

# Estimación de riesgo radiobiológico en la tripulación de aeronaves comerciales

José Antonio López Rodríguez

Universidad Central de Venezuela  
*jose.lopez@ucv.ve*

22 de marzo de 2024

- El estudio de los efectos de la radiación sobre la tripulación de vuelos comerciales es un tema de interés creciente desde varias disciplinas.
- Buscamos desarrollar una línea de trabajo en aplicaciones de la radiación cósmica en la atmósfera con interés práctico.
- Mapas de espectros de energía por especie para diferentes eventos según latitud, longitud, altitud y fecha.
- **Herramientas para el prototipado de cálculos de estimación de dosis en tripulaciones de aeronaves.**
- Estimación del flujo de partículas secundarias en diferentes estructuras.

- Es el estudio de la acción de la radiación sobre la materia viva.

- Es el estudio de la acción de la radiación sobre la materia viva.
- La acción tiene varias fases. Procesos y escalas temporales característicos.

- Es el estudio de la acción de la radiación sobre la materia viva.
- La acción tiene varias fases. Procesos y escalas temporales característicos.
  - Fase física

- Es el estudio de la acción de la radiación sobre la materia viva.
- La acción tiene varias fases. Procesos y escalas temporales característicos.
  - Fase física
  - Fase química

- Es el estudio de la acción de la radiación sobre la materia viva.
  - La acción tiene varias fases. Procesos y escalas temporales característicos.
    - Fase física
    - Fase química
    - Fase biológica
- ◇

- Fase física



- Fase física
  - El transporte de radiación en la materia produce el desplazamiento de partículas cargadas (electrones)

- Fase física
  - El transporte de radiación en la materia produce el desplazamiento de partículas cargadas (electrones)
  - Alteración estructural en moléculas: rotura de enlaces y generación de radicales libres.
  - ◇

- La probabilidad de generar un efecto sobre la célula depende de la cantidad de ionizaciones producidas.
- Energía de las partículas incidentes (umbral de radiación ionizante).
- Cantidad de partículas incidentes por unidad de masa  $\rightarrow$  energía depositada por unidad de masa  $\rightarrow$  dosis.
- $[D] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{Gy}$  (Gray).
- También depende del tipo de partícula incidente.

- Es la transferencia lineal de energía. La magnitud promedio de energía transferida a las partículas cargadas del material.
- ICRU 98:  $LET_{\Delta}$  es la energía perdida neta debida a colisiones electrónicas, en un  $dx$  de material, menos la suma de las energías cinéticas de los electrones con energía mayor a  $\Delta$ .
- Unidad típica:  $keV/\mu m$ .
- No se define para radiación indirectamente ionizante (pero se usa).
- Medida de la homogeneidad de la dosis.
- Baja LET: energía se deposita en un patrón uniforme.
- Alta LET: energía se acumula en zonas específicas.

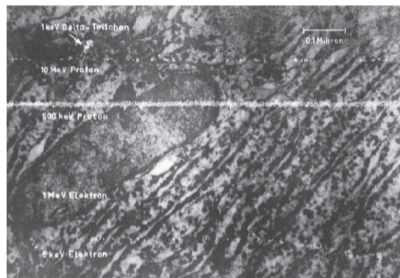


Figura: Deposición de energía para diferentes partículas

**TABLE 7.1** Typical Linear Energy Transfer Values

Radiation	Linear Energy Transfer, keV/ $\mu\text{m}$		
Cobalt-60 $\gamma$ -rays	—	0.2	—
250-kV x-rays	—	2.0	—
10-MeV protons	—	4.7	—
150-MeV proton	—	0.5	—
	Track average	—	Energy average
14-MeV neutrons	12	—	100
2.5-MeV $\alpha$ -particles	—	166	—
2-GeV Fe ions (space radiation)	—	1,000	—

Figura: Valores típicos

## Nucleos, protones y neutrones\*

- Radiación de alta LET\*
- Producen un patrón de ionizaciones denso a lo largo de su trayectoria.
- Trayectoria recta.
- El efecto se concentra en un radio relativamente pequeño.
- Una sola partícula puede generar un efecto localizado y suficientemente grande para afectar **directamente** el DNA de una o varias células.

## Fotones

- Patrón de ionizaciones disperso, más homogéneo en el volumen.
- Es menos probable generar un daño considerable al DNA en un único evento.
- El efecto sobre la célula se potencia debido a la **vía indirecta**,  $\text{H}_2\text{O} + \gamma \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e^-$ .
- **2/3 del efecto debido a fotones es indirecto.**
- Electrones: dosis superficial. Electrones del medio contribuyen como secundarios en la distribución de la dosis (rayos  $\delta$ ).

- Fase química

- Fase química
  - Radicales libres reaccionan en el medio. La abundancia de agua en el medio celular es clave.



- Fase química
  - Radicales libres reaccionan en el medio. La abundancia de agua en el medio celular es clave.
  - Restauración del equilibrio químico puede terminar produciendo cambios estables en las moléculas del medio.

- Fase química
  - Radicales libres reaccionan en el medio. La abundancia de agua en el medio celular es clave.
  - Restauración del equilibrio químico puede terminar produciendo cambios estables en las moléculas del medio.
  - Hay procesos de fijado: La estructura de las moléculas del medio cambia.

- Fase química
    - Radicales libres reaccionan en el medio. La abundancia de agua en el medio celular es clave.
    - Restauración del equilibrio químico puede terminar produciendo cambios estables en las moléculas del medio.
    - Hay procesos de fijado: La estructura de las moléculas del medio cambia.
    - Hay procesos de reparación: Los radicales libres son neutralizados.
- ◇

## Reacciones en el medio celular

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

- 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.
- Los radicales  $^\cdot\text{OH}$  y  $\text{H}^\cdot$  pueden migrar fácilmente y producir reacciones nuevas.

## 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  $^\cdot\text{OH}$ .

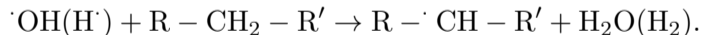
- Restauración



- Aparición de sustancias dañinas



- Cambios en moléculas complejas y generación de nuevos radicales



- Fase biológica

- Fase biológica
  - Reacciones enzimáticas reparan el daño residual en moléculas clave (DNA).

- Fase biológica
  - Reacciones enzimáticas reparan el daño residual en moléculas clave (DNA).
  - Es muy eficaz. Consiste en una gran cantidad de mecanismos.



- Fase biológica
    - Reacciones enzimáticas reparan el daño residual en moléculas clave (DNA).
    - Es muy eficaz. Consiste en una gran cantidad de mecanismos.
    - Los cambios químicos residuales no reparados pueden ser origen de mutaciones, muerte celular, cáncer, etc.
- ◇

# Fases de la acción de la radiación en la materia viva

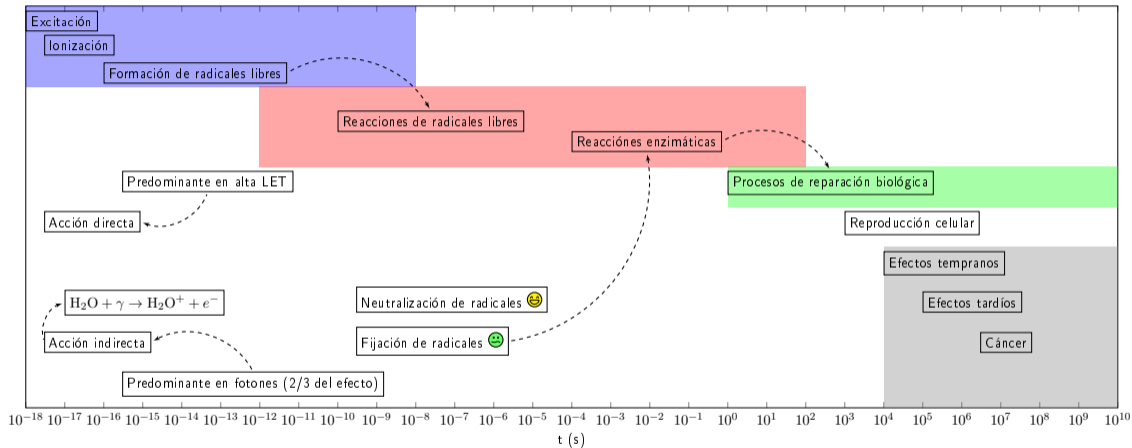
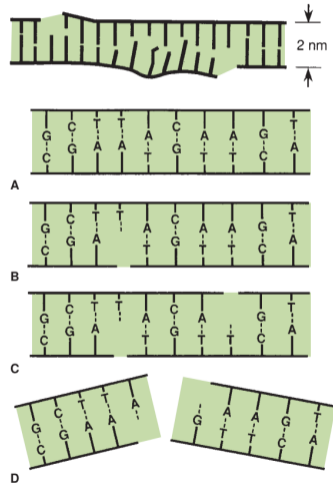


Figura: Escala temporal de los efectos de la radiación.

## Ocurren tres tipos

- Bases dañadas.
- Roturas simples de cadena.
- Roturas dobles de cadena.



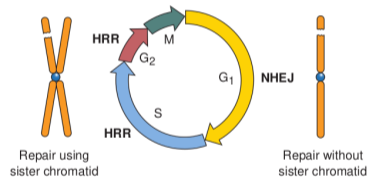
Cuando la reparación falla se producen aberraciones.

## Dos tipos según la fase del ciclo

- Pre síntesis o aberraciones cromosómicas.
- Post síntesis o aberraciones cromátidas.

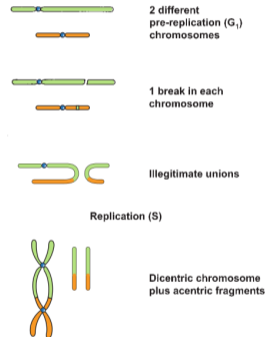
## Dos tipos según el efecto

- Letales: se detiene la duplicación.
- No letales: célula modificada.



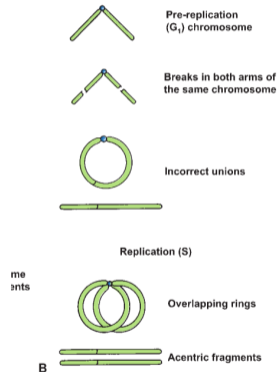
## Dicentro

- Dos roturas de doble cadena en dos cromosomas.
- La reparación une los extremos de forma incorrecta.
- Genera un cromosoma con dos centrómeros.



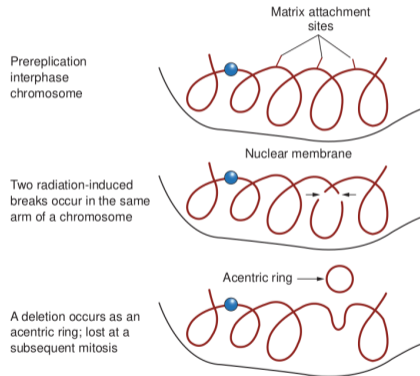
## Anillo

- Dos roturas de doble cadena en los extremos de un cromosoma.
- La reparación forma un anillo.



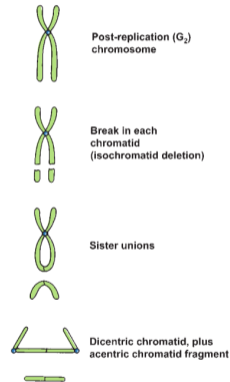
## Borrado

- Dos roturas de doble cadena en un brazo de un cromosoma.
- La reparación une los extremos de forma incorrecta.
- Borra un sector del cromosoma.



## Puente anafase

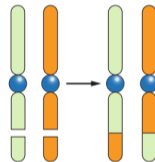
- Dos roturas de doble cadena en dos copias de un cromosoma.
- La reparación forma un anillo.





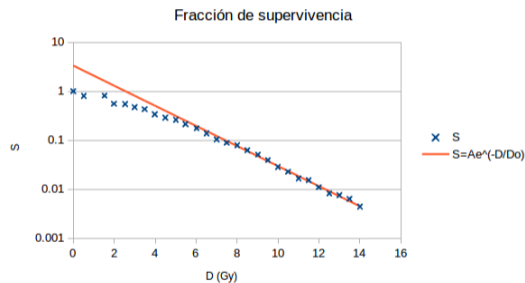
## Traslocación

- Dos roturas de doble cadena en dos brazos.
- La reparación intercambia los extremos.



# Estudio del daño celular por radiación: Fracción de supervivencia $S$

- $S$  es la proporción de células que tienen capacidad de reproducirse y formar colonias, a partir de una población inicial.
- Es una medida estándar del efecto de la radiación en tejidos.
- Esta proporción es modificada por distintas condiciones. Por ejemplo, la aplicación de una dosis de radiación específica.



# Fracción de supervivencia $S$

- La curva  $S(D)$  suele tener las siguientes características:
  - Un hombro inicial: Daño subletal (SLD).
  - Pendiente inicial negativa: hay efecto para toda dosis.
  - Comportamiento exponencial para dosis altas, caracterizado por la pendiente  $-\frac{1}{D_0}$ .
- **Se define como efecto al valor de  $S(D)$ .**

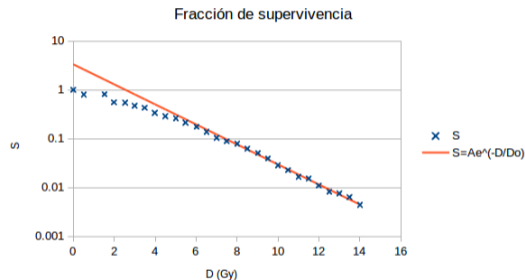


Figura: La pendiente inicial es menos pronunciada

# Efectividad biológica relativa (RBE)

- Es la relación entre dos dosis que surten igual efecto, en iguales condiciones de aplicación. La dosis de referencia (rayos X de 250 kV) con respecto a la dosis a comparar.

$$RBE(S) = \frac{D_{250}(S)}{D_r(S)}. \quad (1)$$

- $D_{250}(S)$  es la dosis de rayos X de 250 kV tal que produce el efecto S.
- $D_r(S)$  es la dosis de radiación r que produce el efecto S

- Puesto que se compara con fotones, que tienen SLD, la RBE depende de la dosis.
- A bajas dosis los valores de RBE son altos
- Disminuyen paulatinamente con la dosis hasta un valor límite

- El tratamiento fraccionado de fotones tiene una curva efectiva dosis-efecto exponencial
- La RBE de tratamientos fraccionados es independiente de la dosis

$$RBE(S) = \frac{D_{0250}}{D_{0r}}. \quad (2)$$

- $D_{0250}$  es la dosis de reducción al 37 % de la población
- $D_{0r}$  es la dosis de reducción al 37 % de la población

# Tratamiento fraccionado

- En el caso de partículas de alta LET, como neutrones, la RBE aumenta con el fraccionamiento
- Menores dosis de fracción implican mayores RBE
- Curva dosis-efecto de fotones se hace más horizontal al disminuir las fracciones
- Curva de neutrones tiene SLD mínimo (hombro). Su inclinación no cambia apreciablemente con el fraccionamiento

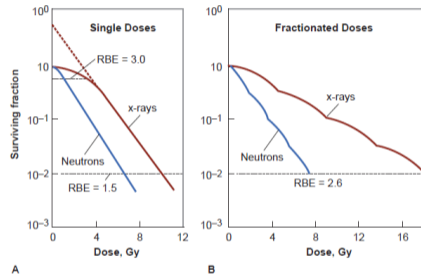


Figura: RBE neutrones

# Factores que determinan la RBE de alta LET

- En general la RBE depende del tejido
- Diferentes tipos de tejido tienen diferentes curvas de supervivencia para fotones (distintas SLD)
- Las curvas de supervivencia de diferentes tejidos con partículas de alta LET no difieren en gran medida
- En general, la RBE depende de la LET

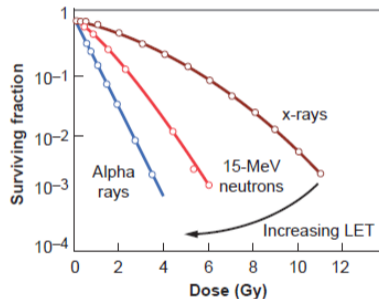


Figura: LET y RBE

## Baja LET

- Ionización dispersa
- Energía se deposita aleatoriamente
- Radiación muy penetrante
- Predomina el daño indirecto al DNA
- Rotura de una hélice de DNA
- Domina la reparación perfecta del DNA
- Produce mutaciones locales
- Sí SLD
- OER alto

## Alta LET

- Ionización densa
- Energía se deposita de manera uniforme
- Radiación poco penetrante
- Predomina el daño directo al DNA
- Rotura de las dos hélices del DNA
- Aumenta la probabilidad de errores de reparación del DNA
- Produce mutaciones no-locales (en varias células vecinas)
- No SLD
- OER bajo



- LET
- Dosis
- Fraccionamiento
- Tasa de dosis
- Sistema biológico
- Objetivo: Una fracción de población u otro efecto biológico predefinido (mutaciones, cáncer, etc)

# Factor de peso $W_R$ y dosis equivalente

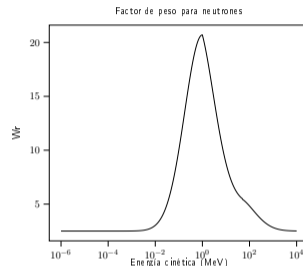
- Es un factor de peso que intenta homogeneizar el efecto RBE en casos de interés para la protección radiológica en condiciones de trabajo estándar
- Se basa en la RBE
- Depende fundamentalmente de la LET
- Condiciones típicas:
  - Dosis: bajas
  - Tasa de dosis: bajas
  - Sistema biológico: humano
  - Objetivo: cáncer, efectos heredables

# Factor de peso $W_R$ y dosis equivalente

- Se define observacionalmente
- Se revisa periódicamente
- $W_R = 1$  para toda la radiación de baja LET (fotones y electrones)
- Aumenta con otros tipos de radiación (con la LET)
- Valor máximo en 20 para neutrones y partículas  $\alpha$  de mayor RBE
- La dosis equivalente es  $D_E = W_R D$ ,
  - donde  $D$  es la dosis absorbida
  - Se mide en  $\text{Sv} = \text{J/kg}$  (Sievert)

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:** Factor de peso  $w_R$  para fotones y partículas cargadas.



**Figura:** El factor de peso para neutrones depende de la energía

$$w_r = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-(\ln E)^2/6}, & E < 1 \text{ MeV} \\ 5 + 17.0e^{-(\ln 2E)^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-(\ln 0.04E)^2/6}, & E > 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (3)$$

## Determinísticos

- Acumulación de células afectadas
- Niveles de dosis inferiores a un umbral práctico no presentan efecto
- Cerca del umbral la probabilidad de manifestación es baja, pero aumenta rápidamente
- Al pasar el umbral, la magnitud del efecto aumenta con la dosis

## Estocásticos

- La radiación puede producir aberraciones no letales, mutaciones que se mantengan como células viables dentro del tejido
- Pueden producir cáncer o efectos heredables
- La probabilidad de sufrir estos efectos es finita a todo nivel de dosis
- La probabilidad aumenta con la dosis
- La magnitud del efecto manifestado no depende de la dosis

# Efectos determinísticos vs estocásticos

<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

## Definición

- Partículas cargadas que llegan constantemente a la atmósfera terrestre en un rango amplio de energías.
- Partículas elementales y núcleos.
- Vidas medias superiores a  $10^6$  años.
- Primarios: partículas creadas y aceleradas mediante procesos astrofísicos.
- Secundarios: resultan de la interacción de los primarios con el gas intergaláctico.

# Composición de los rayos cósmicos

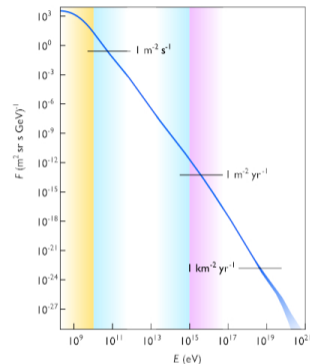
- Alrededor del 90 % de los rayos cósmicos son protones.
- Partículas  $\alpha$  son  $\sim 9\%$  del total.
- La relación varía ligeramente con la energía.

$Z$	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:** 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  $E \in (10 \text{ GeV} - 1000 \text{ GeV})$ .



- La actividad solar es una fuente importante de partículas de baja energía.
- Para energías superiores  $> 1$  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.



**Figura:** 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

# Dependencia del campo magnético

- La presencia de rayos cósmicos secundarios es influenciada por la interacción con los campos electromagnéticos del entorno.
- Galáctico, solar y terrestre.
- El aumento en la intensidad del viento solar conduce a una disminución de la cantidad de radiación cósmica que llega a la Tierra.
- Correlacionadas hasta 10 GV.
- Rigidez magnética.

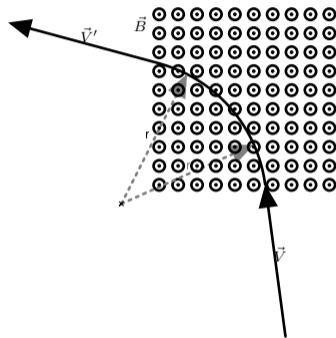


Figura: Desviación de una partícula cargada en un campo magnético. La rigidez magnética  $R$  es el producto  $rB$ .

- Transfieren su energía a las partículas del medio.
- Partículas primarias generan secundarios.
- La cantidad de secundarios aumenta hasta un máximo.
- Procesos hadrónicos producen mesones.
- Piones cargados decaen en muones.
- Tres tipos de cascada: EM, Muónica y Hadrónica.

- La profundidad atmosférica es la cantidad clave.

$$X(h) = \int_{\infty}^h \rho(r) dr. \quad (4)$$

- Máximo de partículas secundarias  $\sim 100 \text{ g/cm}^2$ .
- La profundidad total es  $\sim 1000 \text{ g/cm}^2$ .
- El máximo de partículas secundarias  $\sim 10000 \text{ m s.n.m.}$

- La distribución diferencial de energía caracteriza el espectro de secundarios:

$$\varphi'(\theta, \beta, E, x, X, t), \quad (5)$$

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

- Hereda propiedades del espectro de los primarios.
- $\theta$  es el ángulo cenital. Hay un decaimiento para ángulos grandes.
- $\beta$  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.
- La profundidad atmosférica vertical determina el desarrollo de la cascada.

# Reconstrucción de $\varphi'$

- El espectro completo se reconstruye a partir del estudio de la evolución completa de partículas primarias con posición  $x$ .
- Secundarios generados en  $x$  que llegan a  $x + \xi$  son compensados con los generados en  $x - \xi$ , que llegan a  $x$ .
- Si la extensión de la cascada está en el orden de 100 km no es necesario tomar en cuenta la curvatura terrestre en los cálculos.
- Es una convolución.

$$\varphi'(\theta, \beta, E, x, X, t) = \int \tilde{\varphi}'(\theta, \beta, E, x - \xi, X, t, \xi) d\xi^2. \quad (6)$$

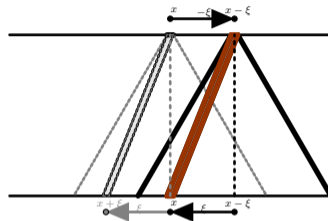


Figura: La contribución al espectro de secundarios en  $x$ , debido a cascadas generadas en  $x - \xi$  es igual a la contribución en  $x + \xi$  de cascadas generadas en  $x$ .

## Necesidad

- La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda incluir a la tripulación en la categoría de Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)
- Las aeronaves comerciales vuelan a altitudes del orden de los  $10^4$  m s.n.m.
- Estudios generales evalúan los riesgos para la tripulación debido a su exposición prolongada a la radiación ionizante.

## Retos

- **Altitud:** Los techos de vuelo pueden variar varios miles de metros.
- **Latitud:** Mayor rigidez magnética de corte cerca del Ecuador.
- **Variabilidad del Campo Magnético Terrestre:** El campo magnético terrestre presenta anomalías considerables.
- **Ciclo Solar:** La actividad solar afecta la llegada de los rayos cósmicos.
- **Tormentas Solares:** Eventos violentos expulsan partículas a alta velocidad.

- 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 simulación para estimar la dosis absorbida en situaciones de vuelo comercial.
- El objetivo es utilizar herramientas de acceso abierto.
- La investigación en Física fundamental ha producido varias de estas herramientas y de amplia aplicación.
- CORSIKA, GEANT4 y soluciones derivadas.

- Curva de aprendizaje.
- Gran demanda de recursos computacionales.
- Limitación de sistema operativo.
- Nicho de computación de alto rendimiento.

## Oportunidad

- Desarrollar un modelo portable.
- Ejemplo Funcional Reproducible.
- Permite desarrollar prototipos.
- Escalamiento.



- 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 digital.
- Un nombre con momentum. gRAMA-kit: (*g*)uerrilla (*R*)adiation (*A*)bsorption (*M*)odeling for (*A*)ircraft

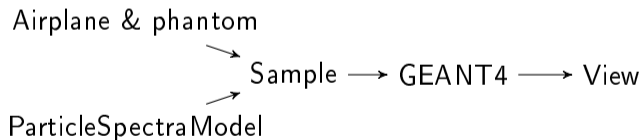
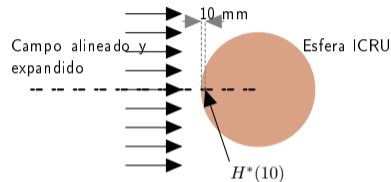


Figura: Piezas iniciales y secuencia de pasos en gRAMA-kit.

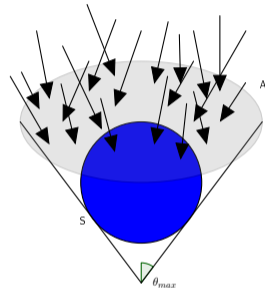
- Pruebas de simulación de diferentes salidas de secundarias. Dos trabajos de grado incluyeron esta metodología.
- CORSIKA.
- Diferentes muestras de primarios con la finalidad de caracterizar el espectro resultante.
- Se trabajó en un punto fijo y también generando una muestra representativa del tránsito completo de la aeronave en la ruta.
- No es conveniente incluir esta parte en el EFR. Se debe trabajar con grandes cantidades de eventos para construir distribuciones de energía útiles.
- Se opta por adaptar muestras conocidas de espectros de partículas a las necesidades de cómputo.

- Construimos modelos de phantoms y aeronaves usando GEANT4 y OPENGATE. Otras dos tesis de grado probaron esta metodología.
- Se fabricaron muestras de secundarios con los parámetros generados de simulaciones sobre rutas completas.
- Primer modelo es un phantom esférico de tejido con un obstáculo de material de aeronave.
- Esfera ICRU



**Figura:** 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 a una profundidad de 10 mm sobre el vector radial opuesto a la dirección del campo alineado

- Segundo caso se agregan los modelos simplificados de aeronave.
- Se incorpora el filtrado de partículas y la preparación de la muestra adaptada a la aeronave.



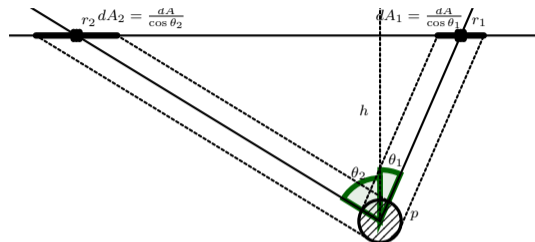
**Figura:** Cada partícula que interactúa en la aeronave puede ser contabilizada en una superficie de referencia a una cota constante.

- Se establece una relación biunívoca entre el flujo de partículas en un volumen arbitrario y el flujo de partículas en un plano de referencia sobre el volumen.

$$\varphi'(\theta, \beta, E)dA = \varphi'_p(\theta, \beta, E, r(h, \theta), \varphi(\beta))d\tilde{A}, \quad (7)$$

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.
- $\varphi(\beta) = \beta$ .

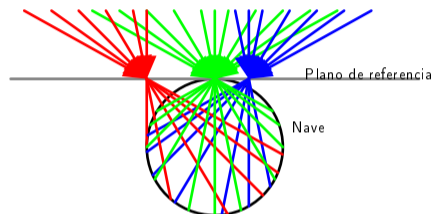


**Figura:** Relación entre el flujo planar y volumétrico. A medida que el ángulo de arribo de las partículas en  $p$  aumenta ( $\theta_2$ ), el flujo en el plano de referencia atraviesa un área mayor.

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

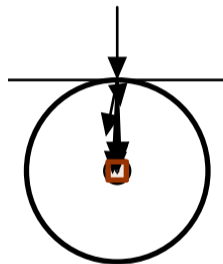
$$\varphi'_p(\theta(r, h), \beta(\varphi), E, r, \varphi) = \varphi'(\theta, \beta, E) \cos \theta. \quad (8)$$

- No todas las partículas son interesantes para la simulación.
- Discriminamos antes de propagar.
- A partir de una muestra correspondiente al flujo de partículas en un determinado lugar geográfico, para  $1 \text{ m}^2$ , se construye una muestra para un área mayor o menor.



**Figura:** 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.

- Scripts preparan el código en GEANT4 con la aeronave seleccionada, el phantom y las partículas.
- Se pueden fijar pruebas con cantidades bajas de partículas y ver tendencias.



**Figura:** 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.



- Se generan cortes con la dosis depositada en todo el phantom.

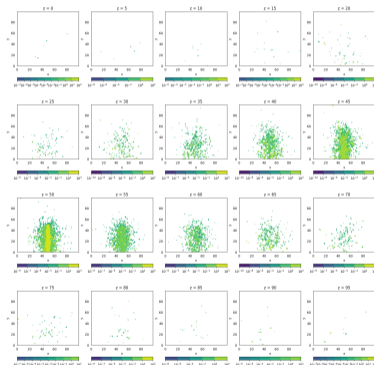


Figura: Representación típica de cortes de energía depositada en un phantom paralelos al eje del haz.

- Se incluyen los factores de peso  $w_R$  para cada partícula primaria.
- Se suma la dosis equivalente promedio.
- Se estima un error: Sea  $D_{s,E}$  la dosis media depositada por las partículas de la especie  $s$  y energía  $E$ , entonces la desviación será,

$$\Delta D_{s,E} = \frac{D_{s,E}}{\sqrt{N_{s,E}}}. \quad (9)$$

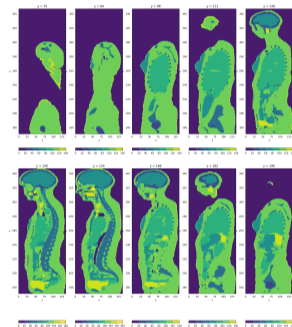
La desviación para la dosis media total ( $D$ ),

$$\Delta D = \sum_{s,E} \Delta D_{s,E}. \quad (10)$$

- Se realizan pruebas con muestras representativas de alta y baja tasa de dosis.
- Se usa un submuestreo de  $10^{-5}$ .

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

- Mejorar estimación de dosis equivalente.
- Propagación de secundarios en el interior de la aeronave.
- Mejorar el modelo de aeronave: agregar elementos.
- Inclusión de phantoms antropomórficos y estudios de distribución de dosis.



**Figura:** Detalle de algunos cortes en dirección sagital del modelo antropomórfico femenino ICRP. La escala de color indica que cada voxel tiene asignada la propiedad de un tipo de tejido

- Avances en la construcción de un modelo reproducible de estimación de dosis en condiciones de vuelo.
- Repositorio público y documentado.
- Útil en entornos de capacidad de cómputo limitada.
- Mejora los tiempos de cálculo.
- Es escalable y distribuible.
- La exactitud de los resultados preliminares es prometedora.
- Limitaciones para el acceso a datos de espectro de energía.
- Es conveniente desarrollar contenedores que faciliten el uso de las VM.
- Mejorar la plantilla GEANT4.
- Incluir phantoms antropomórficos y distribuciones de dosis.
- Mejorar la estimación inicial de partículas que efectivamente llegan al phantom.
- Mejorar el modelo de aeronave.