corta duración, como el H_2O^+ (ion agua) y el $OH\bullet$ (radical hidroxilo). Los radicales libres a su vez pueden causar daños dentro de la célula. Los radicales libres que rompen los enlaces químicos y producen cambios químicos que conducen al daño biológico son moléculas altamente reactivas porque tienen un electrón de valencia desapareado. Aproximadamente dos tercios del daño biológico por radiación de LET baja (radiaciones escasamente ionizantes) como los rayos X o los electrones se deben a la acción indirecta (páginas 9, 10 y 11 de (Hall, 2012)).

La acción indirecta puede ser modificada por sensibilizadores químicos o protectores de radiación. Los pasos involucrados en la producción de daño biológico por la acción indirecta de los rayos X son los siguientes:

- **Paso 1:** La interacción del fotón primario (efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares) produce un electrón de alta energía.
- **Paso 2:** El electrón de alta energía al moverse a través del tejido produce radicales libres en el agua.
- **Paso 3:** Los radicales libres pueden producir cambios en el ADN a partir de la ruptura de los enlaces químicos.
- **Paso 4:** Los cambios en los enlaces químicos producen efectos biológicos.

2.8.1.3. Destino de las células irradiadas. La irradiación de una célula resultará en uno de los siguientes nueve resultados posibles (sección 14.4.3 de (Podgorsak, 2005)):

- **Sin efecto.**
- **Retardo de división:** La célula se retrasa en la mitosis.
- **Apoptosis:** La célula muere antes de que pueda dividirse o después por fragmentación en cuerpos más pequeños, que son tomadas por las células vecinas.
- **Fallo reproductivo:** La célula muere al intentar la primera o subsiguiente mitosis.
- **Inestabilidad genómica:** Hay una forma retrasada de falla reproductiva como resultado de la inestabilidad genómica inducida.
- **Mutación:** La célula sobrevive pero contiene una mutación.
- **Transformación:** La célula sobrevive pero la mutación conduce a un fenotipo transformado y posiblemente a carcinogénesis.
- **Efectos secundarios:** Una célula irradiada puede enviar señales a las células no irradiadas vecinas e inducir daño genético en ellas.
- **Respuestas adaptativas:** La célula irradiada se estimula para que reaccione y se vuelva más resistente a la irradiación posterior.

2.8.2. Tipo de Daño a la Radiación.

2.8.2.1. Escala de tiempo. La escala de tiempo involucrada entre la ruptura de los enlaces químicos y el efecto biológico puede ser de horas a años, dependiendo del tipo de daño. Si el resultado es la muerte celular, puede ocurrir en horas o días, cuando la

célula dañada intenta dividirse (efectos tempranos de la radiación). Esto puede dar como resultado reacciones tisulares tempranas (efectos deterministas) si se destruyen muchas células.

Si el daño es oncogénico (inducción de cáncer), entonces su expresión puede retrasarse por años (efectos tardíos de la radiación). Se ha demostrado que la radiación ionizante causa leucemia y se ha relacionado con el desarrollo de muchos otros tipos de cáncer en tejidos como los huesos, los pulmones, la piel, la tiroides y los senos. Además de la carcinogénesis (inducción de cáncer), los efectos tardíos de la radiación incluyen: reacciones tardías en los tejidos (efectos deterministas), como fibrosis y otras reacciones mediadas por deficiencias vasculares; acortamiento de la vida útil (en gran parte debido a letalidad del cáncer); daño genético, donde los efectos pueden ser expresados en generaciones posteriores; y efectos potenciales para el feto (sección 3.3 de (Joiner and van der Kogel, 2009)).

2.8.2.2. Clasificación del daño por radiación. El daño por radiación a las células de mamíferos se divide en tres categorías (sección 14.5.2 de (Podgorsak, 2005)):

- El daño letal, que es irreversible, irreparable y conduce a la muerte celular.
- Daño subletal, que puede repararse en horas a menos que se agregue un daño subletal adicional que eventualmente lleve a un daño letal.
- Daño potencialmente letal, que se puede manipular mediante reparación cuando se permite que las células permanezcan en un estado de no división.

2.8.2.3. Efectos somáticos y genéticos. Los efectos de la radiación en la población humana se pueden clasificar como somáticos o genéticos (capítulo 11 de (Hall, 2012)):

- **Los efectos somáticos:** Son el daño que las personas expuestas sufren durante su vida, como los cánceres inducidos por radiación (carcinogénesis), la esterilidad, la opacificación de la lente ocular y el acortamiento de la vida.
- **Los efectos genéticos o hereditarios:** Son mutaciones inducidas por radiación en los genes y el ADN de un individuo que pueden contribuir al nacimiento de descendientes defectuosos.

2.8.2.4. Efectos estocásticos y deterministas. Los efectos dañinos de la radiación pueden clasificarse en dos categorías generales: estocástico y determinista. El Consejo Nacional de Protección y Mediciones de Radiación (NCRP) define estos efectos de la siguiente manera:

- Un efecto estocástico es aquel en el que la probabilidad de aparición aumenta con el aumento de la dosis, pero la gravedad en los individuos afectados no depende de la dosis. Por ejemplo, inducción de cáncer, carcinogénesis por radiación y efectos genéticos. No hay una dosis umbral para los efectos que son realmente estocásticos, porque estos efectos surgen en células individuales y se supone que siempre hay una pequeña probabilidad de que el evento ocurra incluso a dosis muy pequeñas.
- Un efecto determinista (reacción tisular) es uno que aumenta su gravedad a medida

que aumenta la dosis, generalmente por encima de una dosis umbral, en los individuos afectados. Por ejemplo, disfunción orgánica, fibrosis, opacificación del cristalino, cambios en la sangre y disminución del recuento de espermatozoides. Estos son eventos causados por el daño a las poblaciones de células, de ahí la presencia de una dosis umbral.

2.9. Herramientas de Simulación.

2.9.1. CARI-7A. El programa informático CARI-7A (Copeland, 2017), desarrollado en el Instituto Médico Aeroespacial Civil de la FAA, calcula la dosis efectiva de radiación cósmica galáctica recibida por un individuo (basado en un fantasma antropomórfico) en un avión. El programa acomodará trayectorias de vuelo tanto de ruta definida como de ruta más corta (geodésicas). Las dosis específicas de partículas, también se pueden calcular para la ruta o en lugares específicos. El límite de altitud ahora es de 300,000 pies. Los cálculos que datan de 1958 son posibles sin proporcionar datos agregados.

El programa tiene en cuenta los cambios de altitud y ubicación geográfica durante el curso de un vuelo, en función de la información proporcionada por el usuario. Las bases de datos se utilizan para dar cuenta de los efectos de los cambios en el campo magnético de la tierra y la actividad solar en los niveles de radiación galáctica en la atmósfera, para los cálculos promedio mensuales. Los vuelos también se pueden especificar para horas específicas de días específicos, aunque esto aumentará los tiempos de cálculo para acomodar los ajustes de las tormentas geomagnéticas y los efectos de Forbush, en caso de haberlos, en los niveles

de GCR durante el vuelo.

2.9.2. ROOT. El sistema ROOT(Brun and Rademakers, 1997) en un marco orientado a objetos para el análisis de datos a gran escala. ROOT escrito en C++, contiene, entre otros, una base de datos OO jerárquica eficiente, un intérprete de C++, análisis estadístico avanzado (histogramas multidimensionales, ajuste, minimización, algoritmos de búsqueda de grupos) y herramientas de visualización. El usuario interactúa con ROOT a través de una interfaz gráfica de usuario, la línea de comandos o secuencias de comandos por lotes. El lenguaje de comandos y secuencias de comandos es C ++ (con el intérprete) y las secuencias de comandos grandes se pueden compilar y vincular dinámicamente. El diseño de la base de datos OO se ha optimizado para el acceso paralelo (lectura y escritura) mediante múltiples procesos

2.9.3. GATE. GATE¹⁶(por Geant4 Application for Tomographic Emission) es un software de código abierto basada en Geant4(Agostinelli et al., 2003), desarrollada por la Organización Europea para la Investigación Nuclear CERN, la cual estima mediante métodos de Monte Carlo, los efectos de radiaciones ionizantes en tejidos. GATE encapsula las bibliotecas Geant4, proporcionando un conjunto de funciones de alto nivel para simular en Geant4 y genera un conjunto de herramientas versátiles, modulares, adaptadas para realizar simulaciones en medicina nuclear. En particular, GATE permite la descripción de los fenómenos dependientes del tiempo, como movimiento de la fuente o del detector así como

¹⁶ <http://www.opengatecollaboration.org>

también la variación en el tiempo de la fuente emisora. Esta característica permite simular curvas de tiempo bajo condiciones de adquisición realistas y para probar algoritmos dinámicos (Jan et al., 2004). GATE ha ganado dos veces el premio del artículo más citado de la revista *Physics in Medicine and Biology* en 2009 (Jan et al., 2004) y 2015 (Jan et al., 2011).

Ha sido utilizado con éxito para desarrollar simulaciones de Tomografía de Emisión, PET¹⁷ y SPECT¹⁸ y experimentos en silico y reales de radioterapia. Actualmente, GATE juega un importante papel en el diseño de nuevos dispositivos en imagenología médica, en la optimización de protocolos de adquisición y en el desarrollo y valoración de algoritmos para reconstrucción de imágenes y técnicas de corrección (Sarrut et al., 2014). Para la presente aplicación es particularmente importante su utilización para cálculos de dosis en experimentos de radioterapia ya que permite implementar la ecuación 40 y utilizar algunas bibliotecas de tejido y factor de calidad que vienen incluidas.

GEANT4 está escrito en C++ y los usuarios deben desarrollar sus proyectos mediante la programación GEANT4/C++ para luego analizar los resultados de las simulaciones en ROOT (Brun and Rademakers, 1997). Por su parte, Gate fue escrito en GEANT4/C++

¹⁷ Tomografía de Emisión de Positrones, PET, por sus sigla en inglés para Positron Emission Tomography.

¹⁸ Tomografía Computada de Emisión de Fotón Simple, i.e. Single Photon Emission Computed Tomography.

explotando las características del módulo *intercoms* de GEANT4 para que sus usuarios programaran en un nuevo tipo de lenguaje de programación macros.

3. Métodos y estimaciones generales sobre los cálculos

3.1. Selección de la ruta. Se seleccionó la ruta Dubái (OMDB) - Los Ángeles (KLAX) ya que su trayecto, en su gran mayoría, es próximo al polo norte, que a su vez es una región con rigideces de corte muy bajas y el blindaje del campo magnético de la tierra es menos efectivo contra la radiación externa. La tabla 5 muestra el tiempo de duración del vuelo y la figura 17 representa graficamente la ruta. Se considera un avión Boeing 787 con velocidad de ascenso $493 \text{ km/h} = 26958 \text{ ft/min}$, la velocidad de descenso se asume igual a la de ascenso, la velocidad de crucero es de $913 \text{ km/h} = 49923 \text{ ft/min}$.

Figura 17

La ruta Dubái (OMDB)- Los Ángeles (KLAX) fue dividida en tramos, asumiendo que la rigidez de corte constante a lo largo de la ruta y por ende el flujo de secundarios. Mapa extraído de <http://www.gcmap.com>.

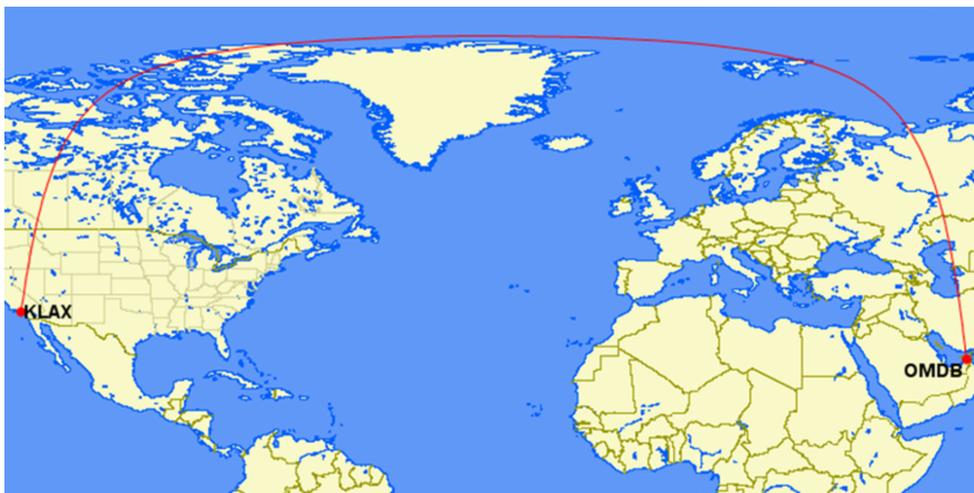


Tabla 5

Duración del vuelo y ciudades de origen y destino con sus respectivos aeropuertos, designados según el código de la ICAO (International Civil Aviation Organization, por sus siglas en inglés)

Ciudad (aeropuerto)		Duración del vuelo
		hh:mm
Origen	Destino	16:00
Dubái (OMDB)	Los Ángeles (KLAX)	

3.2. Modelo antropomórfico del maniquí de prueba. En este trabajo consideramos esferas de organos y tejidos, los cuales componen el maniquí de prueba. Una esfera es una forma muy simple de representar a un organo y tejido dada la complejidad de estos. Aunque algunos organos tienen estructuras casi esféricas como lo son los ojos y la vejiga, otros como la piel no tienen forma definida.

Tabla 6

Propiedades de los tejidos para un hombre adulto.

ID	Tejido	$m_T[g]$	$\rho_T[g/cm^3]$	$r_T[cm]$
0	Corazón	33	1.05	4.22
1	Hígado	1800	1.06	7.40
2	Cerebro	1450	1.04	6.93
3	Ojos	15	1.05	1.51
4	Testículos	35	1.04	2.00
5	Riñones	310	1.05	4.13
6	Pancreas	140	1.04	3.18
6	Estómago	140	1.04	3.18
7	Sangre	5618	1.06	10.8
8	Pulmones	500	0.26	7.71
9	Tiroides	20	1.04	1.66
10	Vejiga	50	1.04	2.26
11	Piel	3300	1.09	8.97
12	Adiposo	18200	0.95	16.6
13	Bazo	150	1.04	3.25
14	Intestino Grueso	370	1.04	4.40
15	Intestino Delgado	650	1.04	5.30
16	Glándulas Suprarrenales	14	1.03	1.48
17	Músculo	29000	1.05	18.8
18	Cartílago	1100	1.10	6.20
19	Linfa	1500	1.03	7.03
20	Hueso	10500	1.90	11.0

La tabla 6 muestra una lista de organos y tejidos, basados en un maniquí de prueba de sexo masculino, mayor de 25 años. Los datos anatómicos y fisiológicos básicos, como la masa y densidad de cada organo fue tomado de la Publicación 89 de la ICRP (Valentin, 2002). El radio de los órganos fue calculado a partir de la fórmula del volumen de una esfera.

3.3. Simulación de las lluvias. En el presente documento, los cálculos de las lluvias atmosféricas iniciadas por rayos cósmicos fueron tomados del trabajo de A. Ferrari, M. Pellicioni y T. Rancati (Ferrari et al., 2001), los cuales utilizaron el código de transporte de Monte Carlo FLUKA¹⁹ (FLUktuierende KAskade)(Battistoni et al., 2007). El código FLUKA fue reconocido por varios autores (Roesler et al., 1998; Schraube et al., 2000) como una herramienta importante para la estimación del entorno de radiación en la atmósfera.

Las figuras 18 y 19 muestran los espectros de energía calculados para los diferentes tipos de partículas. Los espectros de entrada de las partículas primarias que entran en los cálculos corresponden a la actividad solar mínima y a un corte vertical de 0.4 GeV a 10.580 m de altitud.

¹⁹ <http://www.fluka.org/fluka.php>

Figura 18

Tasa de fluencia de neutrones calculada con FLUKA multiplicada por la energía de neutrones en función de la energía para altitudes de 10.580 m. Estraído de (Ferrari et al., 2001).

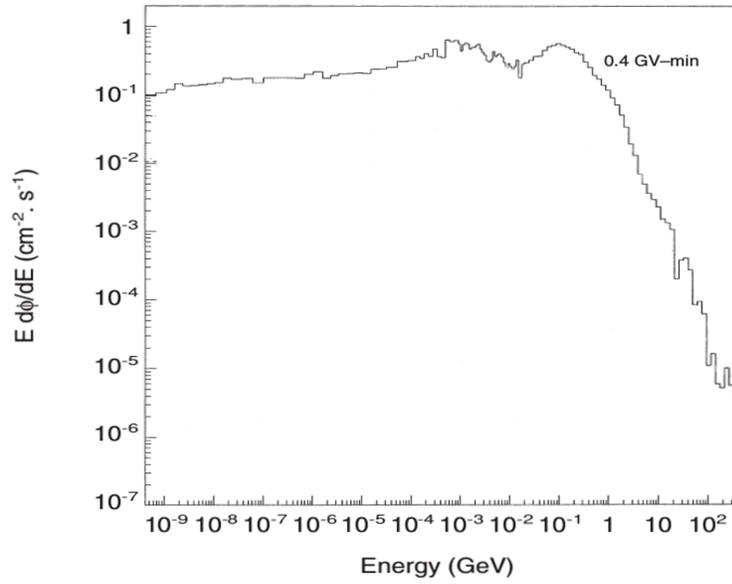
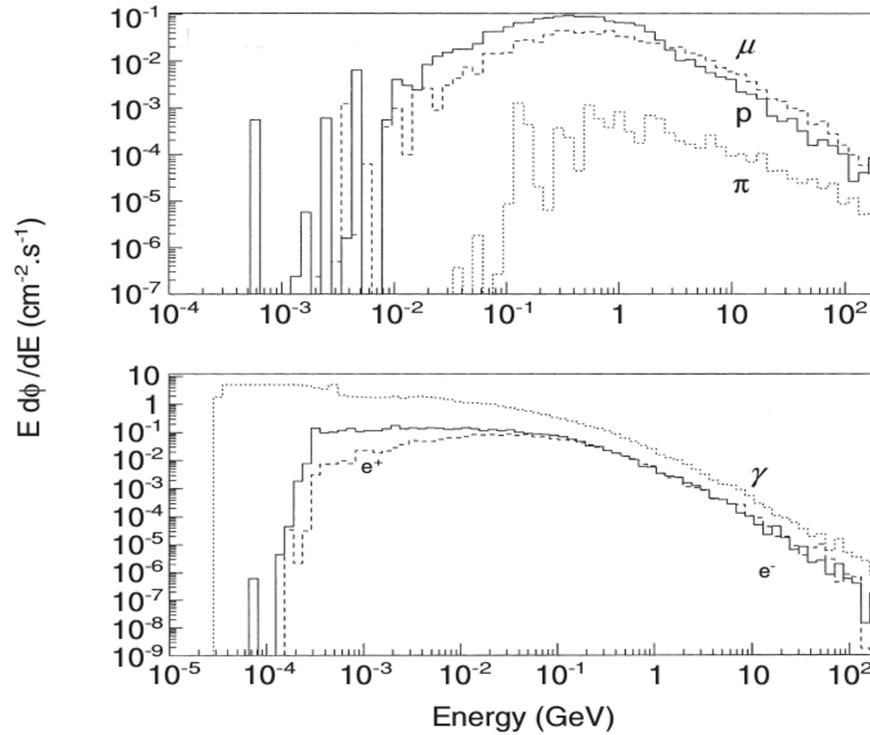


Figura 19

Tasa de fluencia de Partículas calculada con FLUKA multiplicada por la energía de las partículas en función de la energía para altitudes de 10.580 m. Estraído de (Ferrari et al., 2001).



Las formas de los espectros calculados son significativamente diferentes para los distintos tipos de partículas. Debido a la representación de $E\Phi_E$ contra $\log E$, los espectros de neutrones se caracterizan por dos picos a energías de aproximadamente 1 MeV y 100 MeV. Los espectros de protones, electrones y positrones disminuyen a bajas energías, debido a la absorción debida a la pérdida de energía de ionización.

3.4. Conteo de partículas. A partir de los histogramas 18 y 19 y mediante la herramienta computacional ROOT 2.9.2, se hace el cálculo de la integral para cada histograma con el fin de conocer la fluencia de cada partícula. La tabla 7 muestra los cálculos obtenidos.

Para hallar el número de partículas durante el vuelo, es necesario calcular el área transversal de cada órgano. La tabla 8 muestra el área transversal para cada órgano. Con los datos de las tablas 7 y 8, se calcula el número total de partículas que inciden para cada uno de los órganos considerados. En este calculo, se tiene en cuenta el tiempo de vuelo para la ruta Dubái (OMDB) - Los Ángeles (KLAX). Los datos se muestran en la tabla 9.

Tabla 7

Cálculo de la fluencia apartir de los histogramas.

Partícula	Fluencia [Partículas/ $cm^2 s$]
Neutron	524362
Proton	82,09520
Electron	1857,24962
Gamma	420860,15955
Muon	30,11452
Positron	290,60768
Pion	0,020299

Tabla 8

Área de la sección transversal para cada órgano.

Tejido	Área Transversal [cm^2]
Corazón	55,94
Hígado	172,03
Cerebro	150,87
Ojos	7,16
Testículos	12,57
Riñones	53,58
Pancreas	31,78
Estómago	31,78
Sangre	366,43
Pulmones	186,75
Tiroides	8,66
Vejiga	16,05
Piel	252,77
Adiposo	865,69
Bazo	33,18
Intestino Grueso	60,82
Intestino Delgado	88,47
Glándulos Suprarrenales	6,88
Músculo	1110,36
Cartilago	120,76
Linfa	12,52

Tabla 9

Número de partículas totales para cada órgano en la ruta Ruta Dubái (OMDB) - Los Ángeles (KLAX) durante 57600 s.

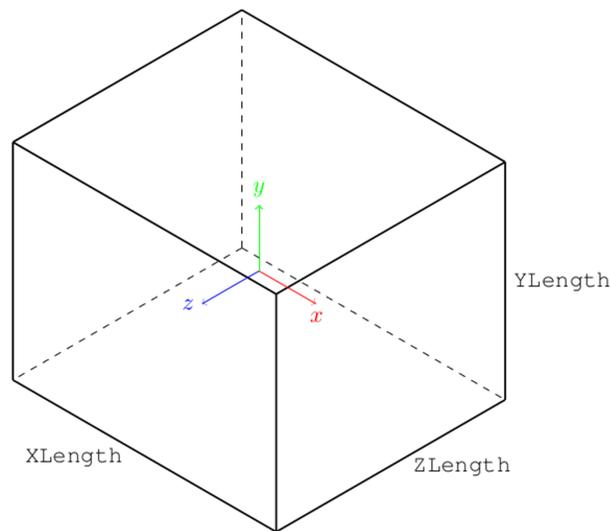
Tejido/ Partícula	Neutrones	Protones	Electrones	Fotones	Muones	Positrones	Piones
Corazón	1689569872128	264522556	5984325715	1356072037933	97033302	936379807	65405
Hígado	5195865303936	813475426	18403352749	4170273019049	298402556	2879610621	201138
Cerebro	4556764508544	713416483	16139707198	3657321922827	261698504	2525413325	176398
Ojos	216255278592	33857374	765959459	173569463561	12419708	119851259	8371
Testículos	379654867584	59439552	1344708156	304716223039	21803872	210409263	14697
Riñones	1618290199296	253362863	5731858631	1298861991284	92939656	896875760	62646
Pancreas	959859323136	150277562	3399747430	770396306141	55125462	531965503	37157
Estómago	959859323136	150277562	3399747430	770396306141	55125462	531965503	37157
Sangre	11067377337216	1732731502	39199793919	8882829404001	635608026	6133672730	428431
Pulmones	5640457161600	883081647	19978062698	4527108564247	323935810	3126008739	218349
Tiroides	261560155392	40950399	926425826	209931781346	15021602	144959763	10125
Vejiga	484762181760	75895370	1716990127	389076800301	27840266	268660992	18766
Piel	7634475805824	1195269333	27040722399	6127535377697	438453841	4231117692	295540
Adiposo	26146652531328	4093574036	92609419527	20985663255600	1501622444	14490787178	1012168
Bazo	1002143874816	156897719	3549516039	804334469407	57553897	555400107	38794
Intestino Gruoso	1836961737984	287598532	6506376296	1474370778461	105498131	1018066139	71111
Intestino Delgado	2672081633664	418346631	9464306329	2144649502966	153459712	1480899562	103439
Glándulos Suprarrenales	207798368256	32533343	736005737	166781830908	11934021	115164338	8044
Músculo	33536482002432	5250541033	118783623545	26916842117257	1926026057	18586318949	1298237
Cartilago	3647344614912	571035822	12918612323	2927408997154	209469818	2021401956	141193
Linfa	378144705024	59203118	1339359277	303504145780	21717142	209572313	14638
Hueso	11481161878656	1797514466	40665386738	9214938573105	659371992	6362997066	444449

3.5. Parámetros de las simulaciones en GATE.

3.5.1. Geometría. Para el espacio virtual de la simulación, los atributos para el volumen sólido son del tipo box, tal como se muestra en la figura 20. El tipo de material dentro de esta caja, en primer lugar, es el vacío.

Figura 20

Volumen sólido tipo box cuyas longitudes son: XLength=64 cm, YLength=64 cm y ZLength=64 cm.



En el caso de nuestro maniquí de prueba, el volumen sólido es del tipo esfera. El origen de esta esfera se ubica en el punto central de nuestro espacio virtual. La tabla 10 nos muestra los atributos considerados para este volumen. Los materiales son especificados en la base de datos de GATE llamada GateMaterials.db.

Tabla 10

Atributos para el volumen sólido tipo esfera.

Esfera	
<i>Rmin</i>	Radio interno de la esfera, 0 para una esfera maciza
<i>Rmax</i>	Radio de cada órgano, mostrado en la tabla 6
<i>PhiStart</i>	Ángulo azimutal de inicio $\phi_i = 0^\circ$
<i>DeltaPhi</i>	Diferencia angular azimutal $\Delta\phi = \phi_f - \phi_i = 360^\circ$
<i>ThetaStart</i>	Ángulo polar de inicio $\theta_i = 0^\circ$
<i>DeltaTheta</i>	Diferencia angular polar $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i = 360^\circ$

3.5.2. Física. Para las listas físicas de referencia el usuario no necesita especificar cada uno de los procesos físicos y sus características. En nuestro caso, utilizamos la lista **QGSP BERT HP**, viene con alta precisión en el modelo de Neutrones y contiene procesos EM estándares:

- **QGS** Quark Gluon String Model. Energía > 20 GeV.
- **BERT** Bertini Cascade Model Bertini and Guthrie (1971). Todos los tipos de blancos nucleares son permitidos. Para energías superiores a 10 GeV el modelo se quiebra.
- **HP** High Precision Neutron Model. Energía < 20 MeV.

3.5.3. Fuente. Al adicionar una fuente de radiación a una simulación en GATE, se debe decidir que tipo de fuente adicionar y usar. Una vez adicionada la fuente, se especifican los atributos, como el tipo de partícula, emisión angular, distribución espacial y ubicación. La distribución de energía, para nuestro caso, se extrae de los histogramas de las figuras 18 y 19 y son utilizados como datos de entrada.

3.6. Cálculos radiación Cherenkov. La radiación Cherenkov se caracteriza por no ser directa y es causada debido al paso de partículas cargadas altamente energéticas en un medio. En nuestro caso, esta radiación es producida por las cascadas de partículas cósmicas que inciden sobre el maniquí de prueba.

Para estimar la dosis de radiación debida a fotones Cherenkov en la rutas aérea Dubái (OMDB)- Los Ángeles (KLAX), se utiliza también la fluencia de partículas a lo largo de la ruta, mostrado en el histograma 19.

Para el cálculo de la cantidad de fotones Cherenkov producidos, utilizamos la ecuación 25 y por medio de ROOT, se hace una sistematización en el cálculo. A partir de este código, se calcula el número de fotones Cherenkov para las tres bandas del ultravioleta (UVC: 100-280nm; UVB: 280-315nm; y UVA: 315-400nm) generados por las partículas cargadas al atravesar una esfera de agua, con un diámetro de 52,32 cm correspondientes a un humano promedio de 60 kg (Watson et al., 1980).

3.7. 3. Pesos Estadísticos de Radiación. De manera análoga a la definición de los pesos estadísticos de radiación para los distintos tipos de radiación w_R por parte de la ICRP-103 (Protection, 2007), nosotros también usamos una radiación de referencia, en nuestro caso elegimos la de los fotones sin restricciones de energía, y la dosis de radiación que depositan sobre una esfera de agua de radio tal que de la masa del humano de referencia, en este caso un hombre adulto, así $w_R = \frac{D_{agua,R}}{D_{agua,\gamma}}$, incluso podemos definir los w_R cambiando el material por ICRU o algún otro que represente mejor el cuerpo completo, así de manera general

$$w_R = \frac{D_{\text{body material},R}}{D_{\text{body material},\gamma}}. \quad (44)$$

Desde la definición de la dosis equivalente usando el poder de frenado lineal, y la fluencia en cada tejido, y teniendo en cuenta que GATE/GEANT4 internamente usa estos parámetros en los cálculos de las dosis de radiación $D_{T,R}$, entonces podemos análogamente definir la dosis equivalente en nuestra teoría como

$$H_T = \frac{m_T}{\sum_T m_T} \sum_R \left\{ \sum_R \left(\frac{D_{T,R}}{\sum_T D_{T,R}} \right) \right\} D_{T,R}$$

igual a

$$\sum_R \left\{ \sum_R \left(\frac{m_T}{m_{\text{body}}} \frac{D_{T,R}}{D_{\text{body},R}} \right) \right\} D_{T,R},$$

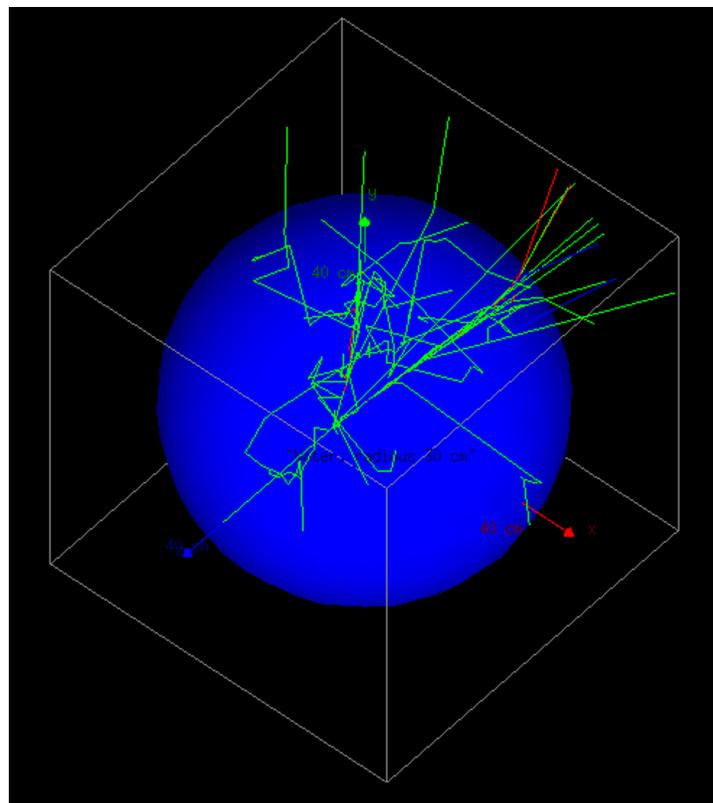
con $m_{body} = \sum_T m_T$, $D_{body,R} = \sum_T D_{T,R}$, por lo tanto

$$w_T = \sum_R \frac{m_T}{m_{body}} \frac{D_{T,R}}{D_{body,R}}. \quad (45)$$

4. Resultados

Para calcular las dosis de radiación, las simulaciones se corren para cada órgano y partícula, es decir, a un órgano le corresponde 7 simulaciones referentes a los tipos de partícula mostrados en la tabla 7. Los datos obtenidos fueron organizados dependiendo del tipo de radiación y el tipo de material considerado. Un ejemplo de estas simulaciones se muestra en la figura 21, en este caso, para una esfera de agua de 30 cm de radio.

Figura 21
Simulación en GATE de una esfera irradiada por partículas.



Los aspectos generales a tener en cuenta para las simulaciones, fueron:

- **Lista de materiales:** GATE tiene internamente listas que corresponde a muchos tipos de materiales, una de estas listas es llamada GateMaterials.db, el cual podemos agregar y modificar materiales a nuestro interés. Este trabajo se basó en la publicación 89 de la ICRP Valentin (2002) para extraer información sobre composición de cada órgano considerado.
- **Modelo del maniquí de prueba:** Uno de los primeros parámetros es la geometría de nuestro maniquí. En consideración, los órganos se representan en formas de esferas, como en 3.5.1 y basados en la tabla 6.
- **Fuente de radiación:** La distribución de energía, para nuestro caso, se extrae de los histogramas de las figuras 18 y 19 y son utilizados como datos de entrada.
- **Número de partículas:** Es necesario calcular el número total de partículas que inciden sobre cada órgano, mostrados en la tabla 9.
- **Tiempo de aplicación:** Se tiene en cuenta el tiempo de vuelo para la ruta Dubái (OMDB) - Los Ángeles (KLAX), el cual es de 57600 s.
- **Poder de computo:** Las simulaciones se corrieron en el servidor THOR, siendo parte la SC3, Super Computación y Cálculo Científico UIS, que tiene las siguientes especificaciones: 1259 GB de Memoria RAM a 2133 MHz, 4 procesadores Intel(R) Xeon(R) CPU E7-8867 v3 @ 2.50GHz de 16 cores con 32 hilos (4 procesadores * 32 hilos = 128 cores) y el total de almacenamiento con 10 TB.

4.1. Dosis de radiación para esferas de órganos. La tabla 11, muestra los cálculos de las dosis de radiación para esferas compuestas de órganos, la cual cada casilla representa la variable $D_{T,R}$, es decir, dosis para cada tipo de tejido y radiación correspondiente. Como resultado, la tabla 13 muestra la suma total de estas dosis para cada órgano y la casilla D_R muestra la suma total de radiación para cada tipo de partícula. La tabla 12 muestra los porcentajes de las dosis de radiación para cada tipo de partícula.

Tabla 11

Dosis de radiación para esferas de órganos, medidas en $[\mu Sv]$.

Tejido/Partícula	Electrones	Fotones	Protones	Positrones	Neutrones	Piones
Adiposo	0,00458341	0,000362540	0,363587	0,669471	0,00310298	0,0349935
Glándula Suprarrenal	8,45736	0,607267	26,0975	21,0940	1,14378	0,0892069
Vejiga	1,95321	0,125604	16,9430	19,3362	0,670826	0,0692876
Sangre	0,0277018	0,00156922	2,40641	3,28521	0,0340474	0,0363871
Huesos	0,00973754	0,000627227	1,24465	3,90686	0,0208322	0,0231521
Cerebro	0,0912926	0,00566012	5,52174	5,24659	0,0726408	0,0415466
Cartilago	0,0866432	0,00570964	5,82671	5,66504	0,419647	0,0417904
Ojo	8,20409	0,486818	25,3116	20,8881	1,58263	0,0879997
Corazón	0,284562	0,0202904	8,99703	12,7611	0,175210	0,0496902
Riñón	0,530787	0,0295034	9,17258	16,8336	0,321974	0,0498275
Intestino Gruoso	0,276168	0,0191750	8,72489	12,1225	0,257640	0,0493736
Hígado	0,0814543	0,00437284	5,07272	5,05386	0,0668503	0,0410084
Pulmones	0,817199	0,0506329	80,8113	13,2092	0,121845	0,3038695
Linfa	0,132630	0,00643715	0,443152	1,28624	0,0277728	0,00344604
Músculo	0,00315306	0,000238683	0,473961	1,39933	0,00591385	0,0300449
Páncreas	2,08275	0,127779	12,0450	18,2650	0,537380	0,0569735
Piel	0,0334058	0,00223084	4,06626	2,78881	0,0338068	0,00374759
Intestino Delgado	0,409326	0,0265116	7,22434	8,69243	0,164225	0,0461277
Bazo	0,703953	0,0430016	11,5522	18,1026	0,275765	0,0558816
Estómago	2,21905	0,117411	12,0516	18,2604	0,559488	0,0563182
Testículos	2,99715	0,197813	19,0567	19,7278	0,766254	0,0739572
Tiroide	7,46530	0,961600	23,0744	20,5044	2,76968	0,0840072
D_R	36,8715	2,84062	286,482	249,099	9,65356	1,32864

Tabla 12

Porcentaje de las dosis de radiación D_R para esferas de órganos.

Partícula	Electrones	Fotones	Protones	Positrones	Neutrones	Piones
$\%D_R$	6,289	0,4845	48,86	42,48	1,646	0,2266

Tabla 13

Dosis total de radiación para esferas de órganos, medidas en $[\mu Sv]$.

Órgano	Suma de las Dosis
Adipose	2,1472
Glándulas Suprarrenales	105,91
Vejiga	76,117
Sangre	11,553
Huesos	10,401
Cerebro	21,862
Cartilago	23,243
Ojos	104,43
Corazón	44,270
Riñón	53,316
Intestino Grueso	42,604
Hígado	20,554
Pulmones	189,76
Linfa	3,6603
Músculo	3,8219
Páncreas	64,019
Piel	13,820
Intestino Delgado	32,690
Bazo	67,199
Estómago	64,192
Testículos	82,444
Tiroide	101,29

Suma Total de las Dosis = 586,27 $[\mu Sv]$

4.2. Dosis de radiación para esferas de agua con los mismos radios para órganos.

La tabla 14, muestra los cálculos de las dosis de radiación para esferas compuestas de agua pero con el mismo radio de las esferas de órganos, la cual cada casilla representa la variable $D_{T,R}$, es decir, dosis para cada tipo de tejido y radiación correspondiente. Como resultado, la tabla 16 muestra la suma total de estas dosis para esfera de agua y la casilla D_R muestra la suma total de radiación para cada tipo de partícula. La tabla 15 muestra los porcentajes de las dosis de radiación para cada tipo de partícula.

Tabla 14

Dosis de radiación para esferas de agua, medidas en $[\mu Sv]$.

Tejido/Partícula	Electrones	Fotones	Protones	Positrones	Neutrones	Piones
Adipose	0,00433547	0,000349644	0,314555	0,645446	0,00298674	0,0342297
Glándulas Suprarrenales	8,26237	0,600529	23,9179	20,8341	1,12161	0,0885155
Vejiga	1,91847	0,124634	15,6512	19,1720	0,661645	0,0690069
Sangre	0,0273059	0,00156206	2,23484	3,26954	0,0338083	0,0364346
Huesos	0,0111371	0,000699306	1,46169	4,35739	0,0236153	0,0256665
Cerebro	0,0893151	0,00559912	5,06553	5,18832	0,0716463	0,0413659
Cartílago	0,0865309	0,00574210	5,52483	5,69598	0,0421269	0,0421881
Ojos	8,1252883	0,486955	23,6492	20,8723	1,56800	0,0882850
Corazón	0,279447	0,0201374	8,30376	12,6588	0,173053	0,0495879
Riñón	0,522145	0,0293220	8,48945	16,7222	0,318463	0,0497785
Intestino Grueso	0,270518	0,0189877	8,02548	11,9984	0,254062	0,0491633
Hígado	0,0800151	0,00434216	4,68117	5,01688	0,0661593	0,0410023
Pulmones	0,804561	0,0503506	74,9297	13,1188	0,119525	0,299143
Linfa	0,129900	0,00636980	0,408031	1,27239	0,0274344	0,00342824
Músculo	0,00309885	0,000236996	0,438306	1,38923	0,00586285	0,0300145
Páncreas	2,03770	0,126440	11,0490	18,0619	0,528925	0,0566777
Piel	0,0329133	0,00221457	3,76839	2,77638	0,0335493	0,00376037
Intestino Delgado	0,400951	0,0262526	6,64518	8,60402	0,1620203	0,0459482
Bazo	0,691384	0,0426669	10,6735	17,9515	0,272311	0,0557137
Estómago	2,17365	0,116264	11,0857	18,0708	0,551215	0,0560371
Testículos	2,93853	0,195997	17,5576	19,5294	0,754667	17,5576
Tiroide	7,33614	0,954795	21,3276	20,3386	2,73094	0,0836751
D_R	36,2306	2,82046	265,203	247,545	9,52364	1,88072

Tabla 15

Porcentaje de las dosis de radiación D_R para esferas de agua.

Partícula	Electrones	Fotones	Protones	Positrones	Neutrones	Piones
$\%D_R$	6,245	0,4861	45,71	42,67	1,641	3,241

Tabla 16

Dosis total de radiación para esferas de agua.

Órgano	Suma de las Dosis
Adipose	1,6845
Glándulas Suprarrenales	76,874
Vejiga	57,499
Sangre	8,9432
Huesos	10,286
Cerebro	15,763
Cartilago	17,177
Ojos	77,318
Corazón	34,366
Riñón	43,221
Intestino Grueso	32,918
Hígado	15,013
Pulmones	102,85
Linfa	3,1508
Músculo	3,2918
Páncreas	50,508
Piel	9,4309
Intestino Delgado	24,696
Bazo	47,966
Estómago	50,731
Testículos	96,375
Tiroide	75,925

Suma Total de las Dosis = 580,12 [μ Sv]

4.3. Cálculo de pesos de radiación y tejido. Para calcular los pesos de radiación w_R , tabulados en 17, es necesario utilizar la ecuación 44, donde, en nuestro caso, las dosis de radiación se depositan en esferas de agua. Estas dosis están tabuladas en la tabla 14 y sobre la suma total de las dosis para cada tipo de radiación, D_R , se hacen los cálculos para los w_R , tomando como referencia la dosis para los fotones D_γ .

Por otro lado, el cálculo de los pesos de tejido, w_T , representados en la tabla 18, utilizamos la ecuación 45, de donde m_T es la masa de cada órgano, m_{body} es la masa total del maniquí de prueba, $D_{R,T}$ es cada casilla de la tabla 11, el cual representa las dosis para cada tipo de tejido y radiación correspondiente y $D_{body,R}$, es la suma total de radiación para cada tipo de partícula.

En recomendación por la ICRP, es necesario tener en cuenta los diferentes procesos mediante los cuales se deposita la energía a nivel microscópico, que varían dependiendo del tipo de radiación. La tabla 19 muestra el cálculo de las dosis equivalentes según la ecuación 38 con ayuda de los datos de la tabla 11, la cual cada casilla es la variable $H_{T,R}$. Del mismo modo, los órganos y tejidos no son igualmente radiosensibles, por ello es crucial incluir dosis efectivas. La tabla 20 muestra los cálculos de las dosis efectivas según la ecuación 42.

Tabla 17
Pesos de radiación w_R

Tipo de radiación	w_R
Fotones	1
Electrones	12
Positrones	87
Protones	94
Piones cargados	6
Neutrones	4

Tabla 18

Factores de ponderación del tejido w_T

Tejido u Órgano	w_T
Adipose	0,2029
Glándulas Suprarrenales	0,0004
Vejiga	0,0009
Sangre	0,2381
Huesos	0,1082
Cerebro	0,0136
Cartílago	0,0104
Ojos	0,0004
Corazón	0,0004
Riñón	0,0038
Intestino Grueso	0,0043
Hígado	0,0166
Pulmones	0,0345
Linfa	0,0013
Músculo	0,2797
Páncreas	0,0021
Piel	0,0076
Intestino Delgado	0,0070
Bazo	0,0020
Estómago	0,0021
Testículos	0,0007
Tiroide	0,0005

Tabla 19

Dosis equivalente para esferas de tejido, medidas en μSv .

Tejido/Dosis Equivalente	$H_{T,e}$	$H_{T,\gamma}$	$H_{T,p}$	H_{T,e^+}	$H_{T,n}$	$H_{T,\pi}$
Adipose	0,055	0,0004	34,18	58,24	0,012	0,210
Glándulas Suprarrenales	101,488	0,6073	2453,17	1835,19	4,575	0,535
Vejiga	23,439	0,1256	1592,65	1682,25	2,683	0,416
Sangre	0,332	0,0016	226,20	285,81	0,136	0,218
Huesos	0,117	0,0006	117,00	339,90	0,083	0,139
Cerebro	1,096	0,0057	519,04	456,45	0,291	0,249
Cartílago	1,040	0,0057	547,71	492,86	0,168	0,251
Ojos	98,449	0,4868	2379,29	1817,27	6,331	0,528
Corazón	3,415	0,0203	845,72	1110,22	0,701	0,298
Riñón	6,369	0,0295	862,22	1464,53	1,288	0,299
Intestino Grueso	3,314	0,0192	820,14	1054,66	1,031	0,296
Hígado	0,977	0,0044	476,84	439,69	0,267	0,246
Pulmones	9,806	0,0506	7596,26	1149,21	0,487	1,823
Linfa	1,592	0,0064	41,66	111,90	0,111	0,021
Músculo	0,038	0,0002	44,55	121,74	0,024	0,180
Páncreas	24,993	0,1278	1132,23	1589,06	2,150	0,342
Piel	0,401	0,0022	382,23	242,63	0,135	0,022
Intestino Delgado	4,912	0,0265	679,09	756,24	0,657	0,277
Bazo	8,447	0,0430	1085,91	1574,93	1,103	0,335
Estómago	26,629	0,1174	1132,86	1588,66	2,238	0,338
Testículos	35,966	0,1978	1791,33	1716,33	3,065	0,444
Tiroide	89,584	0,9616	2169,00	1783,88	11,079	0,504

Tabla 20

Dosis efectiva para esferas de tejido, medidas en mSv.

Tejido	H_T	w_T	E_T
Adipose	0,0927	0,2029	0,0188
Glándulas Suprarrenales	4,3956	0,0004	0,0018
Vejiga	3,3016	0,0009	0,0030
Sangre	0,5127	0,2381	0,1221
Huesos	0,4572	0,1082	0,0495
Cerebro	0,9771	0,0136	0,0133
Cartílago	1,0420	0,0104	0,0108
Ojos	4,3024	0,0004	0,0017
Corazón	1,9604	0,0004	0,0008
Riñón	2,3347	0,0038	0,0089
Intestino Grueso	1,8795	0,0043	0,0081
Hígado	0,9180	0,0166	0,0152
Pulmones	8,7576	0,0345	0,3021
Linfa	0,1553	0,0013	0,0002
Músculo	0,1665	0,2797	0,0466
Páncreas	2,7489	0,0021	0,0058
Piel	0,6254	0,0076	0,0048
Intestino Delgado	1,4412	0,0070	0,0101
Bazo	2,6708	0,0020	0,0053
Estómago	2,7508	0,0021	0,0058
Testículos	3,5473	0,0007	0,0025
Tiroide	4,0550	0,0005	0,0020

Dosis Efectiva $E = 0,6390$ mSv

4.4. Radiación Cherenkov. En este caso, hemos elegido un maniquí de prueba, esférico compuesto de agua, emulando la composición de un hombre adulto, de tal manera que su masa sea $m = 60$ kg, por lo que el fantasma esférico tiene un diámetro $l = 52,32$ cm. En general, el índice de refracción depende de la frecuencia de la partícula cargada incidente, pero en el rango del UV (ultravioleta) y el NUV (ultravioleta cercano) podemos tomar el índice de refracción $n = 1.33$ como una constante.

Teniendo en cuenta las tres bandas de la radiación UV,

- UV-A: $\lambda \in [315, 400]$ nm, con longitud de onda promedio $\langle \lambda \rangle = 357.5$ nm.
- UV-B: $\lambda \in [280, 315]$ nm, con longitud de onda promedio $\langle \lambda \rangle = 297.5$ nm.
- UV-C: $\lambda \in [100, 280]$ nm, con longitud de onda promedio $\langle \lambda \rangle = 190.0$ nm.

y en conjunto con la ecuación 25, se dispone hallar el número de fotones Cherenkov producidos durante el vuelo.

Las figuras 22, 23, 24, 25 y 26, muestran la distribución del número de fotones Cherenkov producidos por electrones, positrones, protones, muones y piones, respectivamente. La tabla 21, muestra el número total de fotones Cherenkov y la energía para cada banda del ultravioleta y para cada tipo de partícula. La tabla 22 muestra la dosis y la suma total para cada partícula y banda del ultravioleta.

Figura 22

Número de fotones Cherenkov producidos por electrones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm

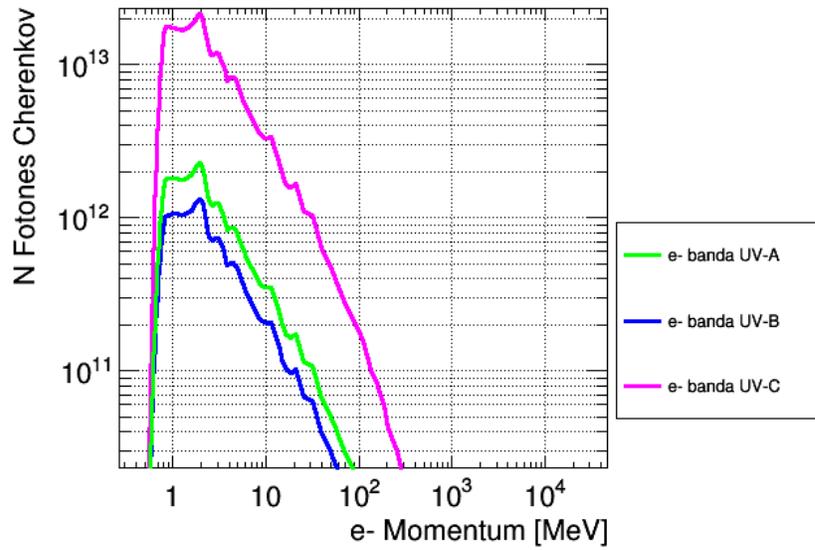


Figura 23

Número de fotones Cherenkov producidos por positrones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm

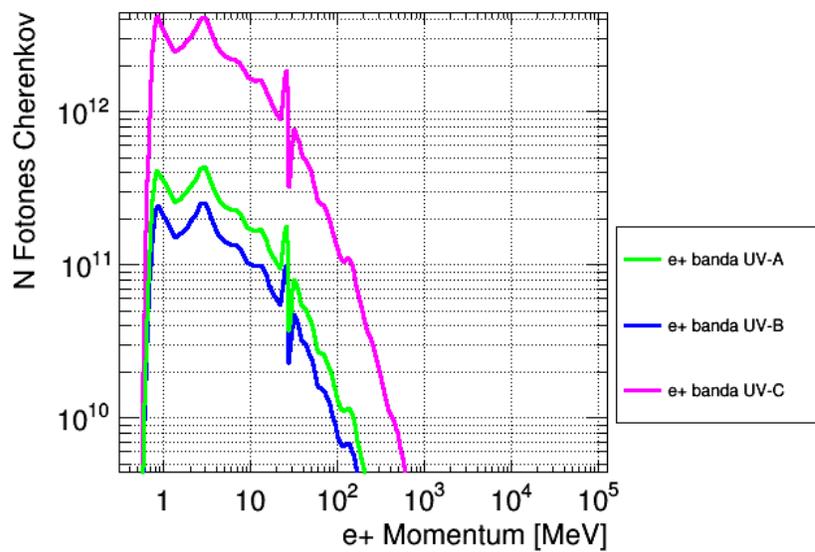


Figura 24

Número de fotones Cherenkov producidos por protones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm

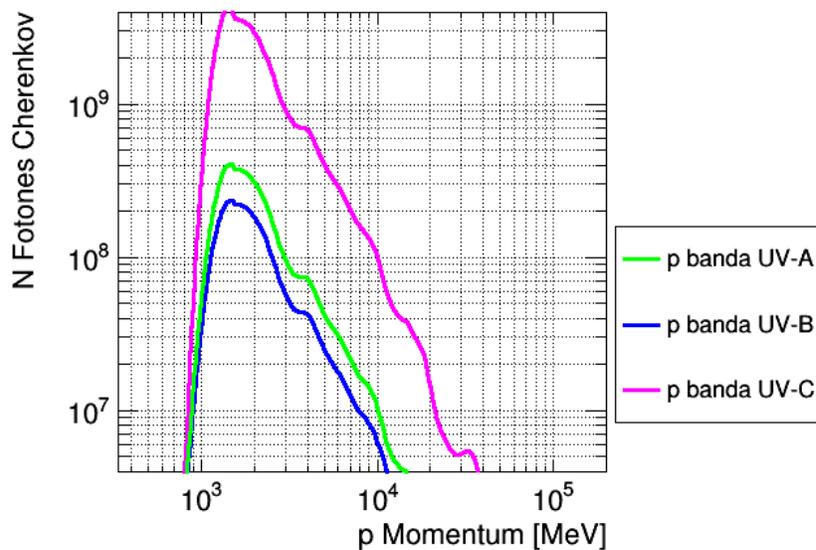


Figura 25

Número de fotones Cherenkov producidos por muones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm

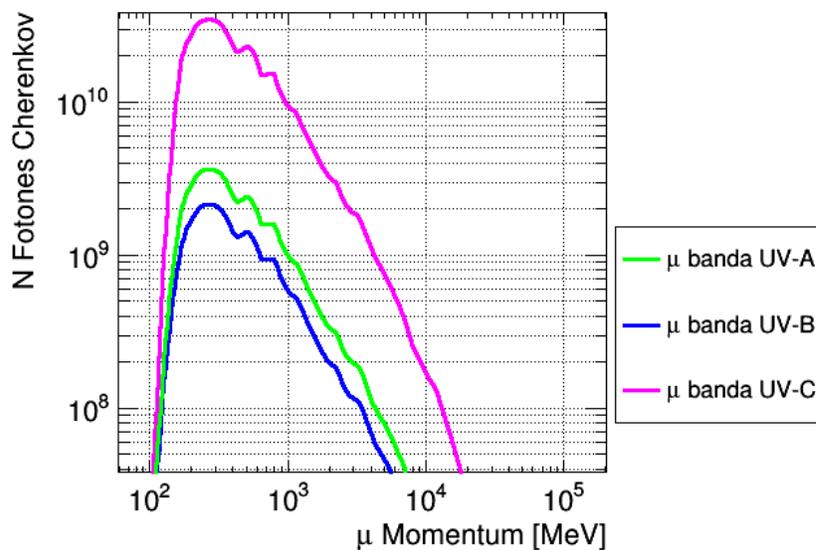


Figura 26

Número de fotones Cherenkov producidos por piones en una esfera de agua con diametro de 52,32 cm

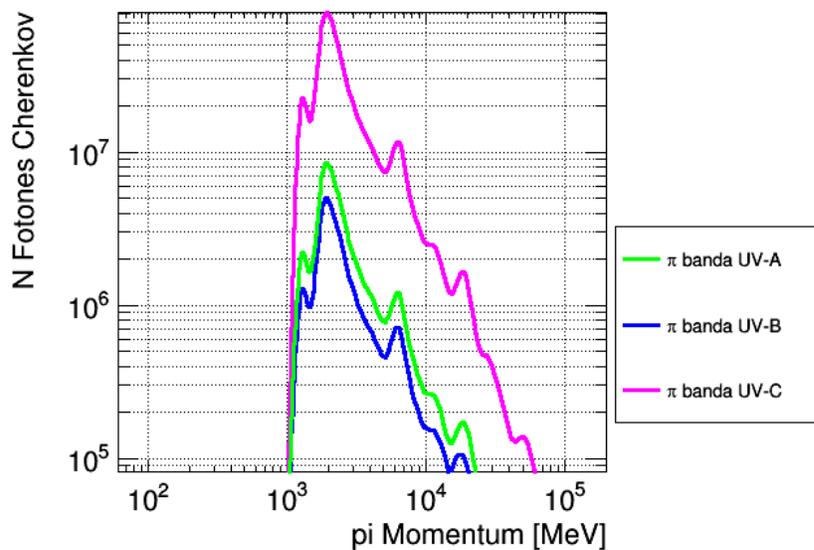


Tabla 21

Número de fotones Cherenkov y energía que llevan estos fotones Cherenkov producidos por e^- , e^+ , p , μ^\pm y π^\pm .

Partícula	Número de fotones Cherenkov 10^9			Energía 10^{-8} [J]		
	UV-A	UV-B	UV-C	UV-A	UV-B	UV-C
	e^-	17804,9	10473,5	169670	744,812	526,488
e^+	5602,88	3295,81	53392,2	234,379	165,676	4202,49
p	1,85762	1,09272	17,7020	0,0777077	0,0549294	1,39332
μ^\pm	26,9406	15,8474	25,6729	1,12698	0,796626	20,2071
π^\pm	0,0259974	0,0152926	0,247740	0,00108752	0,000768737	0,0194996

Tabla 22

Dosis producidas por e^- , e^+ , p , μ^\pm y π^\pm .

Partícula	Dosis [nGy]		
	UV-A	UV-B	UV-C
e^-	124,135	87,7479	2225,78
e^+	39,0631	27,6126	700,416
p	0,0129512	0,00915490	0,232221
μ^\pm	0,187829	0,132770	3,36785
π^\pm	0,000181253	0,000128123	0,00324993
Total	163,399	115,502	2929,799

Suma Total de las Dosis = 3,20871 [μ Gy]

5. Discusión de los Resultados

Con este trabajo se buscó desarrollar un método de determinación de los pesos estadísticos de radiación y tejido, en el cálculo de dosis de radiación efectiva absorbidas por humanos adultos que vuelan en rutas aéreas comerciales. Con el fin de tener un blindaje del campo magnético menos efectivo contra la radiación externa, se seleccionó la ruta Dubái (OMDB) - Los Ángeles (KLAX). El modelo antropomórfico de los tripulantes del avión, nuestro maniquí de prueba, lo representamos como una esfera dada la simplicidad de esta y en consideración para los cálculos, no se tuvo en cuenta la carrocería del avión.

Los cálculos de las lluvias atmosféricas, se tomó los resultados de las simulaciones del trabajo hecho por A. Ferrari, M. Pelliccioni y T. Rancati, dando así tasas de fluencia para varios tipos de partículas como lo muestra las figuras 18 y 19, los cuales se basaron en el código FLUKA y en correspondencia a una actividad solar mínima frente a una rigidez de corte de 0,4 GeV y una altitud de 10,58 km, ideal para nuestra ruta comercial. En cada punto del vuelo, existen variaciones de las componentes del campo magnético terrestre que influye directamente en la rigidez magnética y la trayectoria de las partículas en la atmósfera. Decidimos escoger un único punto que represente cada punto de nuestro trayecto de vuelo, manteniendo constante la rigidez de corte y así simplificar nuestros cálculos. En el conteo de partículas que atraviesa nuestro maniquí de prueba, fue necesario conocer la fluencia de cada partícula, la sección transversal de los órganos y teniendo en cuenta el tiempo de vuelo,

se calculó el número total de los diferentes tipos de partículas consideradas.

En aras de calcular las dosis de radiación, las simulaciones fueron hechas utilizando GATE, tomando como referencia la correspondencia *Radiación - Tejido*, los cuales dependieron de muchos aspectos del entorno de la simulación. Nuestro maniquí de prueba está compuesto por esferas de diferentes tejidos; el radio de cada esfera varía según el tipo de tejido (ver tabla 6), por lo tanto, nuestra geometría *Ambiente - Tejido*, fue una caja al vacío con nuestra esfera de tejido en su centro. La lista de materiales internas de Gate fue modificada para incluir varios tejidos.

Sobre cada esfera de tejido se ejecutó una simulación con parámetros específicos de entrada. Un parámetro general y presente en cada simulación son los histogramas de energía extraídos de las figuras 18 y 19, para cada partícula. Otro parámetro de entrada es el número de partículas de cada tipo (ver tabla 9) como también el tiempo de vuelo (ver tabla 5). En nuestra variable *Fuente - Radiación*, se tuvo en cuenta que las simulaciones no corrieron considerando toda la radiación a la vez, sino que, cada corrida se hizo para cada tipo de partícula en específico, es decir, un tipo de tejido irradiado por un tipo de partícula. En el mismo orden de ideas, se ejecutaron simulaciones de igual forma pero, en este caso, el material de las esferas fue agua, es decir, esferas de agua con los mismos radios para los tejidos.

Los resultados de las simulaciones para el cálculo de las dosis de radiación para esferas compuestas de tejido, se muestra en la tabla 11. Cada casilla representa la dosis para un tipo de tejido y radiación específico, la cual la llamamos $D_{T,R}$ y a su vez, de la casilla D_R , tenemos la suma total de la dosis para cada tipo de partícula. Se resalta así, que la contribución mayoritaria en la dosis es por parte de los protones y los positrones, como se muestra en la tabla 12 con un porcentaje conjunto del 91,13%. A su vez, las tablas 14 y 15 muestran resultados muy parecidos para el cálculo de dosis de radiación y tejido para esferas compuestas de agua.

La tabla 13 muestra el resultado de las dosis absorbida por cada tejido que consideramos y la suma total de la dosis durante nuestro vuelo. Vemos que en nuestro caso la dosis absorbida durante el vuelo para un tripulante adulto, mayor de 25 años y con una masa de 75 Kg, es de 586,27 [μSv] o 0,58627 [mSv] dada por el tiempo de vuelo de 16 horas, resultando así una dosis de 36,642 [mSv] por año para nuestro maniquí de prueba. En contra parte, la dosis absorbida para esferas de agua mostradas en la tabla 16 es de 580,12 [μSv] o 0,58012 [mSv] durante 16 horas y que por año resulta 36,258 [mSv].

Para el desarrollo y el análisis de los pesos de radiación, usamos una radiación de referencia, la cual se eligió la de los fotones sin restricciones de energía y las dosis de radiación absorbida por una esferas de agua, calculadas y mostradas en la tabla 14, específicamente la casilla D_R , la cual es el resultado de la suma de las dosis de radiaciones consideradas. Para el cálculo de los pesos de radiación, se utilizó la ecuación 44, donde D_γ es la dosis de

radiación para los fotones, con resultados de las estimaciones de los pesos de radiación w_R mostrados en la tabla 17. Los w_R calculados en este trabajo difieren con los propuestos por la ICRP (ver tabla 3). En este sentido, los w_R resultan en mayor cantidad en comparación con los de referencia y a su vez, esto se ve reflejado con los resultados de las dosis para el caso de las esferas de órganos.

De acuerdo con la definición del poder de frenado lineal y la fluencia de partículas en cada tejido, definimos en 3.7 la dosis equivalente y los pesos w_T . Entonces, usando la ecuación 45 que define nuestros pesos w_T , se calculó los factores de ponderación de tejido cuyas estimaciones se muestran en la tabla 18. Como era de esperarse, los tejidos que presentan mayor masa en proporción, tienen los factores de ponderación más altos. Comparando nuestros resultados con los factores de ponderación w_T propuestos por la ICRP (ver tabla 4), vemos que son totalmente diferentes dada la naturaleza de nuestra definición al considerar geometría y física, en los cálculos de los factores de ponderación.

Para un análisis más cuantitativo sobre las dosis absorbidas por nuestro maniquí de prueba, calculamos las dosis equivalentes y las dosis efectivas para cada tipo de tejido. De la definición de dosis equivalente, la ecuación 38, las dosis calculadas en la tabla 11 para radiación y tejido $D_{T,R}$ y los resultados de los pesos de radiación mostrados en la tabla 17, se calculó las dosis equivalentes $H_{T,R}$ para cada tipo de tejido y partícula correspondiente, con los resultados mostrados en 19. Ahora bien, de la definición de dosis efectiva dada por la

ecuación 42, la suma total de dosis equivalente para cada tejido H_T de los datos mostrados en la tabla 19 y las estimaciones de los factores de ponderación para tejidos w_T , se calculó las dosis efectivas E_T para cada tejido, cuyos resultados fueron tabulados en la tabla 20.

Un resultado importante en este trabajo fue el cálculo de la dosis efectiva total para nuestro maniquí de prueba, mostrado en la tabla 20, el cual fue de $E = 0,6390$ mSv, para un tiempo de exposición de 16 horas, tiempo de vuelo de nuestra ruta aérea comercial. Dado que los pilotos de las aeronaves comerciales cumplen un mínimo de 1000 horas al año de servicio, entonces tenemos como dosis efectiva total de $E = 39,93$ [mSv] al año. En comparación con la dosis umbral para personas del común, propuesta por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) de 1 [mSv] por año, claramente nuestros resultado superan esta dosis de referencia.

Paralelamente, en este trabajo se estimó la dosis de radiación debida a fotones Cherenkov, causada por el paso de partículas altamente energéticas en nuestro maniquí de prueba, considerando las tres bandas del ultravioleta y tomando como referencia la ruta Dubái (OMDB)- Los Angeles (KLAX). Para el cálculo del número de fotones Cherenkov producido por las partículas cargadas, utilizamos la fluencia de partículas mostradas en los histogramas 19 y apartir de la ecuación 25, mediante ROOT, hicimos una sistematización de los cálculos.

De igual forma consideramos un fantasma esférico, compuesto de agua y con el su-

puesto de ser un hombre adulto, con una masa de 60 Kg, lo cual el diametro de la esfera sería de $l = 52,32$ cm. Para simplificar los cálculos, dado el hecho de que el índice de refracción depende de la frecuencia de la partícula cargada incidente, tomamos como una constante y con índice de refracción igual a $n = 1,33$. Como resultado, las gráficas 22, 23, 24, 25 y 26, muestran la distribución del número de fotones Cherenkov producidos por electrones, positrones, protones, muones y piones, respectivamente, para las tres bandas del ultravioleta (UVC: 100-280nm; UVB: 280-315nm; y UVA: 315-400nm).

De las gráficas para la distribución del número de fotones Cherenkov para cada partícula, se observó que son producidos, en mayor número, fotones en la banda UVC (100-280nm) de ultravioleta, seguido de la banda UVA (315-400nm), con la contribución mayoritaria en la producción de fotones Cherenkov por parte de los electrones y positrones. Así, la tabla 21 muestra el total de fotones Cherenkov y energía que llevan estos, para las tres bandas del Ultra Violeta (UV) producidos por los electrones, positrones, protones, muones y piones (e^- , e^+ , p , μ^\pm y π^\pm).

Para caracterizar posibles efectos estocásticos por parte de la radiación Cherenkov, hicimos el calculo de las dosis absorbidas por nuestro maniquí de prueba para cada tipo de partícula, enfatizando cada banda del los UV. La tabla 22, muestra el calculo de las dosis absorbidas para los electrones, positrones, protones, muones y piones. Como era de esperarse, al tener la mayor distribución y número de fotones Cherenkov, la mayor contribución en las

dosis es por parte de los electrones y positrones, con una suma total de 3,208 [μGy]. Es de resaltar que la banda UVC , practicamente contribuye en la mayor parte la dosis absorbida.

6. Conclusiones

En este trabajo se propuso un nuevo método de determinación de los pesos estadísticos de radiación w_R y tejido w_T , en el cálculo de dosis de radiación efectiva absorbidas por humanos adultos que vuelan en una ruta aérea comercial en condiciones seculares extremas. Además, se logró hacer el cálculo de las dosis absorbidas debida a la radiación Cherenkov producida por el paso de partículas cargadas en nuestro maniquí de prueba.

Se comprobó que en el cálculo de la cantidad de dosis absorbidas para cada tejido, estas dependen no sólo del tipo de radiación incidente, sino también del tamaño y el tejido considerado, resaltando así una contribución mayoritaria en las dosis por parte de los protones y positrones, con un porcentaje del 48,86% y 42,48%, respectivamente, en un rango de energía entre 10^{-5} y 10^2 GeV.

En el cálculo de los pesos de radiación w_R , sacados de la definición propuesta, se determinó que, estadísticamente difieren y en mayor cantidad de los propuestos por la ICRP-103. Del mismo modo, de nuestra definición de los factores de ponderación w_T y los resultados de las estimaciones de estos, son totalmente diferentes dada la nartularieza de la definición y la consideración de una amplia gama de tejidos.

De la ruta Dubái (OMDB) - Los Angeles (KLAX) considerada en este trabajo, se

calculó la dosis efectiva para nuestro maniquí de prueba, cuya estimación es un total de $E = 0,6390$ [mSv] y dado que los pilotos de aviones comerciales cumplen un mínimo de 1000 horas de vuelo, el resultado de la dosis anual es del $E = 39,93$ [mSv]. Comparando este resultado con los valores de referencia propuestos por la ICRP-103, con una dosis efectiva de 1 [mSv] para personas del común y 20 [mSv] ocupacional por año, nuestro cálculo de dosis equivalente es prácticamente el doble que el límite umbral ocupacional durante un año, dadas nuestras condiciones seculares de vuelo extremas, con una rigidez de corte muy pequeña, muy próxima a los polos y en consideración de una actividad mínima solar. Un hecho importante es que para dosis efectivas que superan el umbral de referencia, la probabilidad de aparición de efectos estocásticos sobre la salud aumenta. Así, se comprueba lo importante de incluir las exposiciones a los rayos cósmicos a altitudes aeronáuticas como parte de la exposición ocupacional en un sistema de protección radiológica. Para este resultado no se consideró el fuselaje del avión.

En el análisis sobre los efectos colaterales producidos por la radiación Cherenkov, se observó una mayor producción de fotones Cherenkov en la banda UVC (100-280nm) del ultravioleta y prácticamente contribuye en la mayor parte la dosis absorbida con 2,929 [μ Gy]. Los electrones y positrones, generan la mayor producción de fotones Cherenkov y por ende, una mayor dosis. Los resultados de estas dosis no superan los límites ocupacionales.

Para futuros trabajos de investigación a partir de esta tesis, se puede considerar:

- Necesidad de incluir otros tipos de partículas.
- Hacer curvas de Bragg a esta altura para todo tipo de partículas analizadas.
- El siguiente trabajo debe incorporar el blindaje del avión.
- Mejorar el modelo del maniquí de prueba.
- Abarcar una amplia variedad de maniqués, como: Mujeres, niños, animales y plantas.
- Analizar dosis para viajes (Luna, Marte, etc.).

Afines con este trabajo, se participó en los siguientes eventos y colaboraciones:

- Como ponente con el póster *Cálculo de Dosis de Radiación en una Esfera de Agua a 11 Km s.n.m.* en el V Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica, en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, Octubre del 2017.
- Como ponente con el póster “Statistical weights of radiation and human tissue at 11 km a.m.s.l” in the 2nd Colombian Meeting on High Energy Physics held in Bogotá, Colombia, Diciembre del 2017.
- Como coautor en el trabajo: Quiñonez, F., Núñez, L. A., Casallas, E. A., Basto-Gonzalez, V. S., González-Arango, J. L., Ospina-Henao, P. A., ... y Pérez-Arias, C. Y. (2018). Radiation Dose Charts for Long Geodetic and Polar Flights with CARI-7A. arXiv preprint arXiv:1812.02073.

- Como coautor en el trabajo: Asorey, H., Núñez, L. A., Arias, C. Y., Pinilla, S., Quino-
nez, F., y Suárez-Durán, M. (2017). Astroparticle techniques: Simulating cosmic rays
induced background radiation on aircrafts. arXiv preprint arXiv:1704.03419.

Referencias Bibliográficas

- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. a., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., et al. (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3):250–303.
- Asorey, H. (2012). *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación*. Tesis, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Auger, P., Maze, R., Ehrenfest, P., and Freon, A. (1939). Les grandes gerbes de rayons cosmiques. *Journal de Physique et le Radium*, 10(1):39–48.
- Baade, W. and Zwicky, F. (1934). On super-novae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 20(5):254–259.
- Barkas, W. H., Birnbaum, W., and Smith, F. M. (1956). Mass-ratio method applied to the measurement of l-meson masses and the energy balance in pion decay. *Physical Review*, 101(2):778.
- Battistoni, G., Cerutti, F., Fasso, A., Ferrari, A., Muraro, S., Ranft, J., Roesler, S., and Sala, P. (2007). The fluka code: Description and benchmarking. In *AIP Conference proceedings*, volume 896, pages 31–49. AIP.

- Beir, V. et al. (1990). Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. *Washington, DC: National Academy of Sciences.*
- Bertini, H. W. and Guthrie, M. P. (1971). News item results from medium-energy intranuclear-cascade calculation. *Nuclear Physics A*, 169(3):670–672.
- Bethe, H. (1930). Zur theorie des durchgangs schneller korpuskularstrahlen durch materie. *Annalen der Physik*, 397(3):325–400.
- Bichsel, H. (2006). H. bichsel, nucl. instrum. methods a 562, 154 (2006). *Nucl. Instrum. Methods A*, 562:154.
- Brun, R. and Rademakers, F. (1997). Root—an object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 389(1-2):81–86.
- Cerenkov, P. A. (1937). Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light. *Phys. Rev.*, 52:378–379.
- Clay, J. (1927). Penetrating radiation. In *Proceedings of the Royal Academy of Sciences Amsterdam*, volume 30, pages 1115–1127.
- Copeland, K. (2013). Occupational exposure to ionizing radiation for crews of suborbital spacecraft: Questions and answers. Technical report, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION OKLAHOMA CITY OK CIVIL AEROSPACE MEDICAL INST.

- Copeland, K. (2017). CARI-7A: Development and Validation. *Radiation Protection Dosimetry*, 10:1–13.
- Council, N. R. et al. (2006). *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII phase 2*, volume 7. National Academies Press.
- Cucinotta, F., Manuel, F., Jones, J., Iszard, G., Murrey, J., Djojonegro, B., and Wear, M. (2001). Space radiation and cataracts in astronauts. *Radiation research*, 156(5):460–466.
- De Angelis, A. (2011). *L'enigma dei raggi cosmici: le più grandi energie dell'universo*. Springer Science & Business Media.
- Durante, M. (2014). New challenges in high-energy particle radiobiology. *The British journal of radiology*, 87(1035):20130626.
- Eisenberg, R. L. (1992). *Radiology: an illustrated history*. Mosby Incorporated.
- Fermi, E. (1949). On the origin of the cosmic radiation. *Physical Review*, 75(8):1169.
- Ferrari, A., Pelliccioni, M., and Rancati, T. (2001). Calculation of the radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure. *Radiation protection dosimetry*, 93(2):101–114.
- Gaisser, T. et al. (1990). *Cosmic rays and particle physics*, cambridge, uk: Univ.
- Ginzburg, V. and Syrovatskii, S. (1964). The secondary electron component of cosmic rays and the spectrum of general galactic radio emission. *Soviet Astronomy*, 8:342.

- Grajewski, B., Whelan, E. A., Lawson, C. C., Hein, M. J., Waters, M. A., Anderson, J. L., MacDonald, L. A., Mertens, C. J., Tseng, C.-Y., Cassinelli, R. T., et al. (2015). Miscarriage among flight attendants. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 26(2):192.
- Greisen, K. (1966). End to the cosmic-ray spectrum? *Physical Review Letters*, 16(17):748.
- Grieder, P. K. (2001). *Cosmic rays at Earth*. Gulf Professional Publishing.
- Groom, D. E. and Klein, S. (2000). Passage of particles through matter. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, 15(1-4):163–173.
- Guerrero, L. H. U. (1995). Röntgen y el descubrimiento de los rayos x. *Revista de la Facultad de Medicina*, 43(3):150–152.
- Hall, E. (2012). Hall ej, giaccia aj, eds, radiobiology for radiologists.
- Hall, E. J. and Giaccia, A. J. (2006). *Radiobiology for the Radiologist*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Hanlon, W. (2009). Updated cosmic ray spectrum. URL <http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
- Hess, V. F. (1912). Über beobachtungen der durchdringenden strahlung bei sieben freiballonfahrten. *Phys. Zeits.*, 13:1084–1091.
- Hoerandel, J. R. (2003). On the knee in the energy spectrum of cosmic rays. *Astroparticle Physics*, 19(2):193–220.

ICRP (1996). *ICRP Publication 70: Basic Anatomical & Physiological Data for Use in Radiological Protection: The Skeleton*, volume 70. Elsevier Health Sciences.

ICRU, F. Q. (1998). Units for ionizing radiation. *ICRU Report*, 60.

ICRU, Q. (1993). Units in radiation protection dosimetry. *ICRU Report*, 51.

Jan, S., Benoit, D., Becheva, E., Carlier, T., Cassol, F., Descourt, P., Frisson, T., Grevillot, L., Guigues, L., Maigne, L., et al. (2011). Gate v6: a major enhancement of the gate simulation platform enabling modelling of ct and radiotherapy. *Physics in medicine and biology*, 56(4):881.

Jan, S., Santin, G., Strul, D., Staelens, S., Assie, K., Autret, D., Avner, S., Barbier, R., Bardies, M., Bloomfield, P., et al. (2004). Gate: a simulation toolkit for pet and spect. *Physics in medicine and biology*, 49(19):4543.

Joiner, M. C. and van der Kogel, A. (2009). *Basic Clinical Radiobiology Fourth Edition*. CRC Press.

Kolhörster, W. (1913). Messungen der durchdringenden strahlung im freiballon in größeren höhen. *Physikalische Zeitschrift*, 14:1153–1156.

Lattes, C. M. G., Muirhead, H., Occhialini, G. P., and Powell, C. F. (1947). Processes involving charged mesons. *Nature*, 159(4047):694–697.

Lawrence, E. O. and Livingston, M. S. (1932). The production of high speed light ions without the use of high voltages. *Physical Review*, 40(1):19.

López, M. V. (2012). *Ingeniería de la energía eólica*, volume 5. Marcombo.

Louis, B., Sandberg, V., Garvey, G., White, H., Mills, G., and Tayloe, R. (1997). The evidence for oscillations. *Los Alamos Sci*, 25:16.

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.

McLennan, S. J. C. and Burton, E. F. (1903). *Some experiments on the electrical conductivity of atmospheric air*. University Library; published by the Librarian.

on Radiological Protection, I. C. (1991). *ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Number 60. Elsevier Health Sciences.

on the Effects of Atomic Radiation, U. N. S. C. et al. (1982). Ionizing radiation: sources and biological effects. 1982 report to the general assembly, with annexes.

on the Effects of Atomic Radiation, U. N. S. C. et al. (2008). Effects of ionizing radiation: United nations scientific committee on the effects of atomic radiation—unscear 2006 report, with scientific annexes a and b. *United Nations Office at Vienna: United Nations*, 1.

- Pacini, D. (1912). La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque. *Il Nuovo Cimento (1911-1923)*, 3(1):93–100.
- Podgorsak, E. (2005). Technical editor. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Vienna.
- Protection, R. (2007). Icrp publication 103. *Ann. ICRP*, 37(2.4):2.
- Rochester, G. and Butler, C. C. (1947). Evidence for the existence of new unstable elementary particles. *Nature*, 160(4077):855.
- Roesler, S., Heinrich, W., and Schraube, H. (1998). Calculation of radiation fields in the atmosphere and comparison to experimental data. *Radiation research*, 149(1):87–97.
- Rossi, B. (1930). On the magnetic deflection of cosmic rays. *Physical Review*, 36(3):606.
- Rossi, B. B. (1965). *High-energy particles*. Prentice-Hall.
- Rutherford, E. and Cooke, H. L. (1903). A penetrating radiation from the earth's surface. *Physical Review*, 16:183.
- Sarrut, D., Bardiès, M., Bousson, N., Freud, N., Jan, S., Létang, J.-M., Loudos, G., Maigne, L., Marcatili, S., Mauxion, T., et al. (2014). A review of the use and potential of the gate monte carlo simulation code for radiation therapy and dosimetry applications. *Medical physics*, 41(6).

- Schauer, D. A. and Linton, O. W. (2009). National council on radiation protection and measurements report shows substantial medical exposure increase.
- Schraube, H., Heinrich, W., Leuthold, G., Mares, V., and Roesler, S. (2000). Aviation route dose calculation and its numerical basis. *Aviation*, 4(4):1a-45.
- Stannard, J. N. and Baalman Jr, R. (1988). Radioactivity and health: A history. Technical report, Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA).
- Takahashi, F. (1995). Icrp report 51. Technical report.
- Uehling, E. A. (1954). Penetration of heavy charged particles in matter. *Annual review of nuclear science*, 4(1):315-350.
- Valentin, J. (2002). Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: Icrp publication 89. *Annals of the ICRP*, 32(3-4):1-277.
- Watson, P. E., Watson, I. D., and Batt, R. D. (1980). Total body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements. *The American journal of clinical nutrition*, 33(1):27-39.
- Wiebel-Sooth, B., Biermann, P. L., and Meyer, H. (1997). Cosmic rays vii. individual element spectra: prediction and data. *arXiv preprint astro-ph/9709253*.
- Wilson, C. T. R. (1901). On the ionisation of atmospheric air. *Proceedings of the Royal Society of London*, 68(442-450):151-161.

Wilson, C. T. R. (1912). On an expansion apparatus for making visible the tracks of ionising particles in gases and some results obtained by its use. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 87(595):277–292.

Wilson, J., Jones, I., Maiden, D., and Goldhagen, P. (2003). Atmospheric ionizing radiation (air): Analysis, results, and lessons learned from the june 1997 er-2 campaign.

Wilson, J. W., Mertens, C. J., Goldhagen, P., Friedberg, W., DeAngelis, G., Clem, J., Copeland, K., and Bidasaria, H. (2005). Atmospheric ionizing radiation and human exposure.

Wulf, T. (1910). About the radiation of high penetration capacity contained in the atmosphere. *Phys. Zeit*, page 5.

Zatsepin, G. T. and Kuzmin, V. A. (1966). Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP lett.*, 4:114–116.