

# Estimación de riesgo radiobiológico en la tripulación de aeronaves comerciales

José Antonio López Rodríguez

29 de marzo de 2025

Trabajo presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela como requisito para optar a la categoría de Profesor Agregado

Este material está disponible en el siguiente repositorio:

<https://gitlab.com/jalop/estimacionfactoresriesgoradioaeronaves/-/releases/2.0>



Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento del proyecto: “Detección terrestre de rayos cósmicos con aplicación a la astrofísica de partículas y el estudio de fenómenos heliosféricos”, CDCH-UCV: PG-03-8808-2013/1

Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) “Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional”.



DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15106683>

## RESUMEN

Se presentan aplicaciones de herramientas convencionales en la simulación de procesos de Altas Energías para estimar la dosis en vuelos comerciales. Proponemos una metodología de código abierto y reproducible que permite estimar la dosis promedio depositada y el riesgo radiobiológico de la exposición prolongada a altitudes elevadas a partir de herramientas computacionales estándar.

**Palabras clave:** Radiobiología, Altas Energías, Rayos Cósmicos, GEANT4, Vuelos comerciales



# Índice general

<b>Lista de figuras</b>	<b>9</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>13</b>
<b>2. Efectos de la radiación sobre la materia viva</b>	<b>17</b>
2.1. Organización de tejidos . . . . .	17
2.1.1. El ciclo celular . . . . .	18
2.1.2. Distribución de células en el ciclo . . . . .	18
2.1.3. Algunas definiciones . . . . .	21
2.1.4. Índices y duración de las fases . . . . .	22

2.2.	Crecimiento en tejidos	23
2.2.1.	Compartimentos jerárquicos	24
2.2.2.	Compartimentos flexibles (no jerárquicos)	25
2.3.	Crecimiento tumoral	25
2.4.	Radiobiología	28
2.4.1.	Fase física	28
2.4.2.	Fase química	36
2.4.3.	Radiólisis del agua y radicales	36
2.4.4.	Canales de reacción de radicales	36
2.4.5.	Fase biológica	37
2.4.6.	Daño celular	39
2.4.7.	Efectos de la radiación	40
2.4.8.	Efectos sobre el organismo	42
<b>3.</b>	<b>Rayos Cósmicos</b>	<b>45</b>
3.1.	Composición	46
3.2.	Origen	48
3.3.	Espectro	49
3.4.	Propagación de Rayos Cósmicos en la Atmósfera	51
3.4.1.	Descripción de la Progresión de la Cascada	52
3.4.2.	Características del Espectro de Secundarios	53

<b>4. Estimación de la dosis en tripulación y pasajeros de aeronaves comerciales</b>	<b>57</b>
4.1. Radiación en Aeronaves en Simulación . . . . .	59
4.2. Un Modelo Portable . . . . .	61
4.2.1. 5 características generales de un EFR . . . . .	62
4.3. Hacia un EFR completo: gRAMA-kit . . . . .	64
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>67</b>
5.1. Proceso . . . . .	67
5.2. gRAMA-kit en 2 piezas iniciales y 3 pasos de procesamiento . . . . .	70
5.2.1. Las 2 piezas iniciales . . . . .	70
5.2.2. Los 3 pasos de procesamiento . . . . .	71
<b>6. Conclusiones</b>	<b>81</b>



# Índice de figuras

2.1. Cromosomas antes y después de la duplicación . . . . .	19
2.2. Cambio de edades en una población uniformemente distribuida . . . . .	20
2.3. Distribución del porcentaje de mitosis etiquetadas en relación con la duración de las fases del ciclo celular . . . . .	21
2.4. Índices mitótico y etiquetado en distribución uniforme . . . . .	23
2.5. Cambio en $\lambda_S$ según progresa el ciclo celular . . . . .	24
2.6. Compartimientos celulares en el crecimiento tumoral . . . . .	25
2.7. Modelo de Gompertz . . . . .	27
2.8. Densidad de flujo diferencial . . . . .	32
2.9. Factor de peso $w_r$ para neutrones . . . . .	35
2.10. Duración de las fases del efecto de la radiación . . . . .	38
3.1. Desviación de una partícula cargada en un campo magnético . . . . .	48
3.2. Espectro de rayos cósmicos: flujo de partículas por energía . . . . .	50

3.3. Composición de secundarios en un punto geográfico particular . . . . .	55
5.1. Dosis ambiental equivalente . . . . .	69
5.2. Secuencia de pasos en gRAMA-kit . . . . .	70
5.3. Representación de los secundarios sobre un plano de referencia . . . . .	72
5.4. Relación entre el flujo planar y volumétrico . . . . .	73
5.5. Subconjunto de secundarios que arriban a la aeronave . . . . .	74
5.6. Representación de simulación dosis total . . . . .	76
5.7. Representación típica de cortes de energía depositada en un phantom paralelos al eje del haz . . . . .	77
5.8. Representación típica de cortes de energía depositada en un phantom perpendiculares al eje del haz . . . . .	77
5.9. Cortes de un phantom antropomórfico femenino . . . . .	80

# Índice de tablas

2.1. Factor de peso $w_R$ para fotones y partículas cargadas . . . . .	35
2.2. Comparación entre los efectos determinísticos y estocásticos de la radiación . . . . .	44
3.1. Fracción de partículas componentes de radiación cósmica en la parte alta de la atmósfera respecto al total	47
3.2. Índice espectral de rayos cósmicos para varias energías . . . . .	50
5.1. Composición esfera ICRU . . . . .	68
5.2. Dosis equivalente para espectros de ejemplo con alta y baja tasa de dosis . . . . .	78



# Capítulo 1

## Introducción

El estudio de los efectos de la radiación sobre la tripulación de vuelos comerciales es un tema de interés creciente desde varias disciplinas y gremios relacionados.

El objetivo general de este trabajo es mostrar los avances en el desarrollo de una línea de trabajo que estudie aplicaciones de interés práctico del estudio de Rayos cósmicos. El objetivo específico es producir herramientas útiles para el estudio de dosis equivalente sobre phantoms de agua en ambientes de gran altitud. Estas herramientas han sido empaquetadas en forma de un *framework* que hemos llamado gRAMA-kit [1]

Los Rayos Cósmicos están compuestos por partículas cargadas que llegan constantemente a la atmósfera terrestre en un rango amplio de energías [2, 3, 4]. Si bien las características de estas partículas primarias son bastante conocidas, la interacción de ellas con la atmósfera produce escenarios de gran variabilidad. Por ejemplo, la cantidad de partículas secundarias con poder ionizante depende de la altitud, latitud, actividad solar, etc. Es notable hecho de que la cantidad de partículas con poder ionizante sea bastante alta cerca de la altitud de vuelo de aeronaves comerciales. Es también motivo de interés.

Existe amplio conocimiento de los efectos de la radiación ionizante sobre la materia viva. La exposición prolongada a radiación en bajas tasas de dosis es causante de efectos nocivos para la salud [5, 6]. Algunos de ellos se manifiestan como deterioro progresivo de la función de órganos. Otros efectos contemplan la aparición de cáncer.

La dosis equivalente es una cantidad que mide la energía depositada por unidad de masa, ponderada según el tipo de partícula ionizante. Es una medida estándar para cuantificar el riesgo sobre personas expuestas a la radiación ionizante. Por lo tanto, es vital observar la dosis total y equivalente en ambientes de trabajo del personal expuesto a la radiación, denominado Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE). Hoy en día se acepta que la tripulación de vuelos comerciales está dentro de este grupo de personas. Ver por ejemplo [7] y también [8, 9, 10, 11, 12, 13].

La exposición a la radiación ionizante se mide con dosímetros personales. Sin embargo, la variabilidad de los escenarios de radiación en la atmósfera hace conveniente el estudio complementario de estos ambientes. Otras medidas, estudios analíticos y numéricos son necesarios.

Se han desarrollado herramientas para calcular la dosis recibida por tripulación en vuelo. Destacan EPCARD<sup>1</sup> y CARI<sup>2</sup>. En [14] hay una compilación de modelos clásicos y una comparación de sus capacidades.

Por otro lado, el desarrollo de observatorios de rayos cósmicos dentro de la atmósfera [15, 16, 17] y la construcción de grandes aceleradores [18], ha promovido el desarrollo de códigos de simulación de la interacción de la radiación con la materia con gran capacidad de parametrización y con resultados de alta calidad. Ver por ejemplo [19, 20].

El desarrollo de herramientas de simulación de propagación de radiación en ambientes de vuelo a partir de productos de uso general, como [19, 20], es una oportunidad para mejorar la capacidad de predicción. Este trabajo se ha venido realizando desde el problema fundamental de estudiar las propiedades de la radiación cósmica en la atmósfera, y llegando a la aplicación mencionada. Destacan los trabajos [21, 22, 23].

---

<sup>1</sup><https://www.helmholtz-munich.de/en/epcardnet>

<sup>2</sup>[https://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7](https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7)

En este ecosistema de propuestas es necesario contar con *frameworks* de trabajo accesibles fuera de los ambientes de computación de alto rendimiento. La posibilidad de contar con herramientas *de asalto* facilita el prototipado de sistemas que pueden ser estudiados en profundidad, una vez que han pasado las pruebas iniciales, aumentando la precisión sólo cuando es necesario. También existe la posibilidad de que el resultado obtenido con un sistema ligero sea satisfactorio para responder las preguntas planteadas.

Ese es el contexto en el que se planteó la necesidad de desarrollar gRAMA-kit [1]. Una herramienta abierta, acompañada de un repositorio completo, reproducible y comentado.

Es importante destacar que uno de los beneficios colaterales de cualquier empresa de investigación desarrollo y aplicación de la ciencia básica es el desarrollo de capacidades generales. En ese sentido la primera etapa de este proyecto ha apoyado y se ha beneficiado del desarrollo de varios trabajos de grado terminados [24, 25, 26, 27].

La estructura del documento es la siguiente.

En el capítulo 2 se exponen los fundamentos de la Radiobiología necesarios para justificar el hecho de que la dosis y en particular la dosis equivalente es la cantidad fundamental para predecir los efectos dañinos de la radiación.

En el capítulo 3 se exponen las propiedades básicas de los rayos cósmicos y su propagación en la atmósfera, produciendo el espectro de partículas de interés.

En el capítulo 4 se argumenta la estrategia general de estimación de dosis en tripulación de vuelos comerciales, así como las herramientas computacionales disponibles.

El capítulo 5 explica cómo está diseñado gRAMA-kit y discute los resultados obtenidos.

El capítulo 6 tiene las conclusiones e indicaciones sobre la continuación del trabajo.

Todas las imágenes usadas en el trabajo son producidas por el autor y están en el dominio público. Con excepción de los casos donde se indique la atribución al autor en el texto de la figura. El código que produce cada imagen, la imagen digital y en general, el código para generar todo este documento está publicado en [28], bajo la licencia

indicada.

La redacción de varias partes del documento se valió de la asistencia de ChatGPT, un modelo de lenguaje desarrollado por OpenAI [29]. Se trabajó a partir de una lista de ideas principales, alimentando el sistema con el propósito de estructurar y redactar un borrador del contenido. Este borrador fue usado como base para producir el texto definitivo. Los borradores utilizados en etapas iniciales de la redacción están disponibles en [28].

## Capítulo 2

# Efectos de la radiación sobre la materia viva

Este capítulo presenta los fundamentos de la Radiobiología, que explora cómo la radiación ionizante afecta a la materia viva. Es esencial para comprender desde la evolución del daño radiológico en humanos hasta la protección radiológica y el uso seguro de la radiación en medicina e industria.

Exploraremos el ciclo celular y crecimiento de poblaciones, contextualizando la dinámica de tejidos sanos y tumorales. Analizaremos las fases de interacción de la radiación en células y sus mecanismos, incluida la influencia de la LET.

Abordaremos los tipos de muerte celular, desde la mitosis hasta la apoptosis y la autofagia, y su relación con la radiación. Cerraremos con modelos que relacionan la dosis de radiación y efectos biológicos.

### 2.1. Organización de tejidos

Comenzamos explorando conceptos esenciales en Radiobiología, centrándonos en la transición del ciclo celular a la dinámica de poblaciones celulares en tejidos. A medida que escalamos desde la célula individual hasta la

población, emergen efectos que merecen nuestra atención.

En el contexto de los efectos intrínsecos de la radiación en la materia viva es fundamental considerar la interacción colectiva de las células. Esta interacción puede modificar la respuesta del conjunto y dar lugar a fenómenos nuevos. Por tanto, adoptamos un enfoque de doble escala: a nivel de célula y a nivel de órgano o individuo.

Un concepto clave para comprender la evolución de una población celular es el de **Célula clonogénica**. Estas células tienen la capacidad de dividirse indefinidamente y son el motor del crecimiento de una población celular.

### 2.1.1. El ciclo celular

El ciclo celular se divide en dos fases de actividad crítica y dos fases de espera entre ellas.

#### Mitosis

- Los cromosomas (fig 2.1b) están presentes.
- Involucra el proceso de división celular.
- Puede ser observada a nivel macroscópico bajo un microscopio óptico.

#### Síntesis

- Durante la síntesis la célula duplica su material genético.
- No se observa macroscópicamente.
- La célula incorpora material del entorno para construir DNA.

Los períodos de espera son denominados  $G_1$  (post-mitosis y pre-síntesis) y  $G_2$  (post-síntesis). Las células en fase  $G_1$  pueden entrar en un estado de latencia ( $G_0$ ) y reingresar al ciclo en algunos casos.

### 2.1.2. Distribución de células en el ciclo

En una población celular es esencial considerar la distribución de células en diferentes etapas del ciclo. Esta distribución puede experimentar cambios significativos en lapsos relativamente cortos.

Se encuentra un ejemplo ilustrativo estudiando una población inicialmente uniformemente distribuida en todas

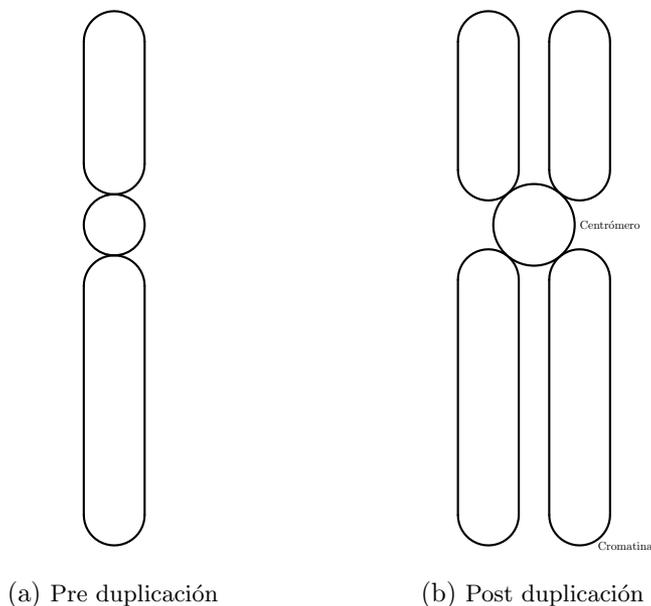


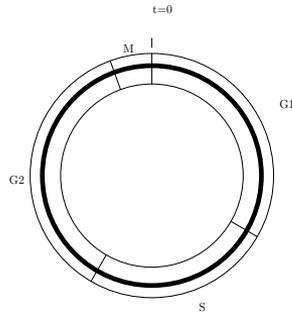
Figura 2.1: Representación conceptual de los cromosomas antes (a) y después de la duplicación (b). Los elementos característicos son los brazos de cromatina condensada y el centrómero.

las fases del ciclo. Ésta se desordenará rápidamente debido a la incorporación de nuevas células que entran en la fase  $G_1$  después de la división (figura 2.2). En contraste, una población sincronizada, en la cual todas las células comparten la misma fase del ciclo, eventualmente pierde esta propiedad al atravesar varios ciclos celulares, debido a la variabilidad del tiempo de duplicación celular.

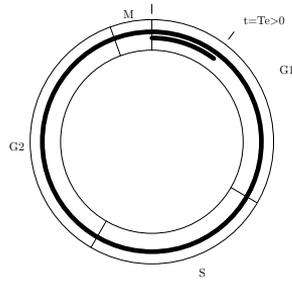
Un modelo un poco más realista e igualmente simple puede proponer que hay una distribución exponencial de progresión de las fases celulares [30].

La duración de cada fase y la distribución de la población celular a lo largo de estas fases son factores relevantes en la respuesta biológica de un tejido a la radiación. Determinar el tiempo de duración de cada fase del ciclo celular es un proyecto de gran importancia. Una técnica clásica e ingeniosa para lograr esto implica observar la manifestación de la mitosis y marcar el DNA recién sintetizado por las células.

La técnica denominada del **Porcentaje de mitosis etiquetadas** consiste en introducir un elemento radiactivo en algún precursor del DNA en el medio de cultivo



(a) Dist uniforme

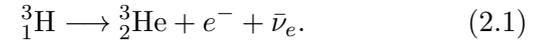


(b) Dist no uniforme

Figura 2.2: A partir de una población celular con edades distribuidas de manera uniforme se produce una población sesgada hacia células con edades más jóvenes

durante un período relativamente corto en comparación con la duración de la fase de Síntesis [30]. En su forma original se emplea timidina tritiada, que se incorporará al nuevo DNA de las células en fase de síntesis. Posteriormente se observa la aparición de células marcadas en la fase de Mitosis.

Esta timidina contiene tritio, cuyo decaimiento  $\beta$  (ec. 2.1) es adecuado para hacer un seguimiento de su presencia en el nuevo DNA celular.



Al observar la variación en la fracción de células marcadas en mitosis a lo largo del tiempo, se obtiene información valiosa sobre la duración de cada fase del ciclo (figura 2.3).

En el supuesto que el tiempo de duración de la síntesis sea apreciablemente mayor que el de la mitosis, la figura se puede leer del siguiente modo.

- En  $t = A$  se retira el marcador del medio. Todas las células etiquetadas están en síntesis.

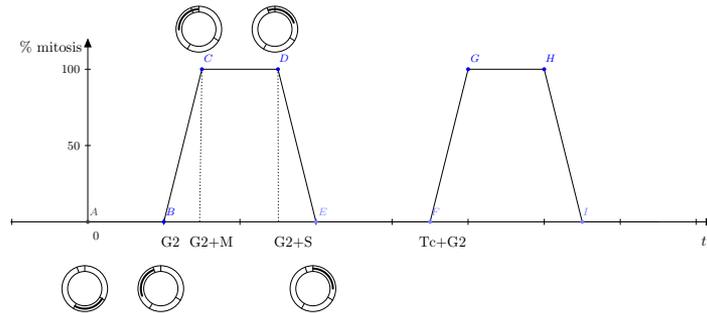


Figura 2.3: Método para medir los tiempos de duración de las fases del ciclo celular. Inspirado en [30]. Las células etiquetadas durante la síntesis son observadas hasta llegar a la mitosis.

- $t = B$ . Al transcurrir el tiempo de duración de  $G_2$  ( $T_{G_2}$ ) se comienzan a observar algunas mitosis marcadas.
- $t = C$ . El porcentaje de mitosis etiquetadas llega al máximo. Ha transcurrido un tiempo  $T_{G_2} + T_M$  ( $G_2$  + mitosis).
- $t = D$ . El porcentaje de mitosis comienza a descender. Esto indica que ha transcurrido un tiempo  $T_{G_2} + T_S$  ( $G_2$  + síntesis).

### 2.1.3. Algunas definiciones

A continuación, se presentan algunas definiciones que serán útiles para describir la cinemática de la evolución de poblaciones celulares en tejidos:

- **G0**: Conjunto de células que no están participando en el ciclo celular. Puede tratarse de células diferenciadas sin capacidad de duplicación, o referirse a un estado de latencia temporal.

- **Fracción de crecimiento:** Fracción de la población celular que no está en G0.
- **Factor de pérdida celular ( $\Phi$ ):** Se define como la relación  $\Phi = 1 - \frac{T_{\text{pot}}}{T_{\text{dr}}}$ , donde
  - $T_{\text{pot}}$  es el tiempo de duplicación potencial.
  - $T_{\text{dr}}$  es el tiempo de duplicación real.

Para comprender el Factor de pérdida celular, consideremos dos casos extremos:

- Si  $\Phi = 0$ , los tiempos de duplicación potencial y real son iguales ( $T_{\text{pot}} = T_{\text{dr}}$ ). Todas las células nuevas se incorporan al nuevo ciclo, y la población crece a su máximo potencial.
- Si  $\Phi = 1$ , el tiempo de duplicación real es mucho mayor que el potencial ( $T_{\text{pot}} \ll T_{\text{dr}}$ ). La generación de células nuevas está en equilibrio con las células que mueren, y el tamaño de la población permanece constante.

**Índice mitótico ( $MI$ ):** Fracción de células en mitosis en el instante de observación.

**Índice de etiquetado ( $LI$ ):** Fracción de células en fase S en el momento de observación.

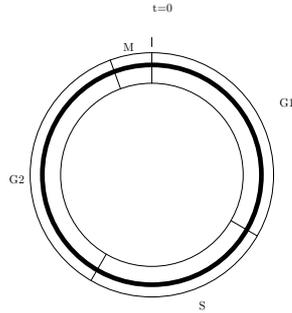
#### 2.1.4. Índices y duración de las fases

En una población con distribución uniforme en las fases del ciclo, existe una relación sencilla entre los índices de etiquetado y mitótico y la razón entre los tiempos de duración del ciclo celular y las fases de síntesis y mitosis, respectivamente (figura 2.4):

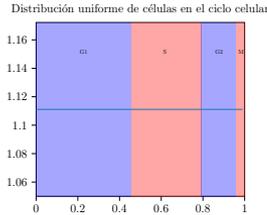
- $MI = \frac{T_M}{T_c}$
- $LI = \frac{T_S}{T_c}$

Sin embargo, la distribución de células sobre las fases del ciclo generalmente no es uniforme. Para mantener la relación entre los índices de etiquetado y mitótico y la razón entre los tiempos de duración del ciclo celular y las fases de síntesis y mitosis, es necesario introducir coeficientes de corrección (figura 2.5):

- $MI = \lambda_M \frac{T_M}{T_c}$



(a) Distribución uniforme



(b) Valor de  $\lambda_S$  en función del tiempo

Figura 2.4: Índices mitótico y de etiquetado en una población con edades distribuidas de forma uniforme.

- $LI = \lambda_S \frac{T_S}{T_c}$

Por ejemplo, en el caso de una población distribuida exponencialmente, con tiempo característico  $\tau = T_c/\beta$ ,

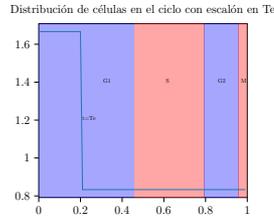
$$MI = e^{-\beta(1-t_M)} \frac{(1 - e^{-\beta t_M})}{(1 - e^{-\beta})}, \quad (2.2)$$

$$LI = e^{-\beta t_{G1}} \frac{(1 - e^{-\beta t_S})}{(1 - e^{-\beta})}, \quad (2.3)$$

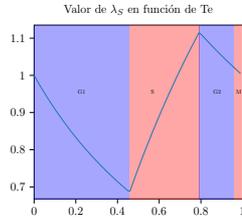
donde se han definido  $t_M \equiv T_M/T_c$ ,  $t_{G1} \equiv T_{G1}/T_c$  y  $t_S \equiv T_S/T_c$  respectivamente. Son los tiempos de duración relativo de las fases  $M$ ,  $G1$  y  $S$ , respecto a la duración del ciclo celular,  $T_c$ .

## 2.2. Crecimiento en tejidos

Cuando exploramos el crecimiento en tejidos en este contexto, estamos considerando células y tejidos de humanos o mamíferos. En un adulto sano, existe un equilibrio en la producción celular, lo que corresponde al caso  $\Phi = 1$ ,



(a) Distribución para tiempo  $T_e$  luego de la distribución uniforme.



(b) Valor de  $\lambda_S$  en función de  $T_e$

Figura 2.5: Cambio en coeficiente  $\lambda_S$  al progresar una población inicialmente distribuida uniformemente

donde las poblaciones celulares se mantienen. Estas células se organizan en **compartimentos**, que son conjuntos de células con diferentes niveles de especialización y capacidad reproductiva. Esencialmente, hay dos tipos de organización predominantes: compartimentos jerárquicos y compartimentos flexibles. Ver [31].

### 2.2.1. Compartimentos jerárquicos

Este es el caso típico en tejidos con **renovación celular rápida**, donde los compartimentos están claramente diferenciados físicamente en:

- Células madre.
- Células precursoras.
- Células funcionales.

Ejemplos notables de esta organización se encuentran en la piel, las mucosas, el epitelio intestinal y el sistema hematopoyético.

### 2.2.2. Compartimentos flexibles (no jerárquicos)

En contraste, encontramos los tejidos con **renovación celular lenta**, donde las células madre y las células diferenciadas están mezcladas y pueden intercambiar roles. Algunos ejemplos de este tipo de organización incluyen el hígado, el riñón, los pulmones y el sistema nervioso central.

### 2.3. Crecimiento tumoral

En el contexto del crecimiento tumoral la dinámica del tejido toma un carácter anómalo y la distribución en compartimentos sufre alteraciones significativas. Aquí podemos distinguir cuatro compartimentos principales (figura 2.6):

- Células en división activa.
- Células en estado de reposo (G0 o Q).
- Células diferenciadas (estériles).

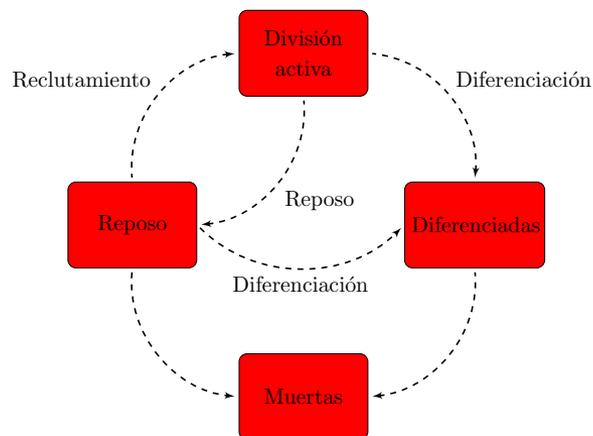


Figura 2.6: Rutas posibles de intercambio celular entre compartimentos en el tejido tumoral

- Células muertas o agonizantes.

En este escenario existe un constante intercambio de células entre prácticamente todos los compartimentos. A diferencia de los tejidos normales, el tejido tumoral no mantiene un equilibrio y se encuentra bajo la influencia de dos mecanismos principales de pérdida celular: la muerte

celular y la metástasis.

En el estudio de tumores sólidos surge la necesidad imperante de medir su crecimiento. Aquí los modelos de volumen basados en geometrías sencillas son ampliamente empleados.

El cálculo del **volumen** en tumores sólidos se puede realizar utilizando fórmulas para diferentes geometrías, tales como:

- Esferas:  $V = \frac{\pi}{6} \bar{D}^3$ .
- Elipsoides:  $V = \frac{\pi}{6} \bar{l} \bar{d}^2$ .

Es importante notar que el tamaño mínimo observable en imágenes es aproximadamente 1 gramo (equivalente a  $1 \text{ cm}^3$ ).

En lo que respecta al crecimiento de tumores se observa un comportamiento exponencial para tumores pequeños, que generalmente son del orden de 100 gramos en algunos casos. El tiempo de duplicación del tamaño,  $T_D$ , se mantiene constante en esta fase exponencial y está relacionado con una constante de tiempo característico  $\tau$ :

$$V = V_0 e^{\frac{t}{\tau}}$$

Sin embargo, a medida que los tumores alcanzan tamaños mayores, su comportamiento se aleja de la ley exponencial y un único parámetro temporal es insuficiente para describir la evolución. En este contexto, un modelo ampliamente utilizado es el modelo de **Gompertz**, que describe el crecimiento tumoral de acuerdo a la siguiente expresión general:

$$V = V_0 e^{\frac{A(1-e^{-Bt})}{B}}$$

Este modelo presenta varias características notables:

- La relación entre el tamaño de la población celular y el tiempo tiene una forma sigmoideal.
- El crecimiento está limitado por una cota superior.
- Para tiempos pequeños, el comportamiento se asemeja al crecimiento exponencial.

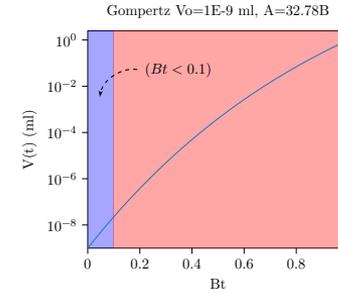
El modelo tipo Gompertz involucra tres parámetros esenciales (figura 2.7):

- $B^{-1}$ , que representa la escala temporal que define las fases exponencial y asintótica del crecimiento.
- $A^{-1}$ , que caracteriza la escala temporal en la fase exponencial.
- $V_0 e^{A/B}$ , que denota el valor límite de  $V(t \gg B^{-1})$ .

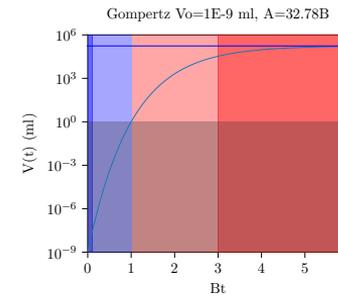
En búsqueda de una mayor precisión en la descripción de las fases y escalas de crecimiento se han desarrollado modelos más sofisticados que hacen una diferenciación más fina. Además, se ha explorado la dimensión espacial, como se observa en el Modelo de Potts Celular. Por ejemplo, ([32]).

El **Modelo de Potts Celular** presenta las siguientes características:

- Opera sobre una red lattice.
- Los grados de libertad de espín en cada sitio permiten definir los dominios celulares y el tipo de célula.
- El Hamiltoniano se formula de manera que favorezca la conservación de la masa celular, la adherencia a células vecinas y otros factores.



(a)  $t \ll B^{-1}$



(b)  $t > B^{-1}$

Figura 2.7: Dos vistas del crecimiento según un modelo de Gompertz. Para  $t \ll B^{-1}$  el crecimiento es exponencial. Cuando  $t > B^{-1}$  la desaceleración del crecimiento se hace más evidente.

## 2.4. Radiobiología

La **radiobiología** se enfoca en el estudio de cómo la **radiación ionizante** afecta la materia viva, dividiendo esta acción en diversas fases, cada una con sus propios procesos y escalas temporales distintivas [33, 34, 5].

### 2.4.1. Fase física

En la **fase física** del proceso:

- El transporte de la radiación a través de la materia provoca la liberación de partículas cargadas secundarias, principalmente electrones.
- Esto ocasiona alteraciones estructurales en moléculas, incluyendo rotura de enlaces y generación de radicales libres.

La **dosis** juega un papel fundamental en este proceso, ya que:

- La probabilidad de que una célula sufra un efecto depende de la cantidad de ionizaciones que se produzcan, lo cual está relacionado con la energía de las

partículas incidentes y la cantidad de partículas por unidad de masa (dosis).

- La distribución espacial de las ionizaciones en el medio también influye en la probabilidad de daño celular, la cual está determinada por el tipo de partícula ionizante y su energía.
- Resulta crucial tener en cuenta las diversas magnitudes dosimétricas disponibles.

### Dosimetría

Definimos la **radiación ionizante** como la propagación de distintos tipos de partículas, en las cuales los procesos cuánticos de transferencia de energía intercambian cantidades en el rango de los eV o superiores. Estos procesos son equivalentes a los producidos por fotones con longitudes de onda  $\lambda < 320$  nm.

Los fotones con poder ionizante pueden surgir de diversas fuentes:

- Decaimiento de núcleos excitados, generando rayos  $\gamma$ .

- Frenado de partículas cargadas, originando rayos X.

Los electrones con poder ionizante pueden ser de origen natural o tecnológico:

- Origen natural:
  - Decaimiento, dando lugar a rayos  $\beta$ .
  - Secundarios en procesos de ionización, como los rayos  $\delta$ . Esto ocurre, por ejemplo, en las cascadas electromagnéticas presentes en la atmósfera o en cualquier material.
- Origen tecnológico:
  - Aceleración en campos electromagnéticos, como en el caso de los aceleradores lineales, Van de Graaff o betatrón.

En el caso de partículas más masivas, como protones y otras partículas cargadas, se encuentran los siguientes mecanismos:

- Decaimiento  $\alpha$ .

- Aceleración en campos electromagnéticos, presentes en dispositivos como el Van de Graaff, aceleradores lineales o ciclotrones.

Las fuentes de neutrones involucran reacciones donde hadrones cargados colisionan con núcleos, tal como  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ . Además, los neutrones pueden surgir como subproductos en procesos de decaimiento nuclear.

La interacción de los neutrones con la materia presenta una dependencia significativa con su energía:

- Neutrones térmicos: siguen una distribución de Maxwell-Boltzmann y su energía se encuentra en el rango de temperaturas cercanas al ambiente. A  $20^\circ\text{C}$ , la energía más probable es de 0.025 eV y el promedio es de 0.038 eV.
- Neutrones lentos, intermedios o de resonancia tienen energías en el rango de 0.01 MeV a 0.1 MeV.
- Neutrones rápidos poseen energías en el rango de 10 MeV a 20 MeV.
- Neutrones de energías superiores, fuera del rango de los rápidos, se denominan neutrones relativistas.

Según el tipo de partícula, la radiación ionizante puede ser **directa** o **indirecta**. La radiación directa consiste en partículas cargadas que entregan gradualmente su energía al material, interactuando principalmente con los electrones del mismo. En contraste, la radiación indirecta involucra partículas neutras que transfieren su energía a partículas cargadas del material en eventos con grandes intercambios de energía, efectuando así un proceso en dos etapas.

### Magnitudes estocásticas

Hablamos de **magnitudes estocásticas** para responder a dos preguntas esenciales sobre la radiación ionizante y sus efectos anticipados: ¿cuánta radiación llega a un punto del espacio? y ¿cómo se define el efecto de la radiación?

Estas cuestiones nos llevan a la necesidad de definir cantidades que describan la interacción del campo de radiación con la materia. Aunque los procesos subyacentes son microscópicos y cuánticos, con un carácter estocástico y probabilístico, los valores esperados pueden describirse

mediante campos continuos con valores definidos en cada punto del espacio.

Algunas características clave de las magnitudes estocásticas son:

- Sus valores cambian de manera aleatoria y responden a ciertas distribuciones de probabilidad.
- Estas magnitudes solo se definen para volúmenes e intervalos de tiempo finitos, cambiando de forma discontinua en el espacio y el tiempo.
- En principio es posible determinarlas de manera exacta.

La referencia clásica para acercarse a la definición magnitudes estocásticas y su relación con las estocásticas es [35].

### Magnitudes no estocásticas

Las **magnitudes no estocásticas** se obtienen mediante la definición de valores esperados de las magnitudes estocásticas y tienen una gran relevancia en la dosimetría.

Al estar definidas en términos funcionales, pueden calcularse a partir de datos experimentales o modelos teóricos. Generalmente, se trata de distribuciones bien definidas en puntos del espacio-tiempo, y es posible realizar operaciones de cálculo diferencial e integral sobre ellas.

El conjunto básico de magnitudes dosimétricas no estocásticas incluye las siguientes:

- **Afluencia ( $\Phi$ ):** Representa el número de partículas que llegan desde todas las direcciones a un punto de espacio durante un tiempo finito. Su origen estocástico es el número total de rayos que llegan a una esfera infinitesimal centrada en el punto de interés. La afluencia tiene unidades de inverso de área.
- **Densidad de flujo ( $\dot{\Phi}$ ):** Es la afluencia por unidad de tiempo y tiene dimensiones de inverso de área por inverso de tiempo.
- **Afluencia de energía ( $\Psi$ ):** Representa la energía por unidad de área que llega desde todas las direcciones a un punto específico del espacio. Esta energía se relaciona con las partículas consideradas en la defi-

nición de afluencia. La afluencia de energía no incluye la energía en reposo de las partículas y tiene dimensiones de energía por unidad de área. Si el flujo de partículas es monoenergético con un valor  $E$ , existe una relación sencilla:  $\Psi = E\Phi$ .

- **Densidad de flujo de energía ( $\varphi = \dot{\Psi}$ ):** Es la afluencia de energía por unidad de tiempo y tiene dimensiones de energía por inverso de área por inverso de tiempo.
- **Densidad diferencial de flujo de energía ( $\varphi'(\theta, \beta, E, t)$ ):** Es una distribución que agrega información detallada sobre el espectro de energía y la distribución angular (figura 2.8). Representa el número de partículas con energía en un rango diferencial  $dE$  y que llegan en un rango diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$  en la dirección  $(\theta, \beta)$ , por unidad de área y por unidad de tiempo (ec. 2.4). A partir de integrales de  $\varphi'$  se construyen las demás magnitudes, como  $\varphi$ ,  $\Psi$ ,  $\dot{\Phi}$  y  $\Phi$ .

$$dN = \varphi'(\theta, \beta, E) da dE d\Omega dt \quad (2.4)$$

Existen otras cantidades de interés que aplican de manera distinta a la radiación directa o indirectamente ionizante:

- KERMA (*K*inetic *E*nergy *R*elased *p*er unit *M*Ass):** Esta magnitud solo se define para radiación indirectamente ionizante. Representa el valor esperado de la energía transferida a las partículas cargadas del material por unidad de masa. La cantidad estocástica relacionada es la energía transferida ( $\epsilon_{tr}$ ) en un volumen finito  $V$ , definida según la siguiente contabilidad:

$$\epsilon_{tr} = R_{in} - (R_{out})^{nr} + \sum Q,$$

donde  $R$  es la energía de radiación contenida en las partículas sin carga, y  $Q$  es la conversión masa-energía dentro del volumen  $V$ . El superíndice  $nr$  indica que se excluyen las partículas producidas en el interior de  $V$  debido a partículas cargadas.

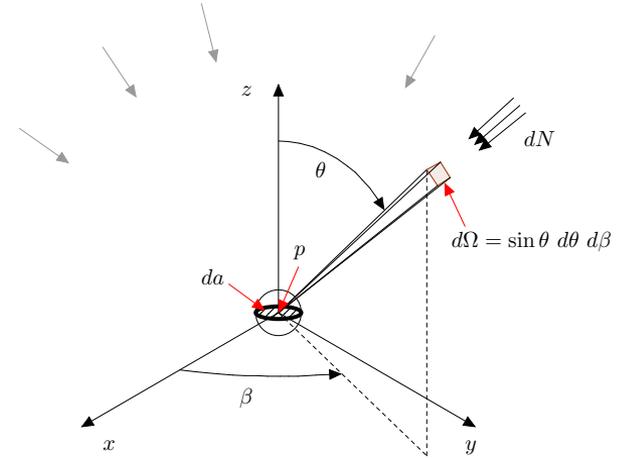


Figura 2.8: La densidad de flujo diferencial  $\varphi'(\theta, \beta, E)$  indica el número de partículas con energías entre  $E$  y  $E + dE$  que arriban a un detector en el punto  $p$ , de área transversal  $da$ , con direcciones en un diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$  en dirección  $(\theta, \beta)$  por unidad de tiempo (ecuación 2.4). Ver: [35]

- **LET (*Linear Energy Transfer*)**: La LET es una medida de la densidad de ionizaciones producidas por una partícula mientras atraviesa la materia. Hay dos conceptos estrechamente relacionados: el poder de frenado y la LET.

El poder de frenado es la tasa de pérdida promedio de energía de una partícula cargada que atraviesa un medio ( $dE/dx$ ). Por otro lado, la LET es similar al poder de frenado, pero se agrega una cota de energía. Solo se contabiliza la energía transferida hasta dicho máximo. Dado que la energía se transfiere principalmente a los electrones del medio, esta cota de energía permite localizar el efecto de la radiación en una región específica definida por el rango de los electrones de esa energía.

## Dosis

La **dosis** es la energía absorbida promedio por unidad de masa por cualquier tipo de radiación en cualquier tipo de material blanco. La cantidad estocástica relacionada es la energía impartida en un volumen finito  $V$ :

$$\epsilon_{tr} = R_{in} - (R_{out}) + \sum Q.$$

La interacción de la radiación en la materia produce ionizaciones, lo que genera especies químicamente activas responsables de gran parte de los efectos de la radiación. Cuanta mayor energía se absorba, mayor será el efecto. La dosis es una cantidad fundamental para estudiar el efecto de la radiación, aunque no es la única.

Las partículas de alta LET<sup>1</sup>, como núcleos y protones, generan un patrón de ionizaciones denso a lo largo de su trayectoria, lo que puede afectar directamente al DNA celular. Los fotones, por otro lado, generan un patrón de ionizaciones disperso, con un efecto más pronunciado a través de reacciones indirectas. Hasta 2/3 del daño producido por fotones ocurre por vía indirecta.

Los electrones están estrechamente relacionados con los fotones, ya que participan de manera similar en la cascada electromagnética dentro del material. Los neutrones también presentan una particularidad. Aunque son partículas

---

<sup>1</sup>Definimos de alta LET aquellas transferencias mayores a 10 keV/ $\mu\text{m}$

neutras, su patrón de ionizaciones puede ser similar al de partículas de alta LET.

El efecto de la radiación depende de factores relacionados con el tipo de radiación, como la energía y el tipo de partícula, que afectan la LET y el patrón espacial de ionizaciones. Se introduce el **Factor de calidad**  $Q(\text{LET})$ , que mide la diferencia de dosis para dos tipos de radiación para un mismo efecto. Si consideramos dos dosis de tipos de radiación diferentes  $D_1$  y  $D_2$ , que producen el mismo efecto en la materia, los factores de calidad se definen como:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

También se define  $H$  como la **dosis equivalente**:

$$H = D_1 Q_1 = D_2 Q_2.$$

La definición de  $Q$  permite una libertad de escala común, resuelta en la determinación de  $Q$  para fotones ( $Q = 1$ ). Para partículas cargadas,  $Q$  se define a partir de la LET [6]. Para partículas neutras,  $Q$  se define a partir

de la LET de las partículas secundarias cargadas. En particular, en [6], la ICRP recomienda la siguiente relación funcional entre  $Q$  y la LET ( $L_\infty$ ) (ecuación 2.5),

$$Q(L) = \begin{cases} 1, & L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0.32L - 2.2, & 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L}, & L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \end{cases} \quad (2.5)$$

Sin embargo, la definición del factor de calidad puede modificarse según el tipo de efecto que se considere. En el caso de la materia viva, se introduce el concepto de **factor de peso de radiación**  $w_r$ , que toma en cuenta la efectividad radiobiológica de diferentes tipos de radiación en condiciones de baja dosis y baja tasa de dosis y la probabilidad de producir efectos estocásticos<sup>2</sup> en períodos de tiempo prolongados [6, 5]. Ver tabla 2.1

El factor de peso de los neutrones representa un caso especial, ya que depende fuertemente de la energía. Ver figura 2.9 y ecuación 2.6.

---

<sup>2</sup>La definición de efecto estocástico en el organismo será presentada en la sección 2.4.8

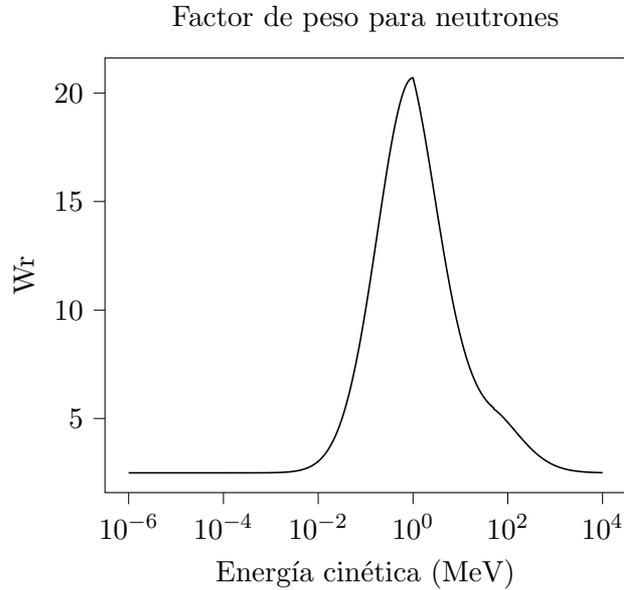


Figura 2.9: El factor de peso para neutrones depende de la energía (Ecuación 2.6). Ver: [6]

Fuente de radiación	$w_r$
Fotones, electrones y muones	1
Protones y piones	2
Núcleos y fragmentos de iones con $A \geq 4$	20

Tabla 2.1: Factor de peso  $w_R$  para fotones y partículas cargadas. Con información de [6]

$$w_r = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-(\ln E)^2/6}, & E < 1 \text{ MeV} \\ 5 + 17.0e^{-(\ln 2E)^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-(\ln 0.04E)^2/6}, & E > 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2.6)$$

Continuando con la cuantificación de la dosis, en el caso de partículas cargadas existe una relación directa entre la dosis, el poder de frenado y la afluencia. En el caso de partículas neutras, la dosis es igual a la KERMA en el caso que se cumpla la condición de **equilibrio de partículas cargadas** [35].

### 2.4.2. Fase química

En la fase química:

- Los radicales libres generados a partir de las ionizaciones reaccionan en el medio.
- En particular, la radiólisis del agua produce radicales libres que interactúan con moléculas del entorno celular.
- La abundancia de agua en el medio celular es clave.
- Pueden ocurrir procesos de fijación y reparación en las moléculas.
- En este proceso de restauración del equilibrio químico, pueden producirse cambios estables en las moléculas del medio. Algunos procesos de fijación llevan a cambios en la estructura de las moléculas del medio, mientras que otros son procesos de reparación exitosos en los que los radicales libres son neutralizados.

### 2.4.3. Radiólisis del agua y radicales

Durante la radiólisis del agua, se generan radicales libres como  $\cdot\text{OH}$  y  $\text{H}\cdot$ , que pueden interactuar con otras moléculas y desencadenar reacciones químicas en el medio celular [33].

### 2.4.4. Canales de reacción de radicales

Los radicales libres pueden participar en diversas reacciones, incluyendo:

- Procesos de restauración química.
- Aparición de sustancias dañinas en el medio.
- Cambios en moléculas complejas que pueden tener efectos en la función celular.

#### Reacciones en el medio celular

- $\text{H}_2\text{O} + \gamma \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e^-$
- $e^-$  sigue un canal:
  - $\text{H}_2\text{O} + e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}^- \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{H}\cdot$

- $\text{H}_2\text{O}^+$  sigue uno de dos canales equivalentes
  - $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \cdot\text{OH}$
  - $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \cdot\text{OH}$

### Hacemos la contabilidad

- Cada electrón aporta
  - Un ión hidróxido  $^-\text{OH}$ .
  - Un radical libre  $\text{H}\cdot$ .
- Cada  $\text{H}_2\text{O}^+$  aporta
  - Un ión hidronio  $\text{H}_3\text{O}^+$  o un protón  $\text{H}^+$ .
  - Un radical libre  $\cdot\text{OH}$ .

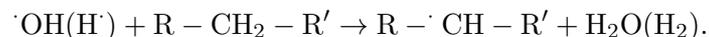
Los iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  (o  $\text{H}^+$ ) y  $^-\text{OH}$  ya están presentes en el medio celular y no alteran el equilibrio homeostático. Sin embargo, los radicales  $\cdot\text{OH}$  y  $\text{H}\cdot$  pueden migrar fácilmente y producir reacciones nuevas. Una posible reacción es de restauración



Sin embargo, también se puede dar la aparición de sustancias dañinas,



y cambios en moléculas complejas con la generación de nuevos radicales



### 2.4.5. Fase biológica

En la fase biológica:

- Reacciones enzimáticas reparan el daño residual en moléculas clave, como el DNA.
- Esta fase es eficaz y consta de una variedad de mecanismos de reparación molecular.
- Cambios químicos residuales no reparados pueden dar lugar a mutaciones genéticas, muerte celular, cáncer y otros efectos adversos.

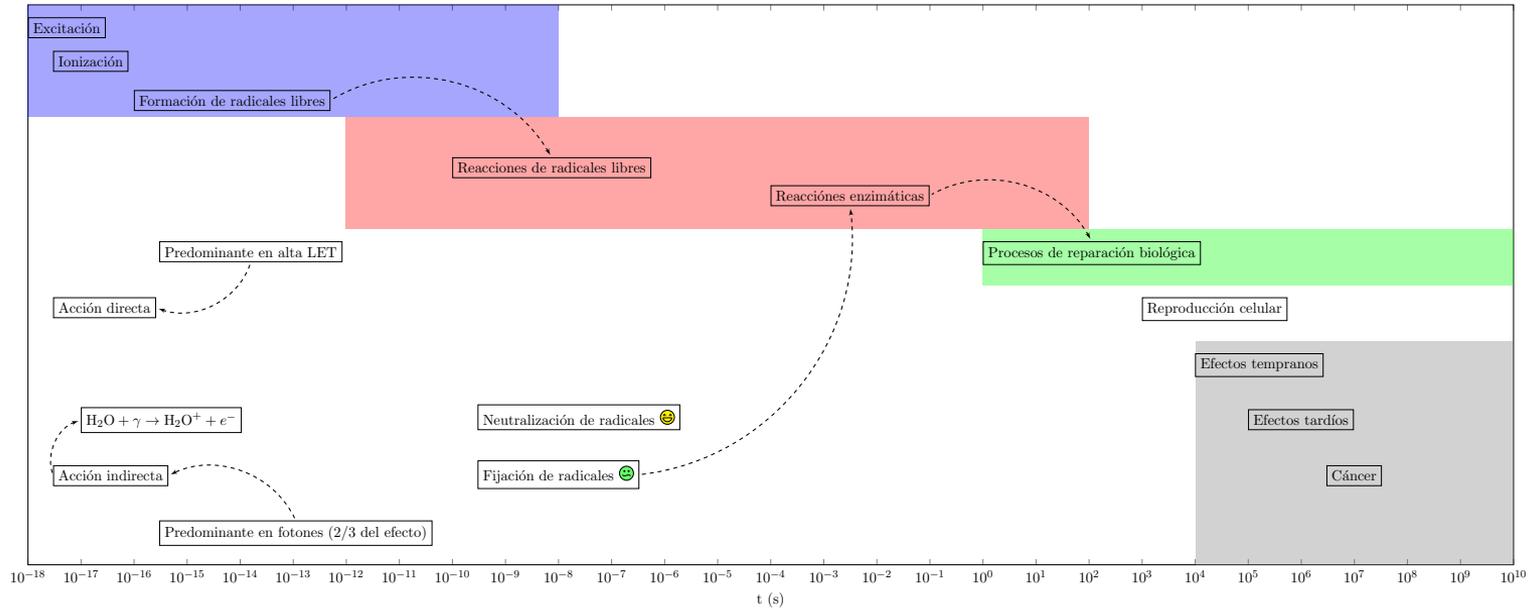


Figura 2.10: Comparación entre los tiempos de duración de cada fase del efecto de la radiación en la materia viva. Con información de [34]

### 2.4.6. Daño celular

El daño celular es el factor clave que determina el efecto biológico de la radiación en los tejidos [5]. Algunas consideraciones importantes sobre el daño celular incluyen:

- Las células en fase activa de duplicación son más sensibles a la radiación que las células diferenciadas o en fase latente.
- El proceso de daño celular es complejo y puede dividirse en diferentes etapas. Existen momentos en el ciclo celular con mayor radiosensibilidad, cuando los mecanismos de reparación son menos eficaces. En general, las fases de Mitosis y Síntesis son las más radiosensibles.
- La radiosensibilidad varía entre diferentes tipos de células y tejidos. Sin embargo, cuando se comparan en las mismas fases del ciclo celular, la sensibilidad de todas las células es similar. Esto se aplica incluso a individuos de diferentes especies.
- Uno de los factores que diferencia la radiosensibilidad

entre diferentes poblaciones celulares es la duración del ciclo celular y de sus fases individuales.

- El DNA es el blanco principal del daño causado por la radiación. Esta afirmación se ha corroborado experimentalmente en varios sistemas vivos.
  - En cultivos *in vitro*, las micro irradiaciones selectivas en el núcleo y otras áreas del citoplasma conducen a la observación de muerte celular en las que fueron irradiadas en el núcleo [36].
  - Estudios en virus y plantas han establecido una correlación entre la radiosensibilidad y el tamaño de los cromosomas. Organismos con cromosomas más grandes tienden a ser más radiosensibles [37, 38].
  - La letalidad celular está relacionada con la aparición de aberraciones en el DNA [39].

Las aberraciones son cambios permanentes en el DNA que se vuelven visibles en los cromosomas. Se pueden clasificar en dos tipos principales:

- **Aberraciones cromosómicas:** Ocurren debido a roturas y reparaciones fallidas antes de la duplicación del DNA. Estas aberraciones afectan a ambos cromosomas del par y pueden ser letales o no letales.
  - **Cromosoma dicéntrico:** Dos cromosomas se rompen y se unen, generando un cromosoma con dos centrómeros y dos segmentos acéntricos después de la replicación.
  - **Anillo:** Dos roturas en los brazos de un cromosoma forman un anillo y un segmento acéntrico.
- **Aberraciones cromátidas:** Estas ocurren después de la duplicación del DNA.
  - **Puente anafase:** Una rotura en dos brazos del cromosoma después de la replicación causa una unión incorrecta que impide que el cromosoma migre a los polos durante la Anafase.
- **Aberraciones no letales:** Incluyen cambios en la estructura cromosómica que no causan la muerte celular, pero pueden tener consecuencias en la función

celular y manifestarse como enfermedades en el individuo o en generaciones futuras.

- **Translocación:** Dos cromosomas experimentan roturas y los fragmentos intercambian posiciones.
- **Borrado:** Un cromosoma sufre una rotura en tres fragmentos, y un segmento se pierde durante la reparación.

#### 2.4.7. Efectos de la radiación

Al considerar los efectos de la radiación en el nivel celular y en el nivel del individuo se pueden observar diferentes respuestas:

- A nivel celular los efectos evidentes pueden ser relativamente rápidos, como la muerte celular o la pérdida de capacidad reproductiva.
- A nivel del individuo los efectos pueden manifestarse en diferentes escalas temporales, dependiendo de la dosis y la tasa de exposición.

## Tipos de muerte celular

Dentro de los efectos en las células varios tipos de muerte celular pueden ocurrir:

- **Muerte mitótica:** Esta forma de muerte celular ocurre cuando la célula no puede completar el proceso de mitosis y muere. Suele estar relacionada con daño en los cromosomas y es una de las formas más comunes de muerte celular después de la exposición a la radiación. Se observan aberraciones letales en las células que mueren por muerte mitótica.
- **Apoptosis:** La apoptosis, también conocida como muerte programada tipo I, es un proceso común durante el crecimiento embrionario y la separación de tejidos. En este proceso la célula en apoptosis se desconecta de las células vecinas y se separa físicamente. Se caracteriza por la condensación de la cromatina, la desaparición de la membrana nuclear, la fragmentación del DNA en fragmentos de tamaño definido y la formación de cuerpos apoptóticos. Las células tumorales pueden desarrollar resistencia a la apoptosis.
- **Autofagia:** También conocida como muerte programada tipo II, la autofagia involucra la degradación celular a través de la auto-digestión en lisosomas. Durante la autofagia, el citoplasma se divide en compartimentos de doble membrana llamados autofagosomas, que luego se fusionan con los lisosomas para formar autolisosomas. La autofagia se ha observado en tumores expuestos a la radiación.
- **Senescencia:** La senescencia es una respuesta a la acumulación de daño celular y está relacionada con factores como la pérdida de telómeros, activación de oncogenes y daño en el DNA. Durante la senescencia, el ciclo celular se detiene de manera irreversible y las células se vuelven metabólicamente activas pero no reproductivas. Esta es una forma de supresión tumoral, ya que las células senescentes pueden influir en la multiplicación de las células vecinas.

## Efecto Bystander y Abscopal

A medida que pasamos de la escala celular a la del individuo se vuelven evidentes respuestas más complejas a

la radiación. Por ejemplo, el **efecto Bystander** es un fenómeno en el cual las células en un cultivo experimentan efectos incluso si no han sido irradiadas directamente, pero sus células vecinas sí lo han sido.

- Se ha observado que la exposición a dosis bajas de partículas  $\alpha$  en una población celular resulta en un efecto mayor que la proporción de células alcanzadas por estas partículas. Por ejemplo, si se aplica una dosis donde solo el 1 % de las células reciben dosis en el núcleo, se observa que alrededor del 30 % de las células presentan alteraciones en el DNA [40, 41].
- Micro haces de radiación selectiva también han demostrado que las células en contacto con las células irradiadas experimentan un mayor efecto *Bystander*, que disminuye con la distancia entre las células [42].
- Además, se ha transferido medio de cultivo de células irradiadas a un cultivo no irradiado y se ha observado el mismo efecto *Bystander* [43, 44].
- Este efecto es significativo a dosis bajas y debe ser

considerado al estimar riesgos de exposición a la radiación.

Otro fenómeno interesante es el de los **efectos abscopales**, los cuales se han observado al tratar tumores con radioterapia localizada y observar efectos en áreas distantes del tumor principal [5].

### 2.4.8. Efectos sobre el organismo

En términos de su acción sobre el organismo los efectos de la radiación pueden dividirse en dos categorías principales: determinísticos y estocásticos. Esta división fue propuesta originalmente en [45]. Una introducción actualizada se encuentra por ejemplo en [5].

#### Efectos determinísticos

Los efectos determinísticos son el resultado de la acumulación de células afectadas por la radiación y son agregados a nivel del organismo. Algunas características de los efectos determinísticos incluyen:

- Los efectos determinísticos tienen un umbral práctico de manifestación, lo que significa que solo se presentan cuando se supera cierto nivel de dosis.
- A medida que la dosis se acerca al umbral, la probabilidad de manifestación aumenta rápidamente.
- Una vez que se supera el umbral, la magnitud del efecto observado aumenta proporcionalmente con la dosis aplicada.
- Un efecto determinístico muy conocido es el de las cataratas causadas por la exposición a la radiación.

### **Efectos estocásticos**

Los efectos estocásticos son aquellos en los que la radiación puede producir mutaciones no letales que persisten en el tejido. Estos efectos no tienen un umbral práctico y la probabilidad de sufrirlos es finita a cualquier nivel de dosis. Algunas características de los efectos estocásticos son:

- La probabilidad de manifestar efectos estocásticos aumenta con la dosis de radiación.
- Aunque la probabilidad aumenta, la magnitud del efecto manifestado es independiente de la dosis.
- Los efectos estocásticos incluyen la carcinogénesis y la posibilidad de efectos hereditarios.

La tabla 2.2 compara los efectos determinísticos y estocásticos:

La carcinogénesis por radiación es un ejemplo importante de efecto estocástico, especialmente en casos de baja dosis y baja tasa de dosis. Aunque el estudio de estos efectos es principalmente observacional, es fundamental desarrollar mecanismos para mejorar la precisión en la determinación de riesgos.

<b>Efectos Determinísticos</b>	<b>Efectos Estocásticos</b>
Severidad aumenta con la dosis	Severidad es independiente de la dosis
Umbral práctico de manifestación	No hay umbral práctico
Probabilidad de ocurrencia aumenta con la dosis	Probabilidad de ocurrencia aumenta con la dosis
Ejemplo: Catarata por radiación	Ejemplo: Cáncer por radiación

Tabla 2.2: Comparación entre los efectos determinísticos y estocásticos de la radiación. Con información de [5]

## Capítulo 3

# Rayos Cósmicos

Los Rayos Cósmicos están compuestos por partículas cargadas que llegan constantemente a la atmósfera terrestre en un rango amplio de energías [2]. En esta sección se llevará a cabo una compilación de las propiedades más destacadas de la radiación cósmica, centrándonos en su aplicación para abordar el desafío de estimar la dosis de radiación recibida en aeronaves. Una exploración detallada y enriquecedora se encuentra disponible en las referencias [2, 3, 4].

En este contexto es crucial adentrarse en diversos aspectos fundamentales. En primer lugar se resalta la importan-

cia de comprender la composición intrínseca de los Rayos Cósmicos, examinando tanto su diversidad de partículas cargadas como la variabilidad en sus energías. Establecer una panorámica completa de esta composición esencial nos permite comprender mejor su influencia en la estimación de dosis de radiación.

Una atención especial se dirige hacia el espectro de energía diferencial de los Rayos Cósmicos. La distribución de energía de estas partículas proporciona valiosa información sobre su comportamiento y sus interacciones en la atmósfera superior. Explorar este espectro a profundidad

resulta imperativo para captar plenamente su impacto y consecuencias en términos de dosis de radiación.

Asimismo se abordarán los fenómenos fenomenológicos que caracterizan el transporte de los Rayos Cósmicos en la atmósfera terrestre. La comprensión de estos procesos es esencial para modelar y predecir cómo se propaga esta radiación en distintas altitudes y condiciones. Al mismo tiempo se analizarán las propiedades peculiares del espectro de partículas secundarias en función de la altitud.

### 3.1. Composición

Los Rayos Cósmicos están compuestos tanto por partículas elementales como por núcleos. La radiación cósmica que alcanza la atmósfera terrestre abarca todas las partículas cargadas con vidas medias superiores a  $10^6$  años. Estos rayos cósmicos se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios comprenden el conjunto de partículas creadas y aceleradas mediante procesos astrofísicos, mientras que los secundarios resultan de la interacción de los primarios con el gas intergaláctico.

Un aspecto crucial radica en que los primarios son con frecuencia elementos sintetizados en las estrellas. Esta característica insinúa una relación interesante entre las abundancias de elementos en los secundarios. Generalmente, se observa una relación par-impar en estas abundancias, donde los núcleos de número atómico  $Z$  par suelen ser más abundantes que los núcleos impares vecinos cercanos ( $Z \pm 1$ ) [2]. Aunque esta relación es más acentuada en la síntesis estelar, se atenúa en los rayos cósmicos secundarios.

La composición de la radiación cósmica muestra una inclinación marcada hacia la prevalencia de partículas ligeras, con una disminución a medida que aumenta el número atómico ( $Z$ ) del núcleo. En términos concretos, alrededor del 90 % de los rayos cósmicos consiste en protones, seguidos en importancia por partículas alfa ( $\alpha$ ) que representan aproximadamente el 9 % del total.

En principio la magnitud de esta diferencia en la composición varía con la energía. En la tabla 3.1 se muestra para una energía de 10.6 GeV/nucleon.

En la tabla también se muestra que esta relación per-

$Z$	Elemento	$F_{E=10.6 \text{ GeV}}$	$F_{E \in (10 \text{ GeV} - 1000 \text{ GeV})}$
1	H	9.36E-01	9.48E-01
2	He	5.79E-02	4.55E-02
3–5	Li-B	6.81E-04	7.02E-04
6–8	C-O	3.74E-03	3.89E-03
9–10	F-Ne	5.11E-04	5.31E-04
11–12	Na-Mg	3.74E-04	3.89E-04
13–14	Al-Si	3.23E-04	3.32E-04
15–16	P-S	5.11E-05	5.69E-05
17–18	Cl-Ar	1.70E-05	1.90E-05
19–20	K-Ca	3.40E-05	3.79E-05
21–25	Sc-Mn	8.51E-05	8.53E-05
26–28	Fe-Ni	2.04E-04	2.09E-04

Tabla 3.1: Fracción de partículas componentes de radiación cósmica en la parte alta de la atmósfera respecto al total, a una energía particular (10.6 GeV) y para un rango de energías  $E \in (10 \text{ GeV} - 1000 \text{ GeV})$ . Con información de [2, 3]

siste en el rango de energías  $E \in (10 \text{ GeV} - 1000 \text{ GeV})$  por nucleón [2].

La presencia de rayos cósmicos secundarios es influenciada por la interacción con los campos electromagnéticos del entorno, incluyendo el campo galáctico, solar y, ocasionalmente, el terrestre. Un ejemplo ilustrativo de esto es el aumento en la intensidad del viento solar, lo que conduce a una disminución de la cantidad de radiación cósmica que llega a la Tierra, debido a su arrastre por el campo electromagnético solar.

Estos campos magnéticos cumplen el rol de filtros de rigidez magnética. La rigidez magnética está determinada por el producto entre el radio de giro ( $r$ ) de una partícula y el campo magnético transversal ( $B$ ) capaz de inducir dicho giro (figura 3.1). Usando la Fuerza de Lorentz en unidades gaussianas, la rigidez magnética ( $R$ ) tiene la expresión 3.1,

$$R = rB = \frac{pc}{Ze}, \quad (3.1)$$

donde  $p$  es el momento lineal de la partícula,  $c$  la velocidad de la luz y  $Ze$  la carga neta. Tiene dimensiones de

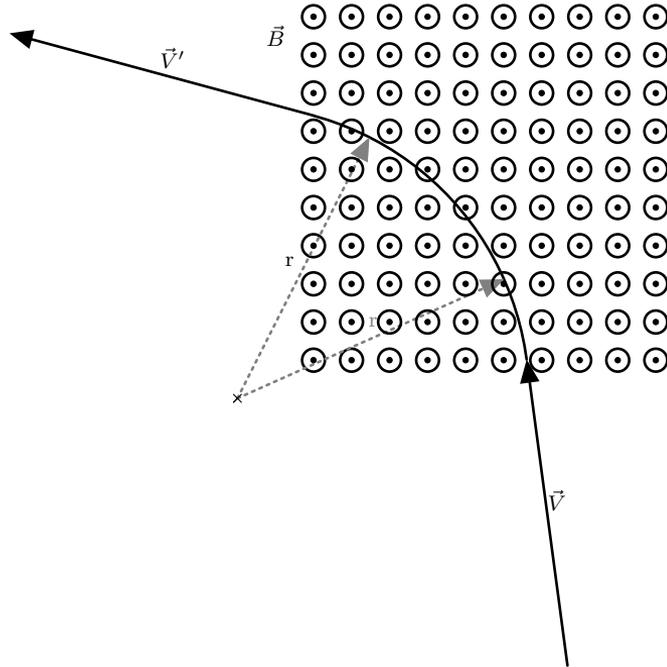


Figura 3.1: Desviación de una partícula cargada en un campo magnético. La rigidez magnética  $R$  es el producto  $rB$  (ecuación 3.1).

energía por unidad de carga.

La rigidez magnética establece límites inferiores para la relación velocidad/carga y el ingreso o escape de partículas de una región espacial, dependiendo de la extensión y el campo magnético. Esto se traduce en una restricción sobre la velocidad o la energía por unidad de carga, cuyos valores se ven condicionados por la rigidez magnética y las intensidades típicas de los campos magnéticos solar y galáctico. Un ejemplo concreto de esta correlación es la relación entre la cantidad total de partículas hasta una rigidez magnética de 10 GV, que está fuertemente influenciada por la intensidad de la actividad solar. Sin embargo, para rigideces mayores esa correlación se pierde [4].

### 3.2. Origen

La radiación cósmica incluye contribuciones tanto del sistema solar como de fuentes externas a éste. La actividad solar es una fuente importante de partículas de baja energía que llegan a la atmósfera terrestre. Sin embargo, los rayos cósmicos de energías superiores a 1 MeV están

dominados por fuentes externas al sistema solar. Los rayos cósmicos con energías muy altas, del orden de  $10^{19}$  eV, se originan fuera de la galaxia.

### 3.3. Espectro

El espectro diferencial de energía  $\frac{dN}{dE}$  contiene toda la información relacionada con el número de partículas, su composición energética y la dirección de llegada de los rayos cósmicos en la atmósfera superior. Esta distribución energética sigue una tendencia de ley de potencias en el intervalo ( $10^3, 10^{20}$ ) eV por partícula.

La representación del espectro se adapta a diversas formas, cada una apropiada para diferentes aplicaciones:

- Número de partículas por energía por nucleón (utilizada en la Tabla 3.1).
- Número de partículas por unidad de rigidez.
- Número de nucleones por unidad de energía por nucleón.

- Número de partículas por unidad de energía por partícula (fig 3.2), especialmente relevante en el análisis fenomenológico de las lluvias de partículas en la atmósfera, ya que su evolución se vincula con la energía total de la partícula precursora.

Las unidades de densidad espectral de energía toman la forma:

$$\left[ \frac{1}{m^2 \text{ l sr } \varepsilon} \right], \quad (3.2)$$

donde  $\varepsilon$  denota una de las cuatro unidades previamente definidas.

Por ejemplo, en el caso de nucleones por unidad de energía por nucleón ( $\varepsilon = \text{GeV/nucleon}$ ), la expresión es:

$$I_N = 1.8 \times 10^4 \left( \frac{E}{1 \text{ GeV}} \right)^{-\alpha} \frac{\text{nucleones}}{m^2 \text{ l sr GeV}}. \quad (3.3)$$

El índice  $\alpha$  es el índice espectral diferencial y presenta un valor aproximado de 2.7, con alteraciones en la pendiente a diferentes energías.

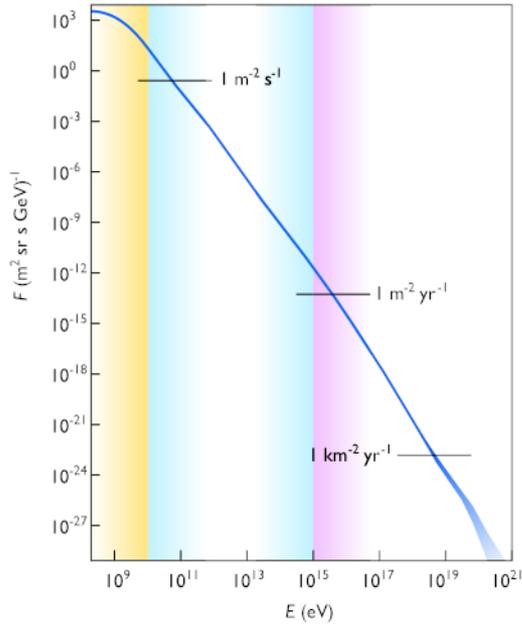


Figura 3.2: Espectro de rayos cósmicos: flujo de partículas por energía. Figura de Sven Lafebre, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1555202>, consultado el 2023-08-22

Energía	Índice espectral
$\sim 1 \text{ GeV} - \sim 3 \times 10^6 \text{ GeV}$	2.7
$\sim 3 \times 10^6 \text{ GeV} - \sim 10^{10} \text{ GeV}$	3
$\sim 10^{10} \text{ GeV} - \sim 10^{11} \text{ GeV}$	2.7

Tabla 3.2: Índice espectral de rayos cósmicos para varias energías [4]

Los puntos de cambio de pendiente (tabla 3.2) son conocidos como la rodilla ( $\sim 3 \times 10^6 \text{ GeV}$ ) y el tobillo ( $\sim 10^{10} \text{ GeV}$ ). Además, para energías mayores a  $\sim 10^{11} \text{ GeV}$ , se observa el efecto de supresión.

La expresión  $E \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{d \ln E}$  es equivalente a  $E \varphi'(\theta, \beta, E)$  en la terminología de física nuclear, representando la densidad espectral de energía, es decir, la energía total en el espectro de rayos cósmicos por unidad de energía de las partículas. Estas densidades, incluyendo  $E^\alpha \frac{dN}{dE}$ , son utilizadas para mejorar la visualización de la estructura del espectro.

### 3.4. Propagación de Rayos Cósmicos en la Atmósfera

Los rayos cósmicos interactúan con el material en la atmósfera, transfiriendo su energía a las partículas del medio. En el contexto del transporte de rayos cósmicos en la atmósfera, las partículas originales del espectro de rayos cósmicos se denominan primarias.

Cuando las partículas primarias poseen suficiente energía, el número de partículas propagadas aumenta debido a las interacciones. Mientras estas nuevas partículas, conocidas como secundarias, siguen teniendo la energía necesaria para inducir nuevas ionizaciones, el número de partículas sigue aumentando. Este proceso se conoce como cascada atmosférica. La distribución de partículas secundarias mantiene una forma de ley de potencias para energías elevadas, heredada de la distribución de energías de las partículas primarias.

El inicio de la cascada atmosférica ocurre debido a la interacción de los primarios con los núcleos y electrones de los elementos constituyentes de la atmósfera. La in-

teracción hadrónica da lugar a la producción de mesones, siendo los piones los más abundantes.

A medida que la energía del primario aumenta, la cascada de partículas secundarias se desarrolla con mayor intensidad. Cuando estas partículas secundarias son inestables, su decaimiento compite con la interacción con nuevas partículas de la atmósfera. En el caso de los piones, dos procesos fundamentales ocurren. Los piones cargados decaen en muones y los piones neutros decaen en fotones:

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad (3.4)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad (3.5)$$

$$\pi^0 \longrightarrow 2\gamma. \quad (3.6)$$

Los muones decaen en electrones, pero su tiempo de vida medio es del orden de  $10^3$  veces mayor que el de los piones cargados. Esto permite que los muones alcancen la superficie terrestre debido a la dilatación del tiempo relativista.

El espectro de energía de los muones a nivel del mar exhibe una forma característica de banda [3]. Para

energías bajas, los muones ya han decaído y no están presentes. Para energías altas, hay una cota impuesta por la energía máxima de los primarios.

Los electrones y fotones de alta energía que se suman a la colección de partículas secundarias atraviesan interacciones de frenado, creación de pares, ionización y excitación, generando una cascada electromagnética.

Las partículas secundarias surgen a través de tres tipos de cascada:

- **Cascada electromagnética:** Incluye los fotones, electrones y positrones generados a partir de ionizaciones y excitaciones electrónicas, decaimientos y producción de pares.
- **Cascada hadrónica:** Resulta de las interacciones hadrónicas de los primarios con los núcleos atmosféricos.
- **Cascada muónica:** Se origina a partir del decaimiento de los piones cargados.

### 3.4.1. Descripción de la Progresión de la Cascada

El progreso de la cascada se caracteriza de manera natural en términos de la *profundidad atmosférica*, que directamente mide la cantidad de materia atravesada por las partículas. Esta profundidad se define como la densidad superficial de materia perpendicular a la trayectoria recorrida:

$$X(h) = \int_{\infty}^h \rho(r) dr. \quad (3.7)$$

La profundidad atmosférica es nula para distancias lejanas a la superficie terrestre y aumenta hasta alcanzar un valor cercano a  $1000 \text{ g/cm}^2$  al nivel del mar, cuando la trayectoria seguida es vertical. Esta medida efectiva cuantifica no solo la distancia recorrida, sino la cantidad de materia que un primario cósmico ha atravesado. También se denomina *profundidad de interacción*.

El desarrollo de una cascada atmosférica alcanza su flujo máximo de partículas secundarias a profundidades del orden de  $100 \text{ g/cm}^2$ , lo cual equivale aproximadamente

al primer décimo de la profundidad total. Esta profundidad atmosférica corresponde a una altitud cercana a  $10^4$  m sobre el nivel del mar, una altura típica en los vuelos comerciales de larga distancia.

La profundidad atmosférica es un parámetro crítico en la comprensión de la propagación y evolución de las cascadas atmosféricas, proporcionando información crucial sobre la interacción de las partículas primarias y secundarias con la atmósfera terrestre.

### 3.4.2. Características del Espectro de Secundarios

Los secundarios de rayos cósmicos están caracterizados por su distribución diferencial de energía:

$$\varphi'(\theta, \beta, E, x, X, t), \quad (3.8)$$

donde  $x$  representa las coordenadas geográficas,  $X$  es la profundidad o altitud, y  $t$  es la fecha.

Estos factores explican la dependencia de  $\varphi'$  en cada parámetro:

- La distribución en energía está determinada por la energía de los primarios y los procesos de absorción y decaimiento a lo largo de la trayectoria.
- $\theta$  es el ángulo cenital. Partículas que arriban desde direcciones alejadas de la vertical provienen con mayor probabilidad de primarios que también inciden en direcciones inclinadas. Por lo tanto, han atravesado más materia atmosférica y su flujo de partículas secundarias es disminuido.
- $\beta$  es un ángulo acimutal. A energías bajas, puede observarse alguna anisotropía debido a la influencia del campo magnético terrestre.
- La posición en el planeta  $x$  y la fecha  $t$  determinan la intensidad del campo magnético terrestre y la intensidad del viento solar, afectando el flujo de partículas primarias.
- La profundidad atmosférica vertical determina el desarrollo de la cascada.

El espectro completo de secundarias en una región

y altitud puede caracterizarse a partir del conocimiento del desarrollo completo de cascadas en un punto cenital  $x$ . Se introduce una variable  $\xi$  que mide la posición horizontal relativa a  $x$ , y se define la distribución  $\tilde{\varphi}'(\theta, \beta, E, x, X, t, \xi)$ . Es la densidad de flujo de secundarias por unidad de área que arriban al punto  $x + \xi$  con energía  $E$  en una unidad de ángulo sólido, caracterizado por la dirección  $(\theta, \beta)$ , generados a profundidad  $X$  en fecha  $t$ .

La idea es emplear  $\tilde{\varphi}'$  para escribir la densidad de flujo de energía  $\varphi'$ , haciendo la convolución con el espectro de primarios (que se puede suponer uniforme en una zona cercana a  $x$ ):

$$\varphi'(\theta, \beta, E, x, X, t) = \int \tilde{\varphi}'(\theta, \beta, E, x - \xi, X, t, \xi) d\xi^2. \quad (3.9)$$

En condiciones muy generales se puede suponer que el desarrollo de cascadas descrito por  $\tilde{\varphi}'$  es independiente de la coordenada geográfica  $x$ . Por lo tanto,  $\varphi'$  es la integral de  $\tilde{\varphi}'$  en todo el espacio, para un  $x$  fijo.

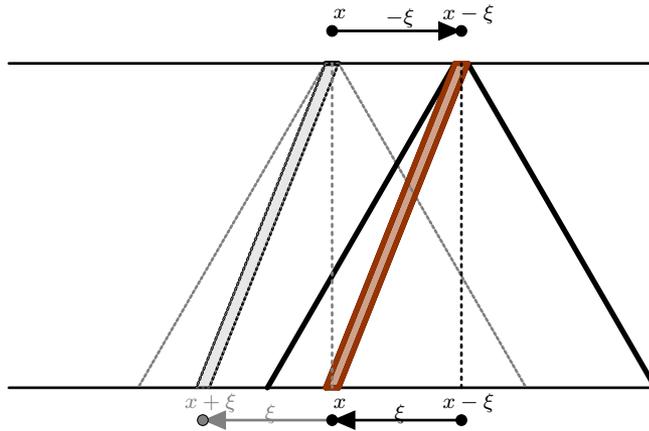
$$\varphi'(\theta, \beta, E, x, X, t) = \int \tilde{\varphi}'(\theta, \beta, E, x, X, t, \xi) d\xi^2. \quad (3.10)$$

El efecto neto es que la densidad de flujo diferencial a profundidad  $X$ , en la coordenada  $x$ , se obtiene de la suma de todos los secundarios provenientes del flujo de primarios por unidad de área en la misma coordenada.

La integral sobre todos los puntos de inyección posibles de primarios es reemplazada por la integral sobre todos los puntos de llegada posibles, para un único punto de inyección de primarios (figura 3.3).

En promedio los secundarios que se propagaron a puntos  $x + \xi$  lejanos a  $x$  son compensados por secundarios de cascadas vecinas en el punto  $x - \xi$ . Esta interpretación es útil para construir numéricamente el perfil de secundarios a una determinada profundidad, pues solo se debe reconstruir la evolución de partículas inyectadas en el cenit del lugar indicado y luego hacer la convolución. Un ejemplo de uso puede verse en [22].

Si la cascada de secundarios típica no tiene una extensión espacial mucho mayor a un grado ( $\sim 100$  km), no



es necesario tomar en cuenta la curvatura terrestre en el cálculo. Tampoco es necesario considerar cambios en el modelo de atmósfera utilizado, ni en el modelo magnético.

Figura 3.3: La contribución al espectro de secundarios en  $x$ , debido a cascadas generadas en  $x - \xi$  es igual a la contribución en  $x + \xi$  de cascadas generadas en  $x$ .



## Capítulo 4

# Estimación de la dosis en tripulación y pasajeros de aeronaves comerciales

El estudio del efecto de la radiación cósmica en la salud de la tripulación en vuelos comerciales ha ganado considerable interés desde la década de 1990. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda incluir a la tripulación en la categoría de Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) [7], tomando en cuenta varias consideraciones relevantes.

Las aeronaves comerciales vuelan a altitudes del orden

de los  $10^4$  metros sobre el nivel del mar, lo que corresponde aproximadamente a una profundidad atmosférica de  $10^2$  g/cm<sup>2</sup>, equivalente al 10 % de la masa atmosférica total. En estas altitudes, se alcanza el nivel máximo de producción de partículas secundarias debido a la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera, lo que resulta en una mayor exposición a la radiación ionizante. Cabe destacar que la presencia de neutrones es una diferencia

notable en comparación con las altitudes en las que habita el ser humano.

Existe una amplia gama de estudios que han investigado los riesgos para la salud asociados con la exposición a la radiación en la tripulación de aeronaves. Estudios generales evalúan los riesgos para la tripulación debido a su exposición prolongada a la radiación ionizante [8, 11, 12, 13, 9]. Además, se han considerado evaluaciones específicas para grupos particulares, como mujeres [10] o fetos [46]. En general, estos estudios han encontrado evidencia leve de que ciertos tipos de cáncer, como el de mama en mujeres y la leucemia en hombres, podrían ser más frecuentes en estos grupos en comparación con la población en general [11]. Por lo tanto, es esencial continuar investigando estos fenómenos y su posible impacto negativo en la salud de las personas.

Dado que la radiación cósmica en las altitudes de vuelo presenta una mayor cantidad de partículas con poder ionizante, es crucial analizar el efecto primario de esta radiación: la dosis absorbida por los tejidos biológicos. Esta dosis se convierte luego en dosis equivalente utilizando

criterios apropiados.

La caracterización precisa de la intensidad de la radiación a la que se encuentra expuesta la tripulación de aeronaves comerciales es un desafío complejo debido a la gran variabilidad de condiciones observadas en diferentes rutas y la extensa cobertura geográfica que abarcan estas rutas aéreas.

Entre los factores que contribuyen a esta variabilidad de condiciones se encuentran:

- **Altitud:** Los techos de vuelo pueden variar varios miles de metros, lo que resulta en cambios significativos en el valor del flujo de partículas ionizantes.
- **Latitud:** El campo magnético terrestre ofrece una mayor rigidez magnética de corte cerca del ecuador y disminuye hacia los polos. Por lo tanto, vuelos a diferentes latitudes pueden experimentar condiciones radicalmente diferentes, aun cuando sean similares en otras condiciones.
- **Variabilidad del Campo Magnético Terrestre:** Además de su estructura dipolar a gran escala, el

campo magnético terrestre presenta anomalías en ciertas zonas, como la anomalía del Atlántico Sur, donde la intensidad del campo magnético puede variar considerablemente.

- **Ciclo Solar:** La actividad solar, que se refleja en el número de manchas solares, afecta la llegada de los rayos cósmicos al sistema Tierra-atmósfera. El ciclo solar completo tiene un período promedio de 22 años, mientras que el cambio en la intensidad de las manchas solares ocurre con un período promedio de 11 años. La actividad solar está anticorrelacionada con la cantidad de rayos cósmicos que llegan a la atmósfera.
- **Tormentas Solares:** Estos eventos violentos expulsan partículas a alta velocidad que se suman a la radiación de fondo, incrementando la exposición a la radiación cósmica.

Dada esta complejidad y la dificultad de modelar con precisión la propagación de los rayos cósmicos en la atmósfera, se ha optado por desarrollar soluciones de si-

mulación para estimar la dosis absorbida en situaciones de vuelo comercial.

### 4.1. Radiación en Aeronaves en Simulación

Existen diversas herramientas de simulación desarrolladas específicamente para abordar el problema de la radiación en aeronaves, cada una con diferentes capacidades y enfoques.

Estas herramientas de simulación suelen estar altamente optimizadas para cálculos relacionados con la radiación en aeronaves, lo que las hace eficientes en términos de tiempo de cálculo y recursos computacionales requeridos. Sin embargo, a menudo tienen limitaciones en términos de su capacidad para adaptarse a diferentes escenarios. Por lo tanto, la precisión de sus estimaciones puede ser comprometida en situaciones que no están dentro de su diseño predefinido.

En paralelo, han surgido grandes iniciativas experimentales que han desarrollado herramientas de simulación de-

dicadas al transporte de radiación en diversos contextos.

**GEANT4** [20] es un conjunto de bibliotecas desarrollado en C++ que permite simular el transporte de radiación en la materia mediante el método de Monte Carlo. GEANT4 es conocido por su gran capacidad de parametrización y es respaldado por información experimental actualizada y verificada para un amplio rango de energías.

**OPENGATE** [47] es una implementación de modelos de física médica en GEANT4. Está optimizado para construir simulaciones de equipos médicos y tratar materiales equivalentes al tejido humano.

**CORSIKA** [19] es otra herramienta ampliamente utilizada, diseñada específicamente para estudiar la propagación de rayos cósmicos en la atmósfera. Aunque su enfoque es específico, CORSIKA permite configurar los parámetros más relevantes, como latitud, altitud de inyección, profundidad atmosférica, campo magnético, modelo atmosférico, lista de partículas primarias y tipo de detector.

**MAGNETOSCOSMIC** [48] es una aplicación construida sobre GEANT4 que simula la propagación de rayos cósmicos en la magnetósfera terrestre. Esto permite cal-

cular rigideces de corte de rayos cósmicos y direcciones asintóticas de arribo para diferentes lugares y fechas de observación.

Estas herramientas de simulación computacional ofrecen varias ventajas concretas. Son desarrolladas y mantenidas por comunidades grandes, lo que asegura que estén actualizadas y funcionales. Además, son de código abierto, lo que facilita su auditoría y desarrollo continuo. Han sido validadas mediante la simulación de detectores y experimentos, lo que garantiza la calidad de sus resultados.

Sin embargo, estas herramientas también presentan ciertas desventajas al considerar su uso en contextos más allá de sus aplicaciones originales. La curva de aprendizaje tiende a ser bastante gradual debido a la complejidad de estas herramientas. Además, el desarrollo de prototipos nuevos puede ser laborioso, ya que los ejemplos y tutoriales disponibles generalmente se centran en la comunidad científica para la que fueron desarrolladas. La alta precisión de los resultados conlleva una mayor demanda de recursos computacionales en comparación con los sistemas tradicionales.

La especificidad de este tipo de software y la necesidad de herramientas avanzadas para su uso hacen que la instalación de estas herramientas sea una tarea complicada para el usuario promedio. Generalmente, no existen instaladores automáticos y se requiere una serie de pasos complejos antes de lograr una instalación funcional. Además, estas herramientas suelen estar diseñadas para sistemas operativos específicos, lo que limita su disponibilidad en diferentes plataformas.

Por estas razones, es crucial el desarrollo de Ejemplos Funcionales Reproducibles (EFR) basados en estas herramientas de alta precisión. Estos EFR deben funcionar *out of the box*, permitiendo a cualquier usuario ejecutarlos sin necesidad de ser expertos en el sistema operativo subyacente. Estos ejemplos deben estar parametrizados por defecto con ejemplos mínimos para ejecutarse en *hardware* de uso personal, pero también deben tener la flexibilidad de escalar a proyectos de mayor alcance. La documentación asociada a estos EFR debe ser detallada y abundante, con el objetivo de servir como una fuente de aprendizaje y banco de pruebas para la comunidad interesada.

### 4.2. Un Modelo Portable

La estimación de la dosis absorbida por la tripulación y los pasajeros en altitudes elevadas se puede llevar a cabo mediante la concatenación de simulaciones que involucran la atmósfera, la aeronave y los individuos expuestos.

Algunas herramientas clásicas que siguen una versión simplificada de esta estrategia han sido compiladas en [14]. Allí se encuentra una comparación del rendimiento general de estos sistemas.

Existen diseños más avanzados que también siguen esta estrategia de concatenación en problemas muy específicos. Por ejemplo, ARTI [22] es un marco de trabajo que permite simular la señal recibida en un Detector Cherenkov de Agua (WCD) en cualquier ubicación del planeta y en cualquier fecha.

El proceso de ARTI sigue una secuencia en la que se preparan los datos de entrada para la simulación. Luego, se propagan los rayos cósmicos en la atmósfera hasta el lugar de interés utilizando CORSIKA. En la etapa siguiente, MAGNETOSCOSMIC se utiliza para corregir el flujo de partículas secundarias, eliminando aquellas que provie-

nen de partículas rechazadas debido al valor del campo magnético en la fecha del evento de interés. Finalmente, se inyecta el conjunto de partículas secundarias en la simulación del WCD modelado en GEANT4. La simulación muestra los histogramas de carga que se obtendrían en el WCD bajo las condiciones seleccionadas. Se proporciona una explicación detallada de estas etapas y los scripts intermedios que conectan la salida de cada etapa con la entrada de la siguiente en [22].

El uso de CORSIKA para caracterizar el flujo de partículas secundarias en una ubicación geográfica específica se probó en [24].

Más recientemente, el *framework* ACORDE [23] integra toda la línea de producción para simular la dosis absorbida en phantoms antropomórficos en vuelos comerciales.

ACORDE se basa en el desarrollo de ARTI pero también considera la ruta de vuelo, la geometría y la composición de las aeronaves.

Herramientas como ACORDE representan el estado del arte y permiten obtener resultados muy precisos. Sin embargo, aún están fuera del alcance inmediato del usuario

que no dispone de acceso a computación de alto rendimiento. En este contexto se justifica el desarrollo de Ejemplos Funcionales Reproducibles (EFR) con una línea de montaje reducida en comparación con proyectos más ambiciosos, que puedan ser probados desde la perspectiva de un modelo de pruebas, pero que cuenten con capacidad de escalamiento.

### 4.2.1. 5 características generales de un EFR

En el caso ideal sigue la secuencia:

- Selección de las condiciones del vuelo y la toma de la muestra.
- Preparación del espectro de secundarios.
- Filtrado y selección de eventos relevantes en la aeronave.
- Propagación de partículas en la aeronave.
- Estimación de dosis en el phantom.

### Condiciones del vuelo

Las condiciones del vuelo toman en cuenta la geografía del vuelo, el modelo de la aeronave, la selección del tipo phantom y su ubicación en la aeronave.

### Preparación del espectro de secundarios

El espectro de partículas secundarias puede provenir de una muestra simulada en CORSIKA, similar a lo utilizado en ARTI o ACORDE. Sin embargo, también puede generarse a partir de información disponible en una distribución diferencial de energía medida experimentalmente, o a través de simulaciones o modelos empíricos fenomenológicos.

Para lograr un modelo portable que cumpla con las características de un EFR, debemos considerar que la simulación de la propagación en la atmósfera siempre será exigente en términos de cómputo. Por esta razón, no es conveniente incluir esta parte en el ejemplo. Además, se necesita contar con módulos que generen eventos a partir de la información inicial. Una solución sencilla es acoplar esta parte del modelo a una salida generada por CORSI-

KA.

La muestra de partículas secundarias, que típicamente estará referida a un área y un tiempo de exposición particulares, debe adaptarse para cumplir con la fluencia por unidad de área para la geometría seleccionada. En caso de disponer de una expresión para la distribución diferencial de energía, se debe generar una muestra adaptada a la fluencia por unidad de área de la geometría seleccionada.

### Filtrado y selección de eventos relevantes

Los datos de partículas secundarias de rayos cósmicos deben prepararse para ingresar a la geometría de la aeronave. A partir de la muestra general y la geometría de la aeronave es conveniente generar un subconjunto de eventos que realmente llegan al volumen de interés. Este paso tiene como objetivo optimizar el tiempo de cálculo de la propagación de la radiación. Además de seleccionar las partículas con mayor probabilidad de generar eventos en el phantom, se debe permitir ajustar la afluencia para considerar una cantidad reducida de partículas y evaluar prototipos en *hardware* de capacidad limitada.

## Propagación de partículas en la aeronave

La siguiente etapa se dedica a simular la propagación de las partículas secundarias en la aeronave y la distribución de energía depositada en el phantom proporcionado. Esta es la etapa más exigente en términos computacionales del proceso.

## Estimación de dosis en el phantom

Finalmente, se calculan las predicciones de dosis, dosis ambiental, dosis equivalente y errores estadísticos, y se generan visualizaciones de las distribuciones.

El programa a seguir consiste en configurar algunos EFR que aborden casos de interés.

## 4.3. Hacia un EFR completo: gRAMA-kit

La integración de todo el proceso en este kit de pruebas ha sido empaquetada bajo el nombre de gRAMA-kit, que es un acrónimo para *(g)uerrilla (R)adiation (A)bsorption*

*(M)odeling for (A)ircraft.*

El término *guerrilla* se ha utilizado aquí como un sinónimo de la aplicación de métodos no convencionales pero accesibles para lograr un objetivo más sofisticado. En este caso, se enfatiza el carácter adaptativo del modelo, que debe ser probado incluso en condiciones de recursos limitados.

Dentro del kit gRAMA, se esperan encontrar las siguientes etapas y una guía para cumplirlas:

- Preparación de la aeronave y el phantom: La geometría de la aeronave, la composición y la configuración del phantom son determinantes para la construcción del modelo. Los archivos de configuración para la simulación y preparación de la muestra deben estar indicados y comentados de forma clara. Es menester contar con ejemplos completos en caso de que se desee probar el código antes de introducir las modificaciones o los nuevos modelos.
- Preparación de la muestra bruta: Es necesario que existan dos opciones disponibles. Es posible que se

cuenta con un archivo que contenga una muestra de partículas que representan la afluencia para las condiciones de área y tiempo de exposición del caso de interés. La otra posibilidad es que la muestra deba generarse a partir de una distribución diferencial de flujo de energía o un histograma. En esta etapa se decide la magnitud del flujo deseado y se selecciona la muestra final por unidad de área. El modelo debe contar con histogramas de prueba, que permitan probar el código antes de hacer modificaciones o cambios.

- Preparación de la muestra filtrada: Se genera una réplica del volumen externo de la aeronave y se crea una muestra de partículas que tienen la mayor probabilidad de colisionar con dicho volumen. Esta etapa tiene como objetivo optimizar el tiempo de cómputo de propagación de radiación, mediante una selección previa de aquellas partículas que serán de verdadero interés.
- Preparación de la simulación en GEANT4: Se prepara el archivo con la lista de partículas y sus condicio-

nes de inicio para la simulación.

- Primera simulación: En esta etapa se propaga la muestra filtrada a través de la aeronave. A partir de este proceso se seleccionan las partículas que llegan al phantom. Estas partículas conformarán la segunda muestra para definir la dosis ambiental.
- Preparación de un haz alineado y expandido para inyectarse en una esfera ICRU de tejido equivalente, a partir del conjunto de partículas obtenido en la primera simulación.
- Segunda simulación: En esta fase, se inyecta la segunda muestra en un ambiente utilizando GEANT4, en el que se ha definido la esfera ICRU. Este segundo ambiente está configurado para recolectar la energía depositada y la dosis equivalente en el volumen de la esfera.
- Visualización: Se muestran cortes con la energía absorbida distribución de dosis y dosis ambiental obtenida.

Este programa ha sido desarrollado mediante la combinación de scripts en Python y Bash, los cuales manipulan las muestras de datos y preparan los archivos de entrada de partículas utilizando plantillas diseñadas para GEANT4. Además, se proporcionan algunos modelos de aeronaves. El enfoque adoptado es modular y adaptable.

En el siguiente capítulo se describen las partes en detalle y se discuten algunos resultados obtenidos.

# Capítulo 5

## Resultados y discusión

### 5.1. Proceso

El desarrollo de estos EFR ha pasado por varias etapas durante las que se ha probado cada parte del concepto.

Inicialmente se probó la capacidad de simular la propagación de rayos cósmicos en la atmósfera usando CORSIKA. Estas pruebas generales permitieron la dirección de un trabajo de grado [24] en el que se estudiaban las propiedades generales del espectro de rayos cósmicos secundarios en la atmósfera, a partir de simulaciones.

En paralelo a este trabajo, en [25] se realizó una repro-

ducción simplificada de la metodología usada en [21] para reproducir el espectro de interés en un vuelo, tomando en cuenta las variables características: altitud, duración, ruta, fecha, etc.

Estos trabajos nos permiten entender el proceso de generación de muestras de partículas secundarias necesarias para estudiar una ruta particular. También definen los formatos de archivo que usaremos en el resto del análisis.

Haciendo uso de OPENGATE [47], se propuso un primer ejemplo reproducible con el propósito de obtener la dosis ambiental equivalente debido a neutrones en una

altitud de vuelo. Este ejemplo dio lugar a un Trabajo Especial de Grado [26].

Para construir el EFR, se utilizó una máquina virtual (VM) distribuida por la colaboración OPENGATE, específicamente la versión vGATE8.0. Una vez descargada la VM, se clonó el repositorio del EFR [49].

Una vez clonado el repositorio, se hacía posible probarlo con un ejemplo en el que se simula la propagación de 3700 neutrones de 10 keV, en un objeto compuesto por una esfera hecha de tejido equivalente a pulmón, con una estructura cilíndrica interna equivalente a agua.

En el repositorio, también se encuentran archivos para simular la dosis ambiental equivalente para muestras de partículas generadas a partir de histogramas simulados, correspondientes a condiciones de vuelo para diferentes rutas aéreas [21].

La dosis ambiental equivalente se simuló generando muestras de partículas y alineándolas en una geometría de haz expandido sobre una esfera ICRU (figura 5.1 y tabla 5.1) y de material equivalente al pecho o a piel, de acuerdo al procedimiento indicado en [14] para medir la

Radio	15 cm
Densidad	$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Oxígeno	76.2 %
Carbono	11.1 %
Hidrógeno	10.1 %
Nitrógeno	2.6 %

Tabla 5.1: Composición esfera ICRU [50]

dosis ambiental equivalente sintética.

Para incorporar el posible efecto de la estructura del avión, se considera la posibilidad de agregar una lámina de material antes de inyectar las partículas en la esfera. Los materiales empleados fueron aluminio y GLARE.

En un ejemplo posterior se consideró la construcción de un modelo simplificado de una aeronave en GEANT4 [27]. En el interior del avión se colocó un phantom con el propósito de simular la dosis absorbida en condiciones de vuelo.

Se fabricaron versiones de la aeronave utilizando alu-

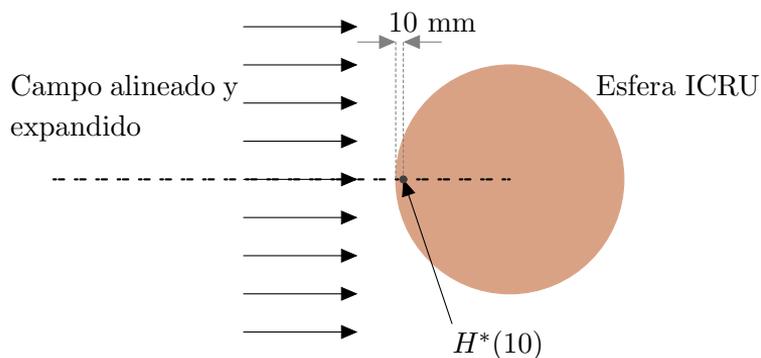


Figura 5.1: La dosis ambiental equivalente,  $H^*(10)$ , en un punto en un campo de radiación, es la dosis equivalente que sería producida por el campo correspondiente alineado y expandido en la esfera ICRU (tabla 5.1) a una profundidad de 10 mm sobre el vector radial opuesto a la dirección del campo alineado [50]

minio y GLARE.

Para construir el ejemplo se generaron muestras de partículas incidentes distribuidas en todo el fuselaje del modelo de la aeronave. Este proyecto se desarrolló como un trabajo de grado, produciendo otro EFR [51].

En el ejemplo se utilizan las partículas seleccionadas para calcular la dosis depositada en el phantom al alinearlas verticalmente sobre la posición del phantom.

Para garantizar la reproducibilidad de este ejemplo se proporcionó una VM preparada con el sistema operativo Linux Mint 20.04 y una instalación de GEANT4 <http://fisica.ciens.ucv.ve/jlopez/download/geantGauss01.ova>

El propósito de esta actualización es integrar toda la línea de producción en el EFR, de manera que sea posible desarrollar la geometría de la aeronave, generar o inyectar partículas en el algoritmo de selección, propagarlas en el fuselaje y simular la dosis ambiental equivalente en el phantom.

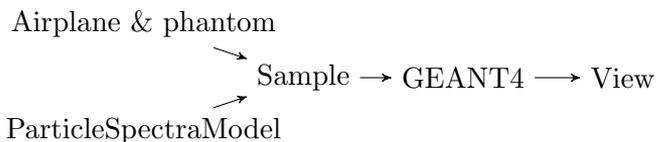


Figura 5.2: Piezas iniciales y secuencia de pasos en gRAMA-kit [1].

## 5.2. gRAMA-kit en 2 piezas iniciales y 3 pasos de procesamiento

El resultado obtenido en gRAMA-kit es un ejemplo donde se realiza una estimación rápida de la dosis media equivalente en una aeronave de geometría sencilla y optimizando el uso de recursos de cálculo [1]. El repositorio tiene 2 piezas que definen los parámetros generales del sistema y 3 pasos que deben completarse de forma secuencial (fig 5.2).

### 5.2.1. Las 2 piezas iniciales

#### Modelo de aeronave

- En este bloque se almacenan modelos de aeronave esférica o cilíndrica con un phantom en su interior.
- Su función es servir de referencia en caso que se requiera modificar la geometría.

Si bien es razonable suponer que un mejor modelo de aeronave arrojará mejores resultados, la evidencia muestra que los modelos sencillos dan buenas predicciones del ambiente interior de la aeronaves y modelos de geometría más sofisticada no mejoran sustancialmente la calidad de los resultados. Ver las estimaciones de dosis equivalente en la tabla 5.2 y la discusión posterior.

Por otro lado, la composición de las paredes de la aeronave sí tiene interés por la interacción de diferentes materiales con las partículas ionizantes. Por ejemplo, es menester considerar la interacción de algunos compuestos con los neutrones.

En los ejemplos de [1] se incluye una aeronave con paredes de aluminio y otra con paredes de GLARE. En [26] y [27] se discute ampliamente la composición del GLARE y se muestra la construcción de los modelos de aeronave para GEANT4.

### Espectro

- En esta sección se almacenan espectros de energía para varias especies de partículas.
- Los espectros esperados están normalizados para un detector volumétrico de  $1 \text{ m}^2$  durante un tiempo de 1 h.
- Hay ejemplos para alta y baja tasa de dosis.

La información sobre el espectro de secundarios característico de la ruta aérea es obviamente un protagonista fundamental en la calidad de los resultados.

Los espectros deben contener información ponderada que refleje las propiedades de cada tramo de la ruta. Uno de los retos es obtener información de todo el espectro. No solo de algunas regiones de energía.

El desarrollo actual de paquetes para estudiar la propagación de rayos cósmicos en la atmósfera permite parametrizar de forma exhaustiva las propiedades del sistema de interés y son una alternativa para acceder a información de espectros de calidad. Es lo que se hace en [22] y [23]

usando CORSIKA. La aplicación de esta metodología escapa de las posibilidades actuales y futuras de gRAMA, por lo que otras alternativas deberán ser consideradas.

Si bien los espectros incluidos en [1] procuran conservar semejanzas con propiedades de casos reales, tienen un propósito práctico: permitir al usuario hacer pruebas del funcionamiento del código antes de incluir los casos de interés.

### 5.2.2. Los 3 pasos de procesamiento

**Preparación de la muestra** Contamos con información que nos permite conocer la densidad de flujo diferencial de diferentes partículas en la aeronave. Esta información puede presentarse como una muestra de partículas con sus propiedades cinemáticas o como un espectro de energía. El objetivo de esta etapa es generar una muestra óptima de partículas que interactúen efectivamente con la aeronave. Para lograrlo es necesario integrar la densidad de flujo diferencial sobre la superficie del volumen. Sin embargo, este proceso es computacionalmente complejo, especialmente cuando se debe tratar con geometrías de

aeronaves de manera generalizada.

Una forma de garantizar la correcta medición del flujo de partículas es introducir una superficie de referencia en la cual podamos asegurar una correspondencia uno a uno entre los flujos de partículas en ella y en la aeronave (fig 5.3) [22].

Para establecer la relación biunívoca entre las partículas que interactúan en la aeronave y las que se escogen en el plano de referencia, basta notar la equivalencia entre el flujo de partículas que atraviesan un plano y llegan a un punto  $p$  a mayor profundidad y las partículas que llegan a un volumen infinitesimal en el mismo punto  $p$  (figura 5.4). Este razonamiento supone que la densidad diferencial de flujo es la misma en todos los puntos del plano de referencia y en el punto  $p$ .

Es razonable suponer que la densidad diferencial de flujo ( $\varphi'$ ) en un volumen infinitesimal corresponde a la integral de la densidad diferencial de flujo planar ( $\varphi'_p$ ) correspondiente en un plano ubicado sobre el punto de interés (ver Figura 5.4) y la identidad 5.1.

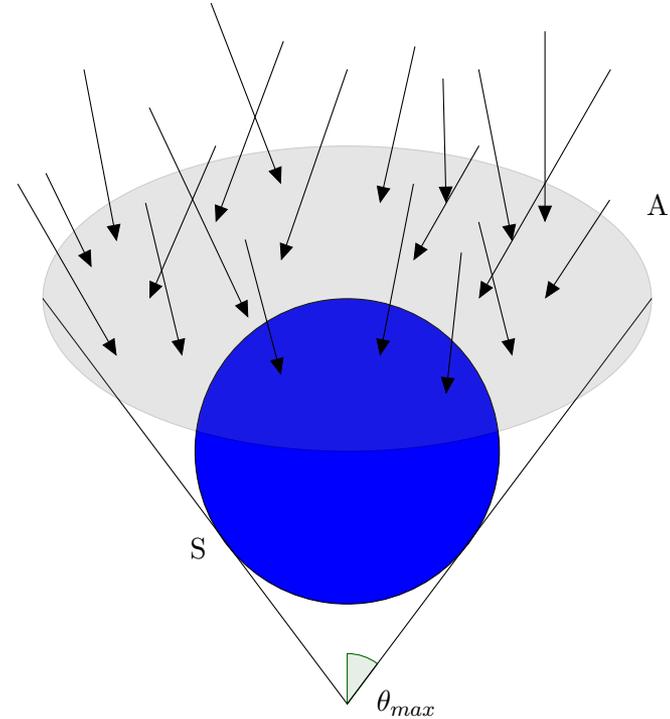


Figura 5.3: Cada partícula que interactúa en la aeronave puede ser contabilizada en una superficie de referencia a una cota constante. Las dimensiones de esta superficie de referencia deben fijarse de forma que se garantice la contabilidad de todas las partículas.

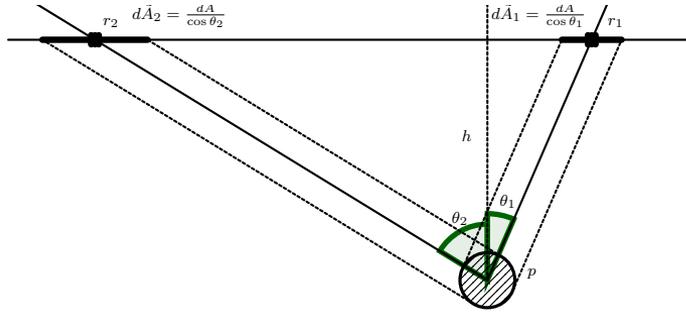


Figura 5.4: Relación entre el flujo planar y volumétrico. A medida que el ángulo de arribo de las partículas en  $p$  aumenta ( $\theta_2$ ), el flujo en el plano de referencia atraviesa un área mayor.

Puesto que el área transversal al volumen en  $p$  es infinitesimal, se puede justificar la siguiente identidad,

$$\varphi'(\theta, \beta, E)dA = \varphi'_p(\theta, \beta, E, r(h, \theta), \varphi(\beta))d\tilde{A}, \quad (5.1)$$

donde:

- $dA$  es el elemento infinitesimal de área perpendicular a la dirección de arribo de las partículas.
- $d\tilde{A}$  es el elemento de área correspondiente en el plano de referencia.
- $r(h, \theta) = h \tan \theta$  es la distancia al punto  $\theta = 0$  en el plano de referencia.
- $\varphi(\beta) = \beta$ .

Esta expresión establece una relación uno a uno entre las partículas detectadas en la esfera infinitesimal y las que han cruzado el plano de referencia bajo las restricciones indicadas en sus direcciones.

Si eliminamos el factor  $dA$  de ambos lados de la igualdad, obtenemos la siguiente relación:

$$\varphi'_p(\theta(r, h), \beta(\varphi), E, r, \varphi) = \varphi'(\theta, \beta, E) \cos \theta. \quad (5.2)$$

La relación 5.2 confirma que podemos sustituir la densidad de flujo diferencial en el punto  $p$  por una densidad de flujo equivalente sobre el plano de referencia.

El proceso numérico de selección de la muestra se plantea en orden inverso. Implica generar un conjunto de eventos en el plano de referencia y verificar si la propagación de estas partículas intersecta el volumen de interés. Cuando se escogen solo aquellas partículas que lleguen al volumen para ser incluidas en la simulación no solo se garantiza la equivalencia biunívoca entre los secundarios sobre la aeronave y el plano de referencia, también se optimiza el tiempo de cálculo.

Este razonamiento se explica en la figura 5.5. Allí queda en evidencia que puntos del plano de referencia más alejados del volumen de interés también albergan menos rayos relevantes.

Mediante una serie de scripts en Python se genera una representación del volumen de interés y revisan todas las direcciones posibles desde todas las posiciones de referencia posibles, comprobando si hay interacción con el volumen de interés. De esta manera se produce una plantilla de condiciones iniciales de rayos que intersectan el volumen de interés.

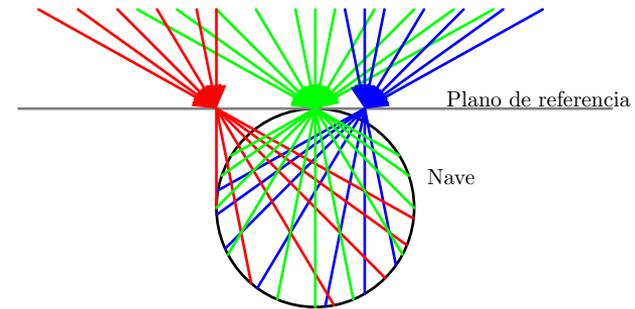


Figura 5.5: Dependiendo de la posición sobre el plano de referencia solo una parte de la muestra de secundarios arriba a la aeronave de forma efectiva. El abanico verde es más grande que el azul y éste es más grande que el rojo.

Usando la información proveniente del espectro de secundarios, es posible generar eventos en el plano de referencia acorde a la magnitud de la densidad de flujo diferencial. Sin embargo, es conveniente reescalar el tamaño de la muestra para controlar el tiempo de cómputo según las necesidades. Esto se logra permitiendo un submuestreo.

Una vez conocidas las direcciones que intersectan el volumen de interés se seleccionan las partículas de la muestra teniendo en cuenta el número de partículas deseada.

Otro script en Python se encarga de generar las partículas para la simulación o seleccionarlas de una muestra de referencia, eligiendo aquellas que están en las direcciones permitidas.

La información de estas partículas se guarda en un archivo para su posterior incorporación en la simulación.

Es importante evaluar el impacto que tiene la preselección de direcciones en la optimización de la simulación posterior. En un caso como el sugerido en la figura 5.5, donde se toma un plano de referencia tangente a un volumen esférico y la máxima desviación de las partículas

incidentes con respecto a la vertical llega a  $\pi/3$  radianes, la relación entre eventos relevantes vs eventos totales en el plano de referencia está en el orden de  $10^{-2}$  [1].

Por último se preparan los archivos necesarios para automatizar la simulación en GEANT4. En este paso se evalúa el número de eventos que tendrá la simulación. En caso de ser conveniente es posible reducir nuevamente la muestra de partículas para adaptarla al entorno de hardware disponible.

**Preparación de la simulación** Para realizar la simulación en GEANT4 se compilan todas las partículas y se las organiza separando cada tipo de partícula en rangos de energía. Cada grupo es tratado por separado. Se parametriza una simulación donde las partículas correspondientes a un mismo tipo y energía se hacen incidir de forma alineada en una dirección única. De esta forma se obtiene rápidamente la energía total depositada, sacrificando la información de la distribución de dosis en el volumen. Ver figura 5.6.

Finalmente se hace seguimiento de la energía deposita-

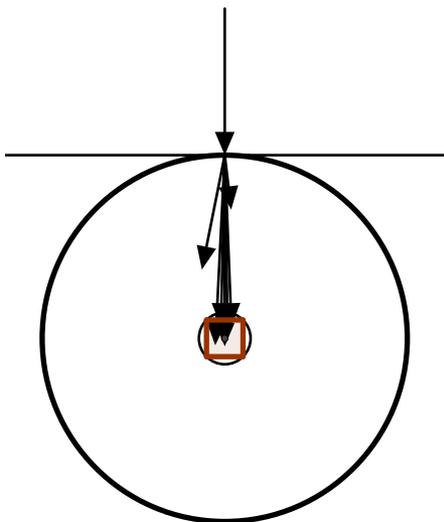


Figura 5.6: Para obtener la energía total depositada en el phantom y la dosis media, basta con contabilizar la energía depositada por rayos que inciden en una dirección única. La exactitud de este procedimiento está limitada por la calidad de la selección de partículas que se hace al seleccionar la muestra.

da en el phantom para cada grupo. Esta separación permitirá calcular la dosis equivalente, incluyendo los pesos  $w_r$  según el tipo de partícula y la energía (tabla 2.1 y ecuación 2.6).

Un script en Bash prepara los archivos de cada simulación en GEANT4, compila, envía las simulaciones y organiza los resultados de energía depositada en el phantom.

**Visualización** La tercera etapa consiste en la visualización. En esta parte se generan representaciones gráficas de la energía depositada en el phantom (figs 5.7 y 5.8). Además, se calcula la dosis promedio y dosis equivalente promedio y se estiman las incertidumbres.

Puesto que el método escogido privilegia la obtención de la energía total depositada y no la generación de una distribución de dosis realista, la dosis equivalente es la cantidad a reportar más relevante en esta etapa del proyecto. Para calcular la predicción se contabiliza la energía total depositada, se pondera la contribución de cada grupo de partícula y rango de energías, usando los factores  $w_r$  correspondientes, y se divide por la masa total de phan-

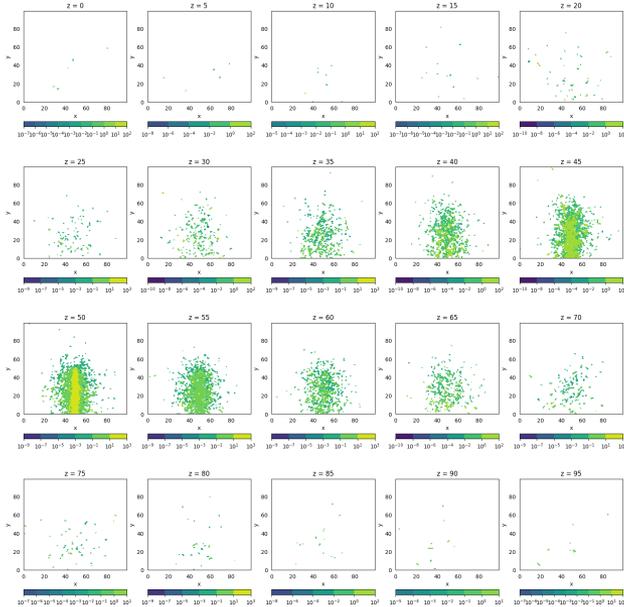


Figura 5.7: Representación típica de cortes de energía depositada en un phantom paralelos al eje del haz.

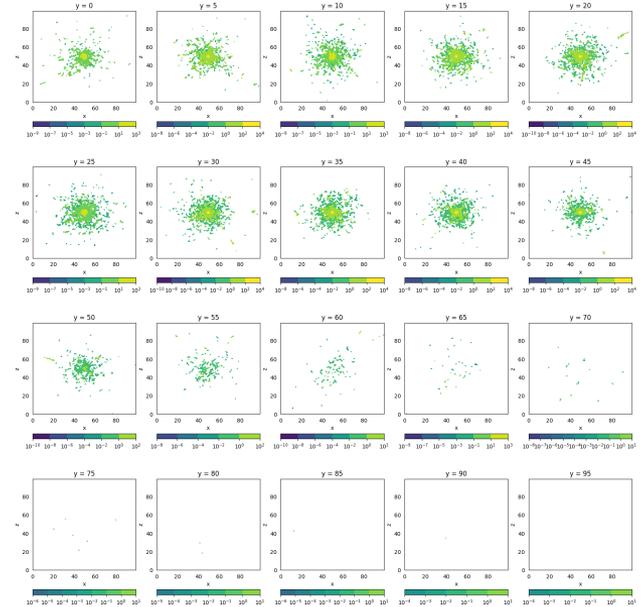


Figura 5.8: Representación típica de cortes de energía depositada en un phantom perpendiculares al eje del haz

tom.

Para estimar las incertidumbres se supone que la dosis debida a un tipo de partícula a determinada energía es proporcional al número de partículas ( $N_{s,E}$  = número de partículas de la especie  $s$  y energía  $E$ ). Luego se estima la desviación estándar relativa suponiendo que el número de partículas en cada grupo sigue una distribución de Poisson con  $\lambda = N_{s,E}$ .

Sea  $D_{s,E}$  la dosis media depositada por las partículas de la especie  $s$  y energía  $E$ , entonces la desviación será,

$$\Delta D_{s,E} = \frac{D_{s,E}}{\sqrt{N_{s,E}}}. \quad (5.3)$$

La desviación para la dosis media total ( $D$ ),

$$\Delta D = \sum_{s,E} \Delta D_{s,E}. \quad (5.4)$$

Como hemos indicado, en el repositorio [1] se incluyen dos espectros de ejemplo que corresponden a rutas de alta y baja tasa de dosis. Usando una submuestra de  $10^{-5}$  obtenemos los resultados de la tabla 5.2.

	$\dot{D}$ ( $\mu\text{Gy h}^{-1}$ )	$\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	$\dot{D}_n$ ( $\mu\text{Gy h}^{-1}$ )	$\dot{H}_n$ ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )
Alta tasa	$1.09 \pm 0.17$	$2.03 \pm 0.33$	$0.272 \pm 0.034$	$0.832 \pm 0.098$
Baja tasa	$0.52 \pm 0.11$	$0.77 \pm 0.19$	$0.057 \pm 0.013$	$0.176 \pm 0.038$

Tabla 5.2: Predicciones de dosis media total y equivalente y restringida a neutrones para rutas típicas de alta y baja tasa de dosis.

Estos resultados son interesantes, pues se encuentran en el orden de magnitud de estudios que han monitoreado dosis en vuelos reales. Ver por ejemplo [52].

Otro aspecto interesante es que esta metodología permite discriminar la dosis en entornos de alta y baja tasa con más de 3 sigmas de separación. Esto mejora en gran medida el desempeño del modelo empleado en [26] para estimar dosis equivalente debida a neutrones, que requería de procesamientos mucho más extensos.

Por otro lado, existen mejoras que deben ser consideradas en el futuro. La separación de las partículas en grupos por tipo y energía simplifica el cálculo rápido de la dosis equivalente. Además abre el camino a una forma sencilla de distribuir las tareas de cómputo entre varios recursos.

La idea consiste en enviar cada grupo de partículas como una tarea a un procesador independiente. Sin embargo, no se ha considerado una discriminación más fina en los rangos de energía. En este momento se toman 10 valores de energía discreta como representantes de todo el espectro para cada tipo de partícula.

Contar con un número mayor de clases debe mejorar la exactitud de los resultados. En particular, puesto que su  $w_r$  depende de la energía, la elección de los rangos de energía de los neutrones influye en la predicción de dosis equivalente. En este caso particular debe evaluarse la conveniencia de introducir una definición de muestras de energía que tome en cuenta la forma de la función 2.6.

Otro aspecto sistemático que se debe revisar se anticipa en la figura 5.6. Este en particular plantea nuevos objetivos dentro de el proyecto de estimación de riesgo radiobiológico en aeronaves. En el estado actual la muestra de partículas se hace incidir en el sistema aeronave + aire + phantom. Si bien la mayor parte de los secundarios de alta energía depositan su dosis en el phantom, hay partículas que son dispersadas. Es necesario mejorar

la estimación del espectro que incide efectivamente en el phantom. Esto también es de relevancia para considerar el efecto la producción de secundarios en el interior del modelo de aeronave.

En este sentido, si bien el modelo esférico parece reunir las propiedades esenciales para producir resultados de calidad, es conveniente incluir otras propiedades de la aeronave en estudio y, sin necesidad de cambiar la geometría básica, agregar las modificaciones necesarias en el modelo esférico, para considerar la composición típica con mayor exactitud. Una característica concreta que aparece inmediatamente en consideración es la de los compartimientos superiores de equipaje de mano, pero también puede tomarse en cuenta el material de los asientos o la materia de otros pasajeros.

Otra línea que puede ser desarrollada es el estudio de distribuciones de dosis. Ello implica desarrollar un *framework* de GEANT4 más ambicioso en la segunda etapa de procesamiento. Los objetivos serían desarrollar simulaciones siguiendo trayectorias más realistas de las partículas, pero también incluir phantoms antropomórfi-

cos [53, 54, 55].

De esta forma será posible interrogar al sistema sobre efectos a largo plazo y sobre órganos particulares (figura 5.9). De importancia cuando se desea realizar estimaciones sobre los efectos específicos en la población [8, 46, 11, 12, 9, 13].

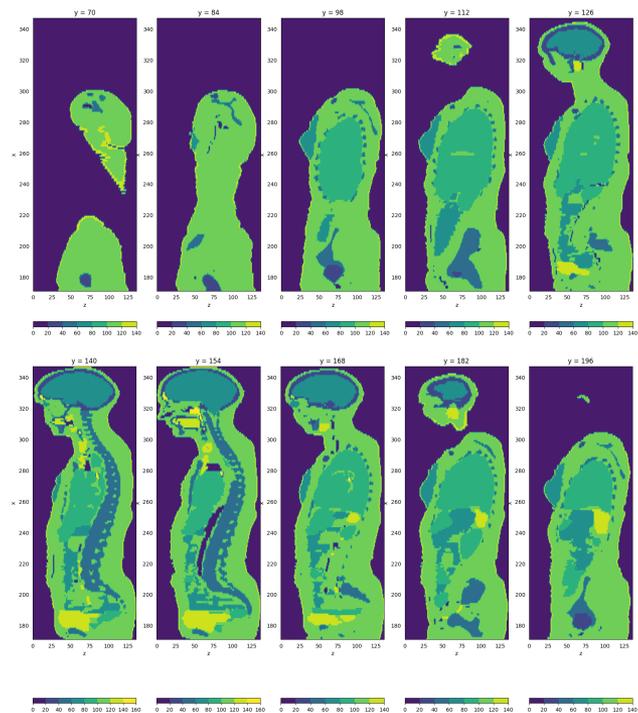


Figura 5.9: Detalle de algunos cortes en dirección sagital del modelo antropomórfico femenino definido en [53]. La escala de color indica que cada voxel tiene asignada la propiedad de un tipo de tejido. Datos disponibles en los anexos al mismo reporte [https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB\\_39\\_2](https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB_39_2) y en <https://geant4-data.web.cern.ch/datasets/examples/advanced/ICRP110Phantoms/ICRPdata.tar.gz>.

# Capítulo 6

## Conclusiones

- Se desarrolló gRAMA-kit [1], un Ejemplo Funcional Reproducible (EFR) que permite hacer estimaciones de dosis promedio y dosis promedio equivalente en ambientes dentro de aeronaves comerciales. Este trabajo resume gran parte del estado del arte en un proyecto que ha producido 4 proyectos de grado completados [24, 25, 26, 27].
- Este EFR cumple con varias propiedades deseadas:
  - Cuenta con un repositorio público y documentación completa.
  - Es usable aun en entornos de capacidad computacional limitada.
  - El algoritmo de preparación de la muestra optimiza el tiempo de cómputo en forma notable. Esto es deseable independientemente de las capacidades de cómputo disponibles. Considerar que se logran resultados equivalentes aún disminuyendo el número de eventos en un factor de 100.
  - La posibilidad de manejar el tamaño de la muestra de secundarios y la estrategia de separar la

simulación por grupos de tipo de partícula y rango de energía hacen que el modelo sea escalable y distribuible de manera inmediata. De esta forma se puede adaptar a estudios más ambiciosos.

- Las predicciones obtenidas aún en prototipos con muestras de secundarios muy reducidas (hasta  $10^{-5}$  del total de partículas por h y m<sup>2</sup>) están en el mismo orden de magnitud de mediciones experimentales. Las desviaciones predichas para los valores de dosis media están en el rango 10% - 20%. Se puede mejorar la precisión en la posibilidad que se aumente el tamaño de las muestras utilizadas. Con todo, es un resultado que está muy por encima de las incertidumbres experimentales [52], que están limitadas naturalmente por el área efectiva de los sensores.
- Al margen de estos resultados muy convenientes, se presentan algunos retos que muestran rutas de continuación de este proyecto.

- El acceso a datos que caractericen el flujo de radiación ionizante de las rutas aéreas plantea limitaciones a los resultados que se puedan conseguir. Es necesario desarrollar herramientas abiertas que permitan acceder a estos datos y adaptarlos a las necesidades de este proyecto. Estas herramientas pueden basarse en el uso de datos medidos, generados por simulaciones o con una combinación de métodos. Sin embargo, es menester que sean adaptables a las diferentes condiciones que determinan la variabilidad de una ruta: altitud, latitud, campo magnético terrestre, actividad solar, etc.
- El *framework* gRAMA funciona en ambiente Linux. Una máquina virtual equipada con una instalación de GEANT4 es garantía de poder utilizar el modelo en ambientes no Linux <http://fisica.ciens.ucv.ve/jlopez/download/geantGauss01.ova>. Es conveniente explorar el uso de contenedores ya que se trata de soluciones de virtualización más avanzadas

y de mejor rendimiento.

- Si bien gRAMA es escalable y distribuible, es necesario desarrollar más la plantilla GEANT4, ya que esta es la parte más inmadura del *framework*. Es conveniente lograr la estimación de la distribución de dosis en el volumen y no solo su valor medio. Además, es necesario dar más flexibilidad en la definición de agrupamientos de partículas por energía. Ya sea para discriminar en más grupos, para crear grupos adaptados a necesidades concretas (como puede ser mejorar la estimación de dosis equivalente de neutrones) o eliminar completamente el agrupamiento.
- Estudiar distribuciones de dosis es motivación para incluir phantoms antropomórficos [https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB\\_39\\_2](https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB_39_2) [53]. Esto abriría la posibilidad de considerar efectos en diferentes órganos en condiciones de exposición ocupacional prolongada, estimaciones de dosis efectiva, que determina el riesgo de exposición a la

radiación sobre un órgano específico, y la dosis efectiva colectiva [5].

- Se ha logrado un buen resultado en la preparación de la muestra de secundarios. Sin embargo, gRAMA aún subestima la interacción de partículas con la aeronave y dentro de ella, antes de arribar al phantom. El estudio completo de este proceso para entender mejor el espectro de partículas que arriban efectivamente al phantom, redundará en una mejora de ajuste fino en la exactitud de los resultados.
- Si bien la estrategia de usar modelos simples en Física se anota otro éxito al obtener buenos resultados partiendo de un prototipo de aeronave esférica, es posible considerar la inclusión de más propiedades de la composición típica de las aeronaves. Material del compartimiento de equipaje, asientos y pasajeros vecinos son posibles elementos a incluir.



# Bibliografía

- [1] José Antonio López Rodríguez. gRAMA-kit, March 2025. URL: <https://gitlab.com/jalop/grama-kit>, doi:10.5281/zenodo.15106580.
- [2] Thomas K Gaisser, Ralph Engel, and Elisa Resconi. *Cosmic rays and particle physics*. Cambridge University Press, 2016.
- [3] Particle Data Group. Review of particle physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020(8):083C01, 08 2020. URL: <https://academic.oup.com/ptep/article-pdf/2020/8/083C01/34673722/ptaa104.pdf>, doi:10.1093/ptep/ptaa104.
- [4] Peter KF Grieder. *Cosmic rays at Earth*. Elsevier, 2001.
- [5] Eric J. Hall and Amato J. Giaccia. *Radiobiology for the Radiologist*, volume 155. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, Oct 2012.
- [6] 2007 ICRP. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103*. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>.
- [7] 1991 ICRP. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60*. Ann. ICRP 21 (1-3),

1991. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%2060>.
- [8] Eero Pukkala, Anssi Auvinen, and Gunilla Wahlberg. Incidence of cancer among finnish airline cabin attendants, 1967-92. *Bmj*, 311(7006):649–652, 1995.
- [9] Alessandra Buja et al. Cancer incidence among male military and civil pilots and flight attendants: an analysis on published data. *Toxicology and industrial health*, 21(9):273–282, 2005.
- [10] Alessandra Buja et al. Cancer incidence among female flight attendants: a meta-analysis of published data. *Journal of women's health*, 15(1):98–105, 2006.
- [11] Eero Pukkala et al. Cancer incidence among nordic airline cabin crew. *International Journal of Cancer*, 131(12):2886–2897, 2012. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ijc.27551>, doi:10.1002/ijc.27551.
- [12] Hajo Zeeb, Gaël P Hammer, and Maria Blettner. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*, 32(1):N15, mar 2012. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/N15>, doi:10.1088/0952-4746/32/1/N15.
- [13] Giuseppe Mastrangelo et al. Incidence of soft tissue sarcoma and beyond: a population-based prospective study in 3 european regions. *Cancer*, 118(21):5339–5348, 2012.
- [14] Jean-Francois Bottollier-Depois et al. Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation. *EURADOS report*, 3:2012, 2012. URL: [https://eurados.sckcen.be/sites/eurados/files/uploads/Publications/23\\_EURADOS\\_Report\\_201203.pdf](https://eurados.sckcen.be/sites/eurados/files/uploads/Publications/23_EURADOS_Report_201203.pdf), doi:10.12768/sf0h-7h90.
- [15] Maria Teresa Dova. The pierre auger observatory. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 122:170–178, 2003. Proceedings of the 12th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray

- Interactions. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563203803730>, doi:10.1016/S0920-5632(03)80373-0.
- [16] H O Klages et al. The cascade experiment. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 52(3):92–102, 1997. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563296008523>, doi:10.1016/S0920-5632(96)00852-3.
- [17] Iván Sidelnik and Hernán Asorey. Lago: The latin american giant observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 876:173–175, 2017. The 9th international workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2016). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900217302656>, doi:10.1016/j.nima.2017.02.069.
- [18] The ATLAS Collaboration. The atlas experiment at the cern large hadron collider. *Journal of Instrumentation*, 3(08):S08003, aug 2008. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003>, doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [19] Dieter Heck et al. Corsika: A monte carlo code to simulate extensive air showers. *Report fzka*, 6019(11), 1998. URL: <https://digbib.bibliothek.kit.edu/volltexte/fzk/6019/6019.pdf>.
- [20] S. Agostinelli et al. GEANT4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 506:250–303, 2003. doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [21] Sergio Pinilla. *Alertas de meteorología espacial para la navegación aérea*. Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [22] Christian Sarmiento-Cano et al. The arti framework: cosmic rays atmospheric background simulations. *The European Physical Journal C*, 82(11):1019, Nov 2022. doi:10.1140/epjc/s10052-022-10883-z.
- [23] Hernán Asorey, Mauricio Suárez-Durán, and Rafael Mayo-García. Acorde: A new application for estimating the dose absorbed by pas-

- sengers and crews in commercial flights. *Applied Radiation and Isotopes*, 196:110752, 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804323001057>, doi:10.1016/j.apradiso.2023.110752.
- [24] Jorge Dasilva. *Sobre el espectro de rayos cósmicos en la atmósfera*. Universidad Central de Venezuela, 2017. URL: <http://hdl.handle.net/10872/16656>.
- [25] Eymard Guevara. *Sobre el espectro de secundarios de rayos cósmicos en vuelos comerciales*. Universidad Central de Venezuela, 2017. URL: <http://hdl.handle.net/10872/16654>.
- [26] Jhoalys K. Valera F. *Efecto radiobiológico de neutrones en grandes altitudes*. Universidad Central de Venezuela, 2022.
- [27] Andrea C. Tugores H. *Desarrollo de un modelo reproducible de simulación de dosis de secundarios de radiación cósmica en tripulación de aeronaves usando GEANT4*. Universidad Central de Venezuela, 2022.
- [28] J. A. López Rodríguez. Estimacion factores riesgo radio aeronaves. Consultado en enero de 2024. URL: <https://gitlab.com/jalop/estimacionfactoresriesgoradioaeronaves>.
- [29] OpenAI. Chatgpt. Consultado en agosto de 2023. URL: <https://openai.com>.
- [30] Eric J. Hall. *Radiobiology for the Radiologist*. Lippincott Williams & Wilkins, Jun 1994.
- [31] TE Wheldon and AS Michalowski. Alternative models for the proliferative structure of normal tissues and their response to irradiation. *The British Journal of cancer. Supplement*, 7:382, 1986.
- [32] András Szabó and Roeland M. Merks. Cellular potts modeling of tumor growth, tumor invasion, and tumor evolution. *Frontiers in Oncology*, 3:87, 2013. URL: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fonc.2013.00087>, doi:10.3389/fonc.2013.00087.

- [33] Maurice Tubiana. *Introduction to Radiobiology*. CRC Press, Oct 2005.
- [34] George Gordon Steel. *Basic Clinical Radiobiology*. Hodder Arnold Publishers, Jun 1997.
- [35] F.H. Attix. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons, Ltd, 1986. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527617135.ch1>, doi: [10.1002/9783527617135.ch1](https://doi.org/10.1002/9783527617135.ch1).
- [36] T. R. Munro. The Relative Radiosensitivity of the Nucleus and Cytoplasm of Chinese Hamster Fibroblasts. *Radiation Research*, 42(3):451–470, 06 1970. URL: <https://meridian.allenpress.com/radiation-research/article-pdf/42/3/451/2174838/3572962.pdf>, doi: [10.2307/3572962](https://doi.org/10.2307/3572962).
- [37] Arnold H. Sparrow and Jerome P. Miksche. Correlation of nuclear volume and dna content with higher plant tolerance to chronic radiation. *Science*, 134(3474):282–283, 1961. URL: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.134.3474.282>, doi: [10.1126/science.134.3474.282](https://doi.org/10.1126/science.134.3474.282).
- [38] K P Baetcke et al. The relationship of dna content to nuclear and chromosome volumes and to radiosensitivity (ld50). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 58(2):533–540, 1967. URL: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.58.2.533>, doi: [10.1073/pnas.58.2.533](https://doi.org/10.1073/pnas.58.2.533).
- [39] A.V. Carrano. Chromosome aberrations and radiation-induced cell death: Ii. predicted and observed cell survival. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 17(3):355–366, 1973. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0027510773900079>, doi: [10.1016/0027-5107\(73\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0027-5107(73)90007-9).
- [40] Hatsumi Nagasawa and John B. Little. Induction of sister chromatid exchanges by extremely low doses of  $\alpha$ -particles1. *Cancer Re-*

- search*, 52(22):6394–6396, 11 1992. URL: <https://aacrjournals.org/cancerres/article-pdf/52/22/6394/2449709/cr0520226394.pdf>.
- [41] Hatsumi Nagasawa and John B. Little. Unexpected Sensitivity to the Induction of Mutations by Very Low Doses of Alpha-Particle Radiation: Evidence for a Bystander Effect. *Radiation Research*, 152(5):552–557, 11 1999. URL: <https://meridian.allenpress.com/radiation-research/article-pdf/152/5/552/2133680/3580153.pdf>, doi:10.2307/3580153.
- [42] Colin B Seymour and Carmel Mothersill. Radiation-induced bystander effects—implications for cancer. *Nature Reviews Cancer*, 4(2):158–164, 2004. doi:10.1038/nrc1277.
- [43] Bruce E. Lehnert and Edwin H. Goodwin. Extracellular Factor(s) following Exposure to  $\alpha$  Particles Can Cause Sister Chromatid Exchanges in Normal Human Cells1. *Cancer Research*, 57(11):2164–2171, 06 1997. URL: <https://aacrjournals.org/cancerres/article-pdf/57/11/2164/2463616/cr0570112164.pdf>.
- [44] C Mothersill and C Seymour. Medium from irradiated human epithelial cells but not human fibroblasts reduces the clonogenic survival of unirradiated cells. *International Journal of Radiation Biology*, 71(4):421–427, 1997. PMID: 9154145. doi:10.1080/095530097144030.
- [45] 1977 ICRP. *ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26*. Ann. ICRP 1 (3), 1977. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2026>.
- [46] J Chen et al. Estimated neutron dose to embryo and foetus during commercial flight. *Radiation protection dosimetry*, 114(4):475–480, 2005.
- [47] S Jan et al. Gate: a simulation toolkit for pet and spect. *Physics in Medicine & Biology*, 49(19):4543, sep 2004. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/49/19/007>, doi:10.1088/0031-9155/49/19/007.

- [48] Laurent Desorgher et al. Geant4 application for simulating the propagation of cosmic rays through the earth's magnetosphere. In *Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference. July 31-August 7, 2003. Tsukuba, Japan. Under the auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP)*. Editors: T. Kajita, Y. Asaoka, A. Kawachi, Y. Matsubara and M. Sasaki, p. 4281, volume 7, page 4281, 2003.
- [49] Jhoalys K. Valera F. Ejemplo\_opengate. Consultado en agosto de 2023. URL: [https://gitlab.com/Jhoka/Ejemplo\\_openGATE](https://gitlab.com/Jhoka/Ejemplo_openGATE).
- [50] G. Dietze et al. ICRP Publication 123: Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. *Annals of the ICRP*, 42(4):1–339, 2013. PMID: 23958389. doi:10.1016/j.icrp.2013.05.004.
- [51] Andrea Tugores. Cosmic-radiation-geant4. Consultado en agosto de 2023. URL: <https://gitlab.com/Andretugores/cosmic-radiation-geant4>.
- [52] Marina Poje et al. Neutron radiation measurements on several international flights. *Health Physics*, 108(3):344–350, 2015.
- [53] 2009 ICRP. Realistic reference phantoms: An icrp/icru joint effort. *Annals of the ICRP*, 39(2):3–5, 2009. doi:10.1016/j.icrp.2009.09.001.
- [54] DC Galeano et al. Fluence-to-dose conversion coefficients based on the posture modification of adult male (am) and adult female (af) reference phantoms of icrp 110. *Radiation Physics and Chemistry*, 121:50–60, 2016.
- [55] MC Alves et al. Comparison of the effective dose rate to aircrew members using hybrid computational phantoms in standing and sitting postures. *Journal of Radiological Protection*, 36(4):885, 2016.