

# **Dosis estimada de radiación cósmica ionizante en rutas aéreas de operadores colombianos**

**Realizado por:**

**Juan Carlos Camacho Suarez**

**Director trabajo de grado: Hugo Alberto Fajardo**

**Residente Medicina Aeroespacial**

**Universidad Nacional De Colombia**

**Facultad de Medicina**

**Enero 24 de 2017**

## **Estimated dose of ionizing cosmic radiation in air routes of Colombian operators**

**INTRODUCTION:** Flight workers are constantly exposed to different hazards, one of those is Galactic Cosmic Radiation (GCR). This kind of radiation is about 40% of all-natural radiation and it is increased at high altitudes and polar regions. In 1994, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) recommended aircrews to follow limits for radiation exposure. There are many studies about this problem as it occurs in polar regions, but in equatorial regions the evidence is low, and there is not studies that address Colombia. The aim of this research was to estimate the GCR dose in different national and international routes of commercial aviation in Colombia, with the aim to know the level of occupational risk present in this population. **METHODS:** This was a descriptive cross-sectional study in national and international flight routes in Colombia, taking standardized values at a maximum amount of pilot duty hours of 1000 hours/yr. This value was established by the civil aeronautics authority in Colombia. Other variables considered were: The International Civil Aviation Organization (ICAO) codes for each airport, type of aircraft, airport altitude, distance between airports, cruising altitude and time, ascent and descent rate. The effective dose was calculated using three solar radiation software: EPCARD, PCAIRE and CARI-6. **RESULTS:** In international flights the highest exposure routes were from Bogotá to London with a dose of 5.82 mSv/yr and from Bogota to New York with 5.27 mSv/yr. The lowest were to Panama City with 1.78 mSv/yr and Guayaquil with 1.94 mSv/yr. For national flights the highest exposure routes were to San Andrés with 2.7 mSv/yr and Leticia with 2.16 mSv/yr. The lowest to Ibagué 0.34 mSv/yr and Armenia 0.2 mSv/yr. **DISCUSSION:** An estimated dose exceeding 1 mSv/yr was found in all international routes, while in the national flight scenarios this value was reached as measured with PCAIRE and CARI-6 in almost a half of the routes. The data found agree with what was expected, since the majority of the members of a crew with ~750 hours of flight are expected to receive exposures above 1 mSv/yr. Is important to carry out new studies taking into account the exact duty hours for each pilot and the different routes in which they fly in their real situation as well as studies through the use of dosimetry.

# 1. JUSTIFICACION

## MARCO TEORICO

### Introducción:

La radiación ionizante es un factor muy importante a tener en cuenta en operaciones aéreas (1 - 3), el planeta tierra se encuentra en un bombardeo constante de radiación ionizante de alta energía de origen cósmico (RCG Radiación Cósmica Galáctica), de la cual las supernovas representan la principal fuente (1). La radiación cósmica es una forma de radiación ionizante, lo que significa que es capaz de eliminar, al menos, un electrón de un átomo o molécula creando especies de radicales tales como Especies Reactivas de Oxígeno (EROs). Las EROs se puede dividir en radical (superóxido, hidroxilo, peroxilo, alcoxilo y hidroperoxilo) y no radical (peróxido de hidrógeno, ozono, oxígeno singlete, peroxinitrito y especies de ácido hipocloroso) (4).

La mayor parte (60%) de las radiaciones ionizantes provenientes de fuentes naturales llegan desde el mismo planeta tierra y están compuestas por rayos X y y principalmente (5). La radiación proveniente del espacio o RCG representa alrededor del 40% de la dosis de radiación proveniente de fuentes naturales (5), además de ser la única forma de radiación de neutrones de origen natural.

Además de la RCG, el planeta recibe esporádicamente ráfagas de partículas energéticas procedentes del Sol denominadas eventos de partículas solares (EPSs) (1). La principal diferencia entre exposición a RCG y EPSs deriva de sus variaciones temporales y dosis. La RCG induce exposición continua con baja tasa de dosis, usualmente en el orden de  $\mu\text{Sv h}^{-1}$ , mientras que EPSs produce exposición pulsada con alta tasa de dosis, ocasionalmente  $> 1 \text{ mSv h}^{-1}$  (6).

El ambiente a la altitud de vuelo de aviones comerciales (6 – 18 km) se encuentra en contacto con RCG (protones, partículas alfa y núcleos pesados de fuera del

sistema solar), las cuales para llegar a la tierra deben atravesar el campo magnético solar y terrestre (7).

Como ya se mencionó anteriormente, el planeta recibe protección de estas radiaciones a través de diferentes factores que incluyen el campo geomagnético terrestre, el campo electromagnético solar y la atmosfera terrestre (8, 4), por lo cual se ven efectos más complejos a grandes altitudes. En el espacio los astronautas no cuentan con esta protección (1).

Campo magnético solar (ciclo solar): el sol posee un campo magnético variable, dipolo, el cual se invierte cada 11 años aproximadamente. Tiene periodos máximos (muchas manchas solares, turbulencia magnética, a través del viento solar) y mínimos (1). El campo magnético solar actúa desacelerando la entrada de RCG. De este modo la actividad solar filtra las partículas galácticas de baja energía que de otra forma entrarían al sistema solar. Consecuentemente la radiación de origen cósmico galáctico es mayor durante los periodos de mínimo solar y menor durante el máximo solar (7).

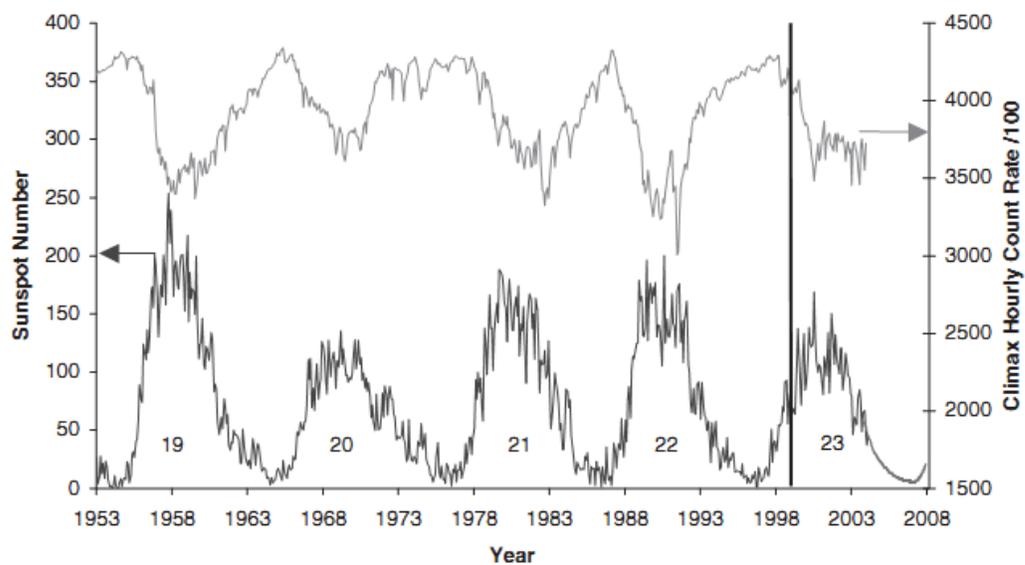


Figura 1. Ciclos solares entre 1953 y 2008. Tomado de: Radiat Prot Dosimetry. 2014;161(1-4):274-278.

En la gráfica se observa el número de manchas solares (curva inferior) y el promedio mensual de la tasa de recuento horaria para el punto de mayor intensidad basado en un monitor de neutrones a nivel terrestre (curva superior) (7).

Campo electromagnético de la Tierra (latitud): proporciona una mayor protección. Las partículas que logran pasar por el campo magnético solar son desviadas por el campo electromagnético terrestre de forma que los niveles de radiación son dos veces mayores en las regiones polares que en las ecuatoriales (7, 4, 9). En los polos el campo magnético es casi vertical y los rayos cósmicos primarios llegan más fácilmente a la tierra. Para la altitud en que vuelan los aviones comerciales la GCR es 2,5 a 5 veces más intensa en las regiones polares que cerca del ecuador (1).

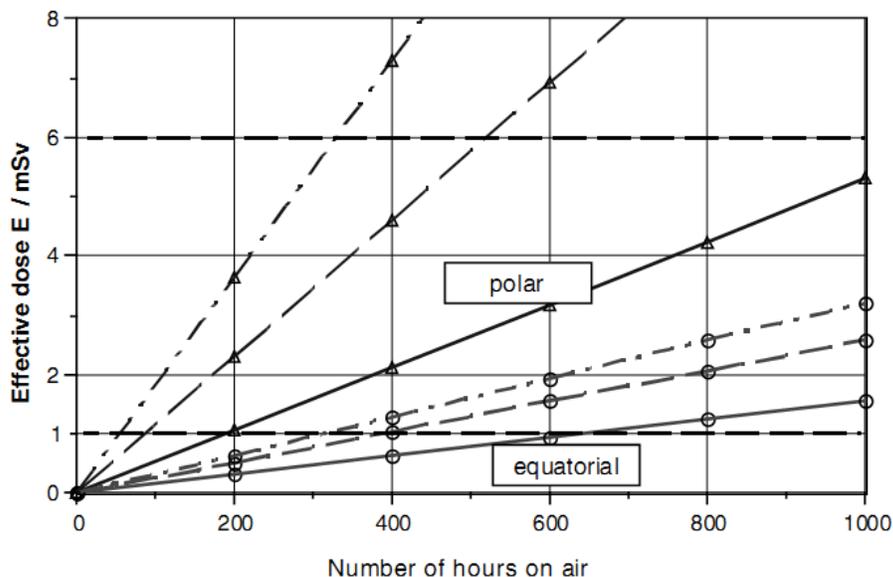


Figura 2. Relación entre dosis efectiva y horas de vuelo en viajes polares y ecuatoriales. Tomado de: Radiat Prot Dosimetry. 2006;118(2):182-189.

La atmósfera de la Tierra (altitud): Las Partículas de radiación cósmica cargadas pierden energía a medida que penetran la atmósfera terrestre. Estas partículas entran en las capas superiores de la atmosfera terrestre y al interactuar con los núcleos atmosféricos, se produce como resultado una cascada secundaria de partículas. De modo que la presencia de las mismas varia con la altitud (8), Este

aumento de radiación se da en 15% por cada 2.000 pies, siendo máxima en aproximadamente 20km sobre el nivel del mar (7) (el máximo Pfozter).

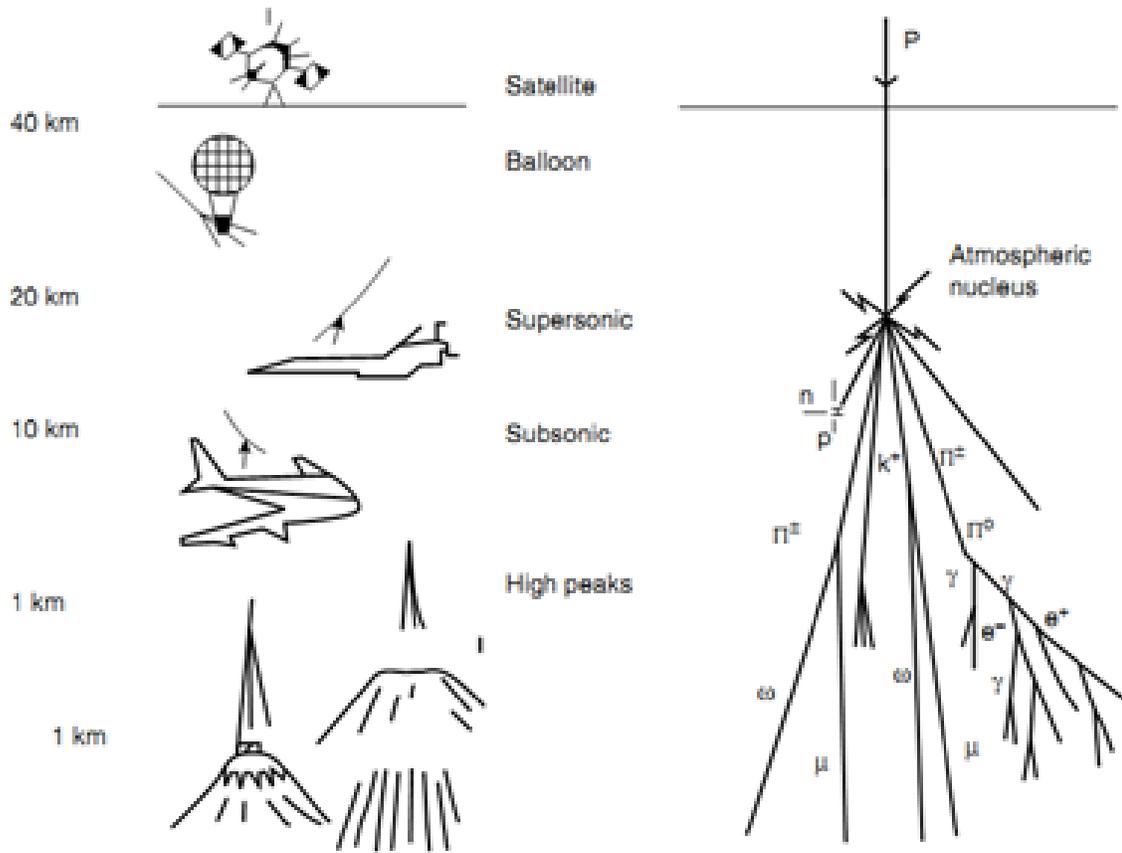


Figura 3. Producción de partículas secundarias en la atmosfera. Tomado de: **Fundamentals of aerospace medicine. 4th Ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2008. P. 221-234.**

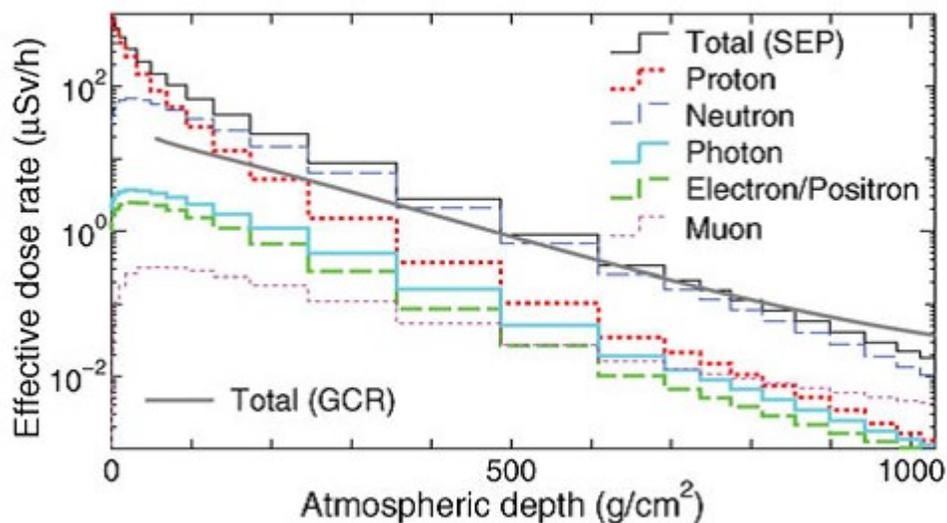


Figura 4. Dosis efectiva de cada partícula en relación con la profundidad atmosférica. Tomado de: *Radiat Prot Dosimetry*. 2014;161(1-4):274-278.

La profundidad atmosférica es mayor en el ecuador, está en relación a la masa de aire y es protectora, al igual que a nivel del mar (6). De esta manera, A mayor profundidad atmosférica menor dosis efectiva, ya que es protectora.

Otro factor adicional a tener en cuenta es la presencia de nubes. En un estudio realizado mediante simulación se observaron reducciones del orden de 5,5% en el flujo de neutrones y 3.6 % de la tasa de dosis recibida debido a la presencia de la nube (10).

#### Tormentas solares:

Los eventos de partículas solares son sucesos asociados con erupciones solares y eyecciones de masa coronal, que producen partículas de energía solar (2), lo suficientemente grandes como para contribuir a la radiación en altitudes de aviación. Ocasionalmente ingresan en el campo magnético terrestre y entran en la atmósfera, son cortos y se comportan de acuerdo al ciclo solar siendo más

frecuentes con el máximo solar (1). Durante este evento, la intensidad de la radiación cósmica en la atmósfera podría aumentar a un nivel extremadamente alto durante horas (11). Por ende, aunque son poco frecuentes incrementan en gran medida el nivel de exposición (11, 12)

La composición de estas partículas de energía solar es similar a la de RCG pues consiste en su mayoría en protones, algunas partículas alfa y unos pocos núcleos pesados, pero con un espectro de energía más leve. Estos eventos causan alteraciones en el campo magnético terrestre, interfieren con satélites y promueven la radiación a grandes altitudes. Aunque contribuyen a menos del 1% de la exposición total ocupacional, este tipo de exposición puede ser motivo de preocupación para algunos miembros de la tripulación aérea, como la tripulación de vuelo embarazada, para el que la dosis efectiva anual se limita a 1 mSv durante el resto del embarazo (2). Sin embargo, el líquido amniótico y la placenta pueden disminuir la exposición, por lo cual se ha considerado en mujeres embarazadas hasta 2 mSv

La corona solar es extremadamente caliente, con una temperatura cercana al millón de K. el viento solar contiene plasma altamente ionizado que interactúa con la incidencia de RCG en el sistema solar. El viento solar no es constante, e interactúa con RCG en tres formas (13):

1. Descensos rápidos: variaciones estadísticas de corto término
2. Decensos Forbush: variaciones de largo término, derivadas de nubes de plasma emitidas por el sol durante eyecciones de masa coronal.
3. Ciclo solar.

Las comunicaciones de radio de larga distancia a veces se interrumpen debido al aumento de la ionización de la atmósfera superior de la Tierra por los rayos X, los protones o la radiación ultravioleta del sol. Este mismo fenómeno es el responsable de la formación de auroras boreal y Australis (luces del norte y sur) por interacción con partículas cargadas con el aire en la atmósfera superior (1).

Cuando las energías de las partículas solares primarias son suficientes para producir partículas secundarias, estas son detectadas a nivel del suelo por los monitores de neutrones, mejor conocidos como ground level enhancement (GLE).

Los GLEs han sido registrados y analizados desde 1942, pero ninguno de ellos ha registrado una dosis anual de 1 mSv (excepto GLE5 febrero de 1956). Para GLE60, ocurrido en abril de 2001, la contribución total de la dosis de radiación de la EPSs fue medida como 20  $\mu$ Sv.

El GLE42, en septiembre de 1989, fue el más intenso observado desde 1956 (GLE5) con una magnitud registrada de 252%. Sin embargo, esto representa aproximadamente 1 mes de exposición a RCG, lo cual no habría dado una dosis anual de más de 1 mSv. Un Concorde de British Airways volaba durante este evento solar y el equipo de vigilancia a bordo no activó la alerta de advertencia de radiación, que se activa en dosis mayores a 0,5 mSv / h. Sin embargo, debe advertirse que el efecto de la latitud supera el efecto de la altitud en las EPSs y el Concorde no alcanzó latitudes magnéticas muy altas.

Un factor adicional en el análisis de los EPSs es el efecto de la anisotropía de la llamarada. Esto se refiere a la forma en que las partículas cargadas son transportadas a través de la magnetosfera de la Tierra. Las erupciones solares de baja anisotropía producen una exposición a radiación para áreas que tienen un blindaje magnético similar, mientras que los eventos altamente anisotrópicos producen exposiciones variables y son más difíciles de modelar. Los estudios en monitores de neutrones terrestres cuentan mediciones para latitudes geomagnéticas similares y por lo tanto experimentan características de blindaje similares, mostrando una respuesta muy distinta durante eventos anisotrópicos, lo que lleva a una variación en la dosis de radiación de las tripulaciones aéreas que puede ser significativa para la evaluación de la dosis (2).

## Física Fundamental de la radiación cósmica

### El espectro electromagnético:

El espectro electromagnético es el rango de todas las radiaciones electromagnéticas posibles. El espectro de un objeto es la distribución característica de la radiación electromagnética de ese objeto.

El espectro electromagnético se extiende desde las bajas frecuencias usadas para la radio moderna (extremo de la onda larga) hasta los rayos gamma (extremo de la onda corta), que cubren longitudes de onda de entre miles de kilómetros y la fracción del tamaño de un átomo (14).

<b>Región</b>	<b>Frecuencia(Hz ó ciclos/s)</b>	<b>Longitud de onda (m)</b>	<b>Energía del fotón(eV,<sub>promedio</sub>)</b>
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	$10^{10}$
Rayos-X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^5$
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^5$
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-3}$
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^{-5}$
Ondas de radio	$10^3 - 10^9$	$10^5 - 10^{-1}$	$10^{-10}$
Corriente alterna	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^5$	$10^{-15}$

Tabla 1. Espectro electromagnético (rangos aproximados). Tomado de: Fontal B, El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones, VII Escuela Venezolana Para la Enseñanza de la Química, Mérida. Diciembre 2005.

La radiación ionizante se refiere a partículas subatómicas que, en interacción con un átomo, directa o indirectamente pueden causar al átomo la pérdida de un electrón o rompen su núcleo (1).

La radiación solar es en gran parte la radiación óptica (energía radiante dentro de una amplia región del espectro electromagnético que incluye la radiación ultravioleta (UV), visible (luz) y la radiación infrarroja). La longitud de onda de la radiación UV (UVR) está en el intervalo de 100-400 nm de, y se subdivide UVA (315-400 nm), UVB (280 hasta 315 nm) y UVC (100 a 280 nm). El componente UV de la radiación terrestre del sol del mediodía comprende alrededor del 95% los rayos UVA y UVB del 5%; UVC y la mayoría de UVB se eliminan por el ozono estratosférico antes de llegar a la tierra (5).

Las fuentes de UVR se determinan en unidades radiométricas. Los términos de dosis ( $J / m^2$ ) y la tasa de frecuencia ( $W / m^2$ ) se refieren a la energía y la potencia, respectivamente, la cual una superficie por unidad de área de un objeto irradiado (5). La energía radiante entregada a un área determinada en un momento dado también se conoce como 'fluencia', 'dosis de exposición "y" dosis "(IARC, 1992).

Para medir la dosis efectiva, comúnmente en fotobiología cutánea se usa el "Mínimo Dosis de Eritema '(MDE), la cual se define como la exposición mínima a UVR suficiente para producir un eritema agudo en un margen de 24 horas. Cuando MDE es usado como unidad de dosis de exposición, el valor de sensibilidad solar usualmente elegido en es de  $200 J/m^2$  (5).

El Índice UV representa 40 veces el poder eritematógico efectivo del sol en  $W / m^2$  (tasa de frecuencia), considerándose en un rango de 0-12  $W/m^2$  sobre la superficie terrestre, donde valores por encima de 11 se consideran como extremos (5).

### Rayos x y rayos $\gamma$ :

Los rayos X son emitidos durante las transiciones en capas atómicas excitadas a bajos estados de energía: tienen características de espectro lineal del elemento correspondiente. Un espectro continuo de rayos X se produce cuando partículas cargadas, normalmente electrones, se desaceleran o desvían. Esto se conoce como "radiación de frenado" (5).

Los rayos X son utilizados con frecuencia en aplicaciones médicas y tecnológicas. El uso más común es como método diagnóstico en medicina, sin embargo, también es utilizado en radioterapia para destruir tejido maligno (5).

Los rayos  $\gamma$  son fotones usualmente emitidos durante transformaciones en núcleos atómicos. Tienen energías en el rango de 0,01 – 17,6 MeV. Esta energía puede ser producida también por el deterioro de partículas elementales, la aniquilación de pares electrón-positrón y la aceleración y desaceleración de electrones de alta energía en campos magnéticos cósmicos o en aceleradores elementales de partículas (5).

### Neutrones:

Los neutrones son partículas sin carga, las cuales junto con los protones forman los núcleos de los átomos. Mientras los rayos x y  $\gamma$  interactúan con electrones orbitales, los neutrones interactúan con el núcleo del átomo. Los neutrones son emitidos por los núcleos bien sea por interacción de radiación cósmica de alta energía con la atmósfera terrestre (10) o por fusión y fisión nuclear. Su energía varía de 10 MeV en partículas de fusión hasta valores muy elevados en partículas de fisión. Pueden ser producidos también por la colisión de partículas energéticamente cargadas con un material blanco apropiado. Los neutrones emitidos son usados para radiografía y radioterapia (5).

### Partículas $\alpha$ :

Estas partículas son emitidas del núcleo a través de un radionucleotido y consiste en dos protones dándose una carga de +2 y dos neutrones unidos entre si. Resultando en una masa atómica de 4. Así que en efecto estos son helio de alta energía (He). Su energía varía entre 4 y 8 MeV (5).

### Partículas $\beta$ :

Son partículas emitidas del núcleo de un radionucleótido y consisten en electrones o antielectrones con una masa de aproximadamente 0.00055 de una unidad de masa atómica. La radiación  $\beta^-$  (negatron) es el resultado de la conversión de un neutrón en un protón con la emisión de un electrón como resultado. La radiación  $\beta^+$  es el resultado de la conversión de un protón en neutrón y un antielectrón, cargado positivamente, conocido como positrón (5)

### Partículas primarias:

La radiación cósmica galáctica es la energía procedente de fuentes espaciales, en su mayoría es producida por supernovas. Esta radiación está compuesta en su forma primaria en un 98% por núcleos atómicos y 2% de electrones, y estos Núcleos a su vez están compuestos en un 87% de protones, 12% iones de helio y 1% iones pesados (1). La pérdida de energía al pasar a través de la atmosfera genera interacciones electromagnéticas al transferir energía a los electrones, lo cual conduce a una ionización. La tasa de perdida de energía aumenta rápidamente con el incremento de la carga de la partícula y la disminución de la velocidad. La distancia recorrida depende de la energía. Las partículas grandes son más penetrantes que las partículas ligeras con la misma carga y velocidad (1, 15).

Al entrar en la atmósfera de la Tierra, las partículas chocan con los núcleos de nitrógeno, oxígeno y otros átomos de la atmósfera, generando partículas de radiación ionizante (secundaria) adicionales. En altitudes normales de vuelos

comerciales, este RCG se compone principalmente de neutrones, protones, electrones, positrones, y fotones (1).

La energía de RCG está dada en unidades de megaelectrón voltios/unidad de masa atómica, siendo  $1 \text{ mMeV} / u = 9,64853336 \times 1.013 \text{ m}^2 / \text{s}^2$  en rangos que van hasta  $10000 \text{ MeV}/u$  con una media de  $1000 \text{ MeV}/u$  (1).

### **Términos de importancia:**

Eficacia Biológica Relativa (EBR): Tasa de dosis de un tipo particular de radiación (1, 16).

Factor de calidad, (Q): Factor que caracteriza la eficiencia biológica de un tipo de radiación, basado en la densidad de ionización a lo largo de las trazas de las partículas cargadas en tejido. Q se define como función de la transferencia lineal de energía sin restringir,  $L^\infty$  (a menudo representada por L o LET) de las partículas cargadas en agua (16):

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0,32L - 2,2 & 10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L} & L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \end{cases}$$

En la actualidad Q ha sido remplazado por el factor ponderante de radiación en la definición de la dosis del equivalente, pero continúa siendo empleado para el cálculo de las magnitudes operacionales empleadas en actividades de vigilancia.

Factor ponderante de radiación (WR): tiene en cuenta al factor Q: factor de 1 para partículas de baja LET como fotones, rayos x, gamma, electrones, muones (1, 16, 17)

Tipo de radiación R	Rango de energía	factor de calidad o ponderación, wR
Fotones, Electrones	Todas las energías	1
Neutrones	< 10 keV	5
	10-100 keV	10
	100 keV-2 MeV	20
	2-20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protones	< 20 MeV	5
Partículas Alfa, fisión		
Fragmentos, núcleos pesados		20

Tabla 2. Factores ponderantes de radiación. Tomado de: ANSI/ANS-6.4.3-1991 (1991)

Tejido	Factor ponderante del tejido, wT	Suma del valor de wT
Médula osea, colon, pulmon, estomago, seno, resto de los tejidos*	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie osea, cerebro, glandulas salivales, piel	0,01	0,04
Total		1

\*Resto de los tejidos: Suprarrenales, región extratorácica, vesícula biliar, corazón, riñones, nodulos linfáticos, musculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, uretra/cervix.

Tabla 3. Factores ponderantes recomendados en tejidos. Tomado de: Radiol Prot. 2008 Jun;28(2):161-8.

Exposición (X): Las magnitudes y unidades de exposición son las encargadas de valorar la capacidad de ionización que posee un haz de radiación. Por esta razón, la magnitud de exposición se define como el cociente (16):

$$X = dQ / dm$$

Donde dQ es el valor absoluto de la carga total de todos los iones de un mismo signo producidos en el aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones absorbidos en la masa dm hayan sido detenidos completamente en el aire. Sus unidades están dadas en ergios/gramo de tejido y se conocen como roentgenio (R).

Dosis absorbida (D): es la la magnitud física fundamental, dada por (16):

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Donde  $d\bar{\epsilon}$  es la energía media impartida a la masa  $dm$  por la radiación ionizante. La unidad SI es el  $J\ kg^{-1}$  y su nombre especial es gray (Gy).

$\begin{aligned} 1\ \text{rad} &= 100\ \text{ergios/gramo} \\ 1\ \text{Gy} &= 100\ \text{rad.} \end{aligned}$
---

(18)

La dosis absorbida es una magnitud medible y existen estándares primarios para determinar su valor. La definición de dosis absorbida tiene el rigor científico requerido para una magnitud física básica

La dosis equivalente al tejido (HT): es el producto de la dosis absorbida (D) y el factor de calidad (Q O QF), siendo Q dependiente de LET (1, 18).

La dosis en un órgano o tejido T dada por (16):

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

donde  $D_{T,R}$  es la dosis absorbida media debida al tipo de radiación R en el órgano o tejido T, y  $w_R$  es el factor de ponderación de radiación. Como  $w_R$  no tiene dimensiones, la unidad de la dosis equivalente es la misma que para la dosis absorbida,  $J\ kg^{-1}$ , y su nombre especial es sievert (Sv).

Dosis efectiva (E): Suma ponderada por tejido de las dosis equivalentes en todos los tejidos y órganos especificados del cuerpo, dada por la expresión (16):

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{o} \quad E = \sum_T w_T H_T$$

Donde  $H_T$  o  $w_R D_{T,R}$  es la dosis equivalente en el órgano o tejido T, y  $w_T$  es el factor de ponderación de tejido. La unidad para la dosis efectiva es la misma que para la dosis absorbida,  $J\ kg^{-1}$ , y su nombre especial es sievert, (Sv).

Equivalente de dosis (H): El producto de D por Q en un punto de un tejido, donde D es la dosis absorbida y Q el factor de calidad para la radiación existente en ese punto, así pues (16):

$$H = DQ$$

La unidad para el equivalente de dosis es el julio por kilogramo ( $J\ kg^{-1}$ ), y su nombre especial es sievert (Sv).

Equivalente de dosis ambiental,  $H^*(10)$ : El equivalente de dosis ambiental en un punto de un campo de radiación que se produciría por el correspondiente campo alineado y expandido en la esfera ICRU a una profundidad de 10 mm y sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado (16). La unidad del equivalente de dosis ambiental es el  $J\ kg^{-1}$  y su nombre especial es sievert (Sv).

Equivalente de dosis personal,  $H_p(d)$ : Es una magnitud operacional: el equivalente de dosis en tejido blando (comúnmente interpretado como “la esfera ICRU”) a una profundidad apropiada, d, por debajo de un punto especificado del cuerpo humano. La unidad del equivalente de dosis personal es el julio por kilogramo ( $J\ kg^{-1}$ ) y su unidad especial es el sievert (Sv). El punto especificado está usualmente determinado por la posición en la que se porta el dosímetro individual (16).

### **Radiación de alta LET:**

Neutrones, partículas alfa, fragmentos de fisión. Los neutrones representan aproximadamente la mitad de la dosis de radiación a grandes altitudes (3).

Los neutrones son las partículas dominantes entre 10000 y 80000 pies (1, 15), 40 – 60% de la tasa de radiación total (1). Producen radiación de alta LET y por esto son más eficientes en la producción de daño biológico que los rayos gamma.

### **Principales unidades de medida en radiación:**

La unidad básica de radioactividad es el Becquerel (Bq): decadencia de núcleos por segundo (1).

La dosis absorbida se mide en Grey (Gy), la unidad antigua usada era el Rad.  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$  (18).

Para el efecto biológico de dosis de radiación se utiliza la unidad Sievert (Sv) (16).

Las dosis de radiación cósmica se miden generalmente en microSievert (Sv) por hora o mili-Sievert (mSv) por año ( $1 \text{ mSv} = 1,000 \text{ Sv}$ ) (1, 18).

El Sievert ha sustituido al rem como la unidad de medida de la dosis efectiva ( $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ,  $1 \text{ mSv} = 100 \text{ mrem}$ ,  $1 \text{ Sv} = 0,1 \text{ mrem}$ ) (1, 18).

### **Otras fuentes terrestres de radiación ionizante:**

Existe un predominio de radiaciones de bajo LET (93%). El radón inhalado contribuye en  $2 \text{ mSv/yr}$  del total de estas radiaciones ionizantes de origen terrestre, los rayos x dependen de la imagen y el sitio de impacto. La dosis recibida de la radioterapia para el tratamiento del cáncer está en el rango de 20 a 80 Sv (1).

### **Protección radiológica:**

Las personas que trabajan expuestas a rayos x se denominan “trabajadores clasificados” y su exposición es constantemente monitorizada y deben ser educados para evitar posibles accidentes. Distinto pasa en el campo aeroespacial donde no se trata de accidentalidad y la exposición es algo inevitable. El límite máximo de dosis efectiva de  $20 \text{ mSv/yr}$  en un promedio de 5 años con un máximo de 50 mSv

en 1 solo año (ICRP). En el caso del feto la dosis no debe ser mayor de 1 mSv durante el tiempo de la gestación. El límite para la población general es de 1 mSv/yr (1).

Dosis limite recomendada en situaciones de exposicion planificadas		
Clase de limite	Ocupacional, mSv en un año	Público, mSv en un año
Dosis efectiva	20, en un promedio de 5 años, sin que presente mas de 50 mSv en un año	1 (excepcionalmente, un valor mayor de dosis efectiva podria ser permitido en un año, siempre y cuando el promedio en 5 años no exceda 1 mSv en un año)
Dosis equivalente a los globos oculares*	20, en un promedio de 5 años, sin que presente mas de 50 mSv en un año	1
Dosis equivalente a la piel	500	50
Dosis equivalente a manos y pies	500	
* Modificado de: ICRP. Statement on tissue reactions. April 21, 2011		

Tabla 4. Dosis limite recomendadas en situaciones de exposicion planeadas. **Tomado de: J Radiol Prot. 2008 Jun;28(2):161-8, 35.ICRP. Statement on tissue reactions. April 21, 2011.**

En el Reino unido, la unión europea y Canadá, los trabajadores con niveles de exposición superiores a 6 mSv/yr deben ser referidos a un nivel de control (7).

De acuerdo con el tipo de rutas y la frecuencia de vuelos, los niveles de exposición pueden ser similares a los de la industria nuclear (2). En 1991, la ICRP recomendó que la exposición de miembros de tripulación de Vuelo a radiación cósmica en aviones a reacción deba ser considerada como parte de la exposición ocupacional a radiación ionizante (19).

En 1994 la FAA reconoció formalmente que las tripulaciones de las compañías aéreas están ocupacionalmente expuestas a la radiación ionizante, y recomendó que se les informe acerca de su exposición a radiación, los riesgos de salud asociados, y se les de asistencia en la toma informada decisiones con respecto a su entorno de trabajo (1).

Siguiendo las recomendaciones de la ICRP en su publicación 60, la unión europea introdujo una directiva de estándares básicos de seguridad, la cual incluye fuentes naturales de radiación ionizante teniendo en cuenta la radiación cósmica como exposición ocupacional. Debido a esto se han desarrollado varios proyectos en Europa con el fin de realizar mediciones a las aeronaves y modelizar la exposición en altitudes de vuelo (20).

En Alemania, la Directiva 96/29 / EURATOM fue implementado por la modificación de la Ordenanza de Protección contra la Radiación en el año 2001, el artículo 103 de los cuales establece las medidas para la protección radiológica de los miembros de la tripulación (21).

El campo de radiación varía de acuerdo a la altitud. Por lo tanto, las medidas de interés son la tasa de dosis ambiente equivalente ( $H(10)$ ) y la dosis efectiva ( $E$ ) la cual es obtenida mediante cálculos (22).

A pesar de que los tripulantes estén advertidos de calcular sus dosis anuales de GCR por lo general no lo hacen. Todos ellos reciben dosis de radiación en cada viaje, y algunos reciben dosis extra por eventos de protones solares (SPE), eventos de neutrones solares (SNE), eventos de rayos gamma solares (SGE) y destellos terrestres de rayos gamma (TGF) (15).

La FAA recomienda el límite para un miembro de la tripulación de un promedio de dosis efectiva a 5 años de 20 mSv / año, con no más de 50 mSv en un solo año. Para embarazo un máximo de 1 mSv/yr y no más de 0,5 mSv en 1 solo mes (1).

La unión europea tiene en cuenta las recomendaciones de la ICRP determinando que individuos con exposiciones mayores a 1 mSv/yr deben tomar mediciones periódicas de su radiación. La Directiva Europea indica que la exposición a la radiación de un miembro de la tripulación en embarazo debe ser " tan baja como sea razonablemente posible " (ALARA) (1).

Rangos de dosis efectiva, mSv (aguda o anual)	Características	Requerimientos	Ejemplos
20 a 100	Controlada por acción en la vía de exposición	Considerar reducir dosis	Nivel de referencia para emergencia radiológica
1 a 20	Controlada por acción en la fuente o vía de exposición	Para situaciones de exposición planeada, evaluación de la dosis individual y entrenamiento	Restricciones para exposición ocupacional. Restricciones para edredones y cuidadores de pacientes tratados con radiofármacos. Nivel de referencia para radón en viviendas.
<1	Controlada por acción en la fuente	Chequeos periódicos en la vía de exposición	Restricciones para exposición pública en situaciones planeadas

Tabla 5. Marco de referencia para dosis restringidas y niveles de referencia. **Tomado de: J Radiol Prot. 2008 Jun;28(2):161-8.**

La influencia de las estructuras y el contenido de las aeronaves no es un factor insignificante en cuanto a protección. El uso de una distribución angular permite una mejor descripción del campo de radiación en el avión. La contribución de partículas dirigidas hacia arriba se encuentra reducida dentro de la tripulación, mientras que la de partículas dirigidas hacia abajo se encuentra incrementada. Los valores generalmente resultan menores a los calculados en la atmósfera libre, especialmente en la cabina de pasajeros (22).

### **Radiación cósmica en aviación comercial:**

#### Medición de la dosis de Radiación Cósmica en Aviación:

La ICRP considera que la radiación cósmica en aviación debe ser evaluada y registrada teniendo en cuenta la presencia de todo tipo de partículas. El Concorde voló en 1969 y entró en servicio con Air France y British Airways en 1976, retirándose en 2003. Estos tenían un equipo de vigilancia radiológica permanente debido a las altitudes en que volaban (60000 pies). Fue el único avión equipado con estos equipos (1).

B 747-400, A330, A340, A380, B787 realizan vuelos largos, transpolares y transiberianos ocasionalmente por lo cual se encuentran expuestos en mayor medida a GCR (1). Teniendo en cuenta que cruzan por regiones con distintas profundidades atmosféricas por periodos prolongados de tiempo

La GCR puede ser medida activa o pasivamente. Un medidor activo de lectura directa (activo) mide los valores inmediatamente o después de un pequeño retraso mientras que uno pasivo necesita ser evaluado en un laboratorio después del vuelo (1, 5).

La dosis efectiva no puede ser medida directamente, pero la dosis ambiente equivalente puede ser un buen estimador de la dosis efectiva recibida de radiación cósmica.

Sería recomendable el uso de dosímetros por los miembros de la tripulación, sin embargo, estos dosímetros pasivos son poco sensibles. Los datos pueden ser alterados por radiaciones recibidas fuera del vuelo (1, 7).

La evaluación real de la exposición en el lugar de trabajo de la tripulación aérea presenta desafíos únicos para la industria aeronáutica. Enfoques dosimétricos convencionales de dosimetría pasiva personal o vigilancia área con instrumentación fija serían muy costosos y difíciles de manejar.

Alternativamente, teniendo en cuenta que la exposición de la tripulación aérea en una determinada ruta es relativamente constante (excepto por la posibilidad de eventos esporádicos de partículas de energía solar SEP) esta exposición puede ser conocida en base a modelos con conocimiento teórico y/o experimental de una ruta determinada. Un programa de estos con adecuadas verificaciones periódicas sería una opción de mucho menor costo. De acuerdo con la comisión europea y la ICRP este es el método preferido para la evaluación de la exposición de tripulación aérea en la unión europea y Canadá. Las tasas de dosis que pueden ser derivadas de cualquiera de los modelos teóricos están en correlación de la altitud, la latitud geomagnética y la modulación solar (7).

Se han creado diversos programas de computador para el cálculo de la dosis efectiva de GCR, teniendo en cuenta los diferentes factores como las coordenadas geográficas de los aeropuertos de origen y destino, longitud y latitud de todos los puntos de la pista que recorre la aeronave, altitud en todo momento del vuelo, potencial Heliocéntrico, para dar cuenta de la actividad solar, fecha y hora de vuelo, la calidad del campo de radiación a través del cual la aeronave vuela (1).

CARI-6 (<http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp>) es el más usado, desarrollado por FAA, basado en código LUIN. Se limita al componente del rayo cósmico galáctico, que es isotrópico y de espectro constante fuera de la heliosfera (1).

En Europa se creó el European Programme Package for the Calculation of Aviation Route Doses (EPCARD), el cual usa código FLUKA, también es isotrópico y de espectro constante fuera de la heliosfera (19).

La administración de aviación francesa utiliza The Systeme d'Information et d'Evaluation par Vol del'Exposition au Rayonnement cosmique dans les Transport aeriens (SIEVERT) (<http://www.sievert-system.org>) (15) y En Canadá se utiliza (PCAIRE) ([www.pcaire.com](http://www.pcaire.com)).

En un estudio hecho en la republica checa, se realizaron mediciones con unidad móvil de dosimetría (MDU) en diferentes rutas y se compararon con EPCARD y CARI 6 encontrando que no había diferencias significativas entre las mediciones (23)

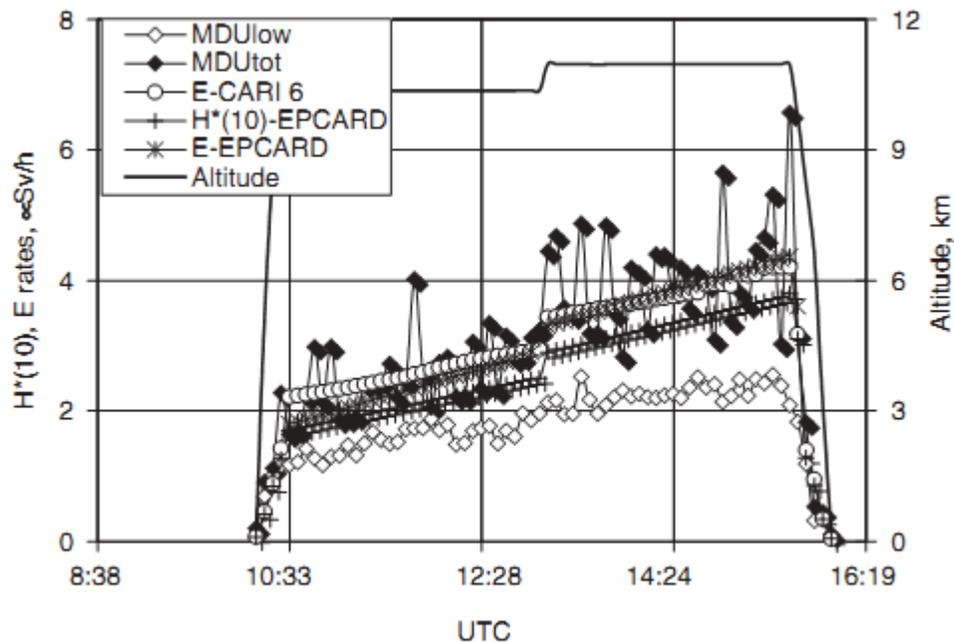


Figura 5. Perfiles de vuelo, ruta Dubai – Praga comparando CARI - 6 y EPCARD. Tomado de: *Radiat Prot Dosimetry*. 2005;116(1-4 Pt 2):316-319.

Otro estudio (Beck. Et al.) Realizo mediciones durante eventos de partículas solares, encontrando que los valores calculados de  $H^*(10)$  de la exposición a radiación asociada a rango GLE muestra una dosis total de 5mSv para vuelos supersónicos y cerca de 1 mSv para vuelos subsónicos cruzando regiones polares. Además, evidencio que el factor Q es significativamente mayor durante periodos de GLE que en condiciones normales de radiación cósmica y la dosis en GLE es levemente mayor en los polos que en la región ecuatorial (20).

#### Dosis de radiación cósmica recibida por ocupantes de aeronaves:

Dosis efectivas anuales para tripulación de vuelo se han estimado que pueden estar en el orden de 2 - 5 mSv y pueden alcanzar 75 mSv al final de su carrera (9). Sin embargo, la exposición depende de la ruta, la altitud y tipo de aeronave. Para las operaciones en el hemisferio norte, las tasas de dosis equivalentes ambientales medias se han medido en la región van desde 1-3 uSv/h en vuelos de corto radio,

pasando por 4-5 uSv/h en vuelos de largo radio, hasta 12-15 uSv/h en vuelos supersónicos.

En el reino unido se tiene un valor máximo operacional de 900 hrs/año. Teniendo en cuenta esta norma la exposición varía desde 1-2 mSv/año en vuelos de corto radio hasta 5,4 mSv/año en rutas transpolares de gran altitud (1).

Estudios de la Administración Federal de Aviación ( FAA) estiman que la exposición a radiación cósmica de pilotos de líneas aéreas en América del Norte varía del 3 al 5 mSv por año (4).

En un estudio realizado en la republica checa entre 1998 y 2008 (Malušek, Et al) se encontró que la dosis efectiva anual promedio estuvo en el rango de 1,2 a 2,0 mSv con seguimiento de la tendencia del ciclo solar (24).

Para un vuelo transatlántico desde Frankfurt a Vancouver la dosis media por hora se puede calcular en el orden de 4  $\mu$ Sv durante una alta actividad solar y se eleva a unos 5,5  $\mu$ Sv en momentos de baja actividad solar. (9)

En un estudio realizado mediante un cuestionario en 5898 participantes (Anderson Et al) se encontró una dosis media anual estimada de 2.5 mSv (25). Otro estudio en 544 participantes (Kojo, Et al) Evidencio una dosis media anual de 3,1 mSv (mediana 3,2mSv; rango 0,9-9.5 mSv) (26).

En rutas intercontinentales en altura de crucero superior a 10000 m, se estima que la exposición media acumulativa es de 3 mSv/ año, con un rango de 1 a 10 mSv/año. La cual es superior a la dosis límite anual recomendada por la ICRP de 1 mSv/año (3). Las rutas de mayor exposición son: Dubai – los angeles: 5,76 mSv/año y New york – athenas : 6,3  $\mu$ Sv/hr.

En el caso de pasajeros de población general el límite es de 1 mSv por año lo que equivale a unas 100 hrs/año en concord o 200 hrs/año en otras aeronaves en vuelos transecuatoriales subsónicos. Ocasionalmente los pasajeros que vuelan por

negocios pueden exceder este límite por lo que deben aplicar en límites ocupacionales (20 mSv/año) (1).

### **Epidemiología de Tripulantes de los aviones comerciales:**

Pukkala et al encontró una incidencia de melanoma superior en pilotos de aerolínea que en la población general. SIR Melanoma 2,3 (IC 95% 1,7-3,0) (27).

Sanlorenzo et al encontró en un meta análisis que Pilotos y tripulantes de cabina tienen aproximadamente el doble de la incidencia de melanoma en comparación con la población general. SIR melanoma 2,21 (1,76-2,77) (28).

Buitenhuis et al. Encontró que la exposición ocupacional a radiación ionizante a diferentes niveles en diagnósticos posteriores a 2009 no incrementó el riesgo de cáncer de mama. Al parecer la exposición ocupacional a radiación ionizante incrementa el riesgo de HER 2 (factor de crecimiento epidermal humano 2 ) y ER (receptor estrogénico) positivos para cáncer de mama, con una asociación estadísticamente significativa de HER2 en mujeres premenopáusicas. (OR = 2.57; 95% CI, 1.09 to 6.03). No se encontró respuesta asociada a dosis, probablemente porque pocos casos estuvieron expuestos a dosis altas. El riesgo podría ser más evidente después de una exposición durante 10 años o más (29).

Weiderpass et al encontró un incremento no significativo en el riesgo de cáncer de mama en mujeres postmenopáusicas (standardized incidence ratio, 1.25; 95% CI, 0.76 to 2.04) (30)

Shaham et al encontró una asociación entre exposición ocupacional y aumento del riesgo de cáncer de mama (OR = 5.3; 95% CI, 2.4 to 14.1) (muestra n=20 controles=7) (31)

Sigurdson et al observaron en una revisión extensa un moderado aumento en el riesgo de cáncer de mama (32).

Yong et al. La dosis de radiación acumulada estimada se asoció con mortalidad por cáncer del SNC, pero no con la mortalidad por melanoma maligno (33).

Reglamentación:

**RAC. Numeral 4.17.1.5. Limitaciones al tiempo de vuelo:**

Las limitaciones al tiempo de vuelo se ajustarán a las horas máximas señaladas en las tablas que aparecen a continuación y que se interpretan de la siguiente forma:

SECTOR: La porción de una asignación de vuelo, comprendida entre un despegue y el siguiente aterrizaje.

PILOTOS: Cantidad de pilotos necesarios o asignados para un vuelo.

**GRUPOS DE AERONAVES:**

[A] Aeronaves a reacción de transporte y turbohélices de cuatro motores.

[B] Otras aeronaves Máximas horas de vuelo a.

Sectores	Pilotos	Grupo A	Grupo B
6 o menos	2	9:00	9:00
	3	14:00	14:00
	4	18:00	18:00
7	2	8:00	8:30
	3	13:00	13:00
	4	17:00	17:00
8	2	--	8:30
	3	12:00	12:00
	4	15:00	15:00
9	2	--	8:00
	3	10:00	11:00
	4	12:00	12:00
10	2	--	8:00
	3	--	11:00
	4	--	12:00
Más de 10	1	--	7:00

Tabla 6. Máximas horas de vuelo para pilotos en un día. 36. **RAC. Numeral 4.17.1.5. Limitaciones al tiempo de vuelo**

**QUINCENA** Todas las aeronaves cincuenta (50) horas

**MES** Todas las aeronaves noventa (90) horas

**TRIMESTRE** Todas las aeronaves doscientas setenta (270) horas

**AÑO** Todas las aeronaves B: mil (1000) horas

## **2. OBJETIVOS:**

Estimar y comparar la dosis efectiva de radiación ionizante a la que se encuentra expuesto el personal de vuelo mediante los diferentes programas EPCARD, PCAIRE y CARI-6 en distintas rutas nacionales e internacionales de aviación comercial en Colombia, con el fin de conocer el nivel de riesgo ocupacional en el que se encuentran.

Realizar una comparación entre los resultados encontrados y las mediciones realizadas

## **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

**3.1** Aplicar los distintos software o programas

**3.2** Presentar varios escenarios de exposición

**3.3** estimar la cantidad de radiación ionizante en distintos escenarios de aviación según tiempo de exposición

## **4. METODOLOGIA:**

a. Tipo de estudio: es un estudio descriptivo de corte transversal

- b. población y muestra: se tomaron como muestra las rutas de vuelos nacionales e internacionales de aerolíneas colombianas que operan rutinariamente en el aeropuerto internacional el Dorado de Bogotá estableciendo valores estándar para el cálculo de la dosis como son: el, así como el techo operacional definido para cada aeronave que se tomara como altitud de crucero y los tiempos de ascenso y descenso mínimos de acuerdo a la altitud de los aeropuertos entre los que se realiza el vuelo.
- c. VARIABLES UTILIZADAS: Código OACI para cada uno de los aeropuertos, como fecha para el cálculo de los datos se tomó el 01 de julio de 2017, fecha en condiciones cercanas a mínimo solar, tiempo total de vuelo en minutos obtenido del promedio encontrado en flightradar para cada uno de los vuelos, la altitud de crucero que para el presente estudio está determinada por el techo operacional de la aeronave, la altitud del aeropuerto de despegue, así como el de aterrizaje, mediante lo cual junto con el régimen de ascenso y descenso se determinan los tiempos en ascenso y descenso. El tiempo en crucero será el resultado del tiempo total menos la suma de los tiempos de ascenso y descenso. En el caso de los vuelos que por su corta distancia no alcanzaban el techo operacional con un régimen de ascenso de 1500 pies por minuto (fpm) se definió como crucero la máxima altitud para que se tuviera por lo menos un minuto en ella con el régimen de ascenso definido.

Régimen de ascenso: 1500 fpm

Régimen de descenso: 1500 fpm

Techo operacional	Aeronave
A318	39370
A319	39370
A320	39370
A330	40682
AT45	25000
AT46	25000
AT76	25000
B737	41010
B787	42900
E140	37000
E170	41000
E190	41000
JS41	26001

(A)

Aeronave	Techo operacional
A318	39370
A319	39370
A320	39370
A330	40682
B737	41010
B787	42900
E190	41000

(B)

Tabla 7. Techo operacional para cada una de las aeronaves en vuelos nacionales (A) e internacionales (B)

- d. Calculo de la dosis absorbida: se realizó el cálculo de dosis absorbida en cada una de las rutas definidas a través de distintos programas existentes para su estimación como son EPCARD, PCAIRE, CARI-6, en estos se agregó el código OACI tanto del aeropuerto de origen como el de destino, se tomó el promedio de vuelo encontrado en flightradar y de esta manera se calculó el tiempo de ascenso y descenso teniendo en cuenta el régimen para cada uno de 1500 pies/minuto y la altura de los aeropuertos tanto de origen como de destino, tomando estos tiempos y restándolos al total se encuentra el tiempo en crucero, estos software arrojan resultados en microSievert. estos datos son tabulados en Excel y convertidos a miliSievert, posteriormente se calcula el número máximo de vuelos por año de acuerdo a los parámetros establecidos por la Aeronáutica Civil como límite anual de 1000 horas y el tiempo de vuelo de cada ruta, para posteriormente obtener dosis anual en mSv/año.

3.4. Consideraciones éticas: El presente estudio es realizado únicamente en bases teóricas mediante la búsqueda de evidencia en

bases de datos y la utilización de programas informáticos para la estimación de la dosis, en ningún momento se requerirá de la intervención en seres humanos como parte del estudio.

El estudio se realizará de acuerdo con la resolución 8430 de 1993 Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud.

3.5. análisis estadístico: Las mediciones serán tabuladas utilizando software Excel 2013. Posteriormente se realizará comparación mediante con los datos obtenidos en cada uno de los sistemas de medición (EPCARD, PCAIRE, CARI-6).

## **5. PRESUPUESTO:**

Honorarios investigadores: 4'000.000 COP

Impresiones, fotocopias y demás materiales: 500.000 COP

## **6. RESULTADOS**

Las rutas internacionales que mostraron mayor exposición a radiación cósmica galáctica (RCG) fueron Bogotá – Londres con dosis entre 5,13 y 5,82 mSv/año, Bogotá – New York entre 4,04 y 5,27 mSv/año y Bogotá – Barcelona con una dosis entre 4,04 y 4,63 mSv/año. Las rutas internacionales que evidenciaron menor exposición fueron Bogotá – Quito con valores entre 1,79 y 2,12 mSv/año y Bogotá – Ciudad de Panamá entre 1,78 y 2,03 mSv/año.

Respecto a las rutas nacionales, las que mostraron mayor exposición fueron Bogotá – San Andrés con una dosis entre 2,39 y 2,7 mSv/año, Bogotá – Leticia entre 2,13 y 2,35 mSv/año y Bogotá – Riohacha entre 1,87 y 2,09

mSv/año, mientras que las de menor exposición fueron Bogotá – Ibagué con 0,34 mSv/año y Bogotá – Armenia entre 0,2 y 0,58 mSv/año

## **7. DISCUSIÓN:**

Los resultados observados en este trabajo evidencian una exposición dentro de los rangos esperados para población ocupacionalmente expuesta, pero sin exceder los límites establecidos por la ICRP (16). Nuestros resultados en rutas internacionales no distan muchos de los que encontrados por Air France en donde han observado una exposición de ente 3 y 4 mSv/año por 750 horas de vuelo (37) mientras que en nuestro estudio encontramos una exposición para rutas internacionales entre 1,78 y 5,82 mSv/año por 1000 horas de vuelo que extrapolando a 750 horas nos daría entre 1,34 y 4,37 mSv/año teniendo en cuenta que los vuelos con mayores dosis fueron los que cubrían rutas hacia regiones más polares, si tenemos en cuenta únicamente vuelos hacia regiones fuera del trópico, encontramos valores entre 2,08 a 4,37 mSv/año para 750 horas. En cuanto a las rutas nacionales los valores oscilan entre 0,2 y 2,70 mSv/año por 1000 horas de vuelo, siendo entre 0,15 y 2,03 mSv/año para 750 horas de vuelo y 0,14 a 1,94 mSv/año para 720, lo cual se acerca más a lo encontrado en el estudio de Alves y Marios donde se hallaron dosis entre 1,5 y 1,8 mSv/ año en un periodo de 720 h (42) o el de Federico y colaboradores con dosis entre 1,4 – 1,6 mSv/año (43). Estos valores de exposición menores en vuelos nacionales podrían explicarse por el nivel de exposición más bajo presente a nivel ecuatorial, siendo entre 2-4 uSv/h en regiones ecuatoriales, mientras que en regiones polares esta entre 5 y 8 uSv/h (38). Se puede además observar al comparar

entre los vuelos más cercanos al trópico pero que se encuentran en zonas polares, como son Miami al norte y Buenos Aires al sur, que la dosis para los vuelos hacia el norte es mayor, aun siendo más corto el vuelo, esto podría explicarse por la inclinación terrestre durante la fecha en las que fueron determinadas las mediciones en el estudio ya que por inclinación terrestre en esta época el hemisferio norte se encuentra más expuesto.

Con respecto a otras profesiones expuestas a radiación de fuentes naturales como la minería, los resultados dentro del escenario planteado en el presente estudio en la mayor parte de las rutas evidencian una exposición más elevada, encontrando una dosis absorbida en el orden de 1 mSv/año por 2000 horas de exposición para la práctica minera (38).

En comparación con otras el ejercicio de la práctica médica, de acuerdo con los datos del reporte UNCEAR 2000, la dosis anual calculada en el presente estudio fue muy similar para un porcentaje considerable de las rutas a la encontrada para trabajadores en radiodiagnóstico con 1,4 mSv/año, radioterapia con 1,38 mSv/año, medicina nuclear 1,68 mSv/año y práctica médica en general con 1,3 mSv/año (39). Así mismo, respecto a la exposición industrial que actualmente ronda alrededor de 0,51 mSv/año (40), e incluso la encontrada en trabajadores de centrales nucleares que se encuentra en el orden de 1 – 1,5 mSv/año (41), esto teniendo en cuenta las medidas que se han tomado en los distintos lugares de trabajo para reducir dicha dosis, ya que en años anteriores las dosis eran mucho mayores, principalmente en operaciones de reactor donde se alcanzaban dosis de hasta 11 mSv/año (41). Es importante tener en cuenta las recomendaciones dadas por la ICRP como se observa en la figura 8 (44).

	<b>individuos expuestos</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>Caegoría de exposición</b>
Nivel de referencia a ser seleccionado en el rango de 5 a 10 mSv/año	viajeros ocasionales	Información general	Pública*
	viajeros frecuentes	Información general	
		Autoevaluación de dosis	
		Ajuste en la frecuencia de vuelos según sea apropiado	
	Tripulación aérea	Información individual	Ocupacional
		Estimación de la dosis individual	
		Registro de dosis individual	
No requiere vigilancia médica adicional específica			
	Ajuste de cronogramas de vuelo según sea apropiado		
* Algunos grupos de viajeros frecuentes pueden ser manejados en forma similar a aquellos ocupacionalmente expuestos caso por caso según las circunstancias prevalcientes			

Tabla 8. Recomendaciones de la ICRP para los individuos expuestos a radiación cósmica en aviación. Tomado de: **ICRP ref 4842-6832-5414, July 2015**

## 8. Limitaciones:

Las principales limitaciones de este estudio corresponden al hecho de estar basado en datos estándar (techo operacional, régimen de ascenso y descenso) y mediciones anuales volando en una única ruta lo cual no sucede en la vida real donde los pilotos cambian de rutas y no siempre vuelan hasta el límite permitido de horas. Además, mediante el uso de variables teóricas dentro de los softwares aplicados al estudio no se puede determinar diferencias entre miembros de la aeronave como son pasajeros, auxiliares de vuelo y pilotos, quienes reciben una dosis extra por parte de la radiación ultravioleta.

## 9. Conclusiones:

- El presente estudio es concordante con los datos dentro de la misma región, obteniendo mayores valores de exposición en vuelos que se dirijan a zonas más polares.
- Las tripulaciones de aviación que vuelan en rutas de mediano y largo radio evidencian dosis similares a otras poblaciones como minería, medicina, industria y trabajadores de centrales nucleares, mientras que para los de corto radio la dosis fue más baja lo cual evidencia la importancia del tiempo en crucero además de la altitud alcanzada para los vuelos de mayor radio.
- En ninguna de las rutas se encontró un valor por encima de los rangos permitidos por la ICRP.
- Los softwares utilizados representan una herramienta útil para la estimación de dosis en población ocupacionalmente expuesta.
- Es importante continuar realizando más estudios en la región mediante la utilización de bitácoras reales de vuelo para obtener mediciones más exactas, o bien con el uso de dosímetros en las aeronaves.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. Davids J, Johnson R, Stepanek J, Fogarty J. Fundamentals of aerospace medicine. 4<sup>th</sup> Ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2008. P. 221-234.
2. Al Anid H, Lewis BJ, Bennett LG, Takada M, Duldig M. Aircrew radiation dose estimates during recent solar particle events and the effect of particle anisotropy. *Radiat Prot Dosimetry*. 2014;158(3):355-67.
3. Bolzán AD, Bianchi MS, Giménez EM, Flaqué MC, Ciancio VR. Analysis of spontaneous and bleomycin-induced chromosome damage in peripheral lymphocytes of long-haul aircrew members from Argentina. *Mutat Res*. Mar 2008;639(1-2):64-79.
4. Silva R, Folgosa F, Soares P, Pereira AS, Garcia R, Gestal-Otero JJ, Et al. Occupational cosmic radiation exposure in Portuguese airline pilots: study of a possible correlation with oxidative biological markers. *Radiat Environ Biophys*. 2013 May;52(2):211-20.
5. IARC, monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. vol 100 D. Lyon: ©International Agency for Research on Cancer; 2012.
6. Sato T, Kataoka R, Yasuda H, Yashiro S, Kuwabara T, Shiota D, Kubo Y. Air shower simulation for WASAVIES: warning system for aviation exposure to solar energetic particles. *Radiat Prot Dosimetry*. 2014;161(1-4):274-278.
7. Lewis B, Bennett LG, Green A, Butler A, Desormeaux M, Kitching F, et al. Aircrew dosimetry using the Predictive Code for Aircrew Radiation Exposure (PCAIRE). *Radiat Prot Dosimetry*. 2005;116(1-4 Pt 2):320-326.
8. Beck P, Bartlett D, Lindborg L, McAulay I, Schnuer K, Schraube H, Spurny F. Aircraft crew radiation workplaces: Comparison of measured and calculated ambient dose equivalent rate data using the EURADOS in-flight radiation data base. *Radiat Prot Dosimetry*. 2006;118(2):182-189.
9. Zeeb H, Hammer GP, Blettner M. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *J Radiol Prot*. 2012 Mar;32(1):N15-9. doi: 10.1088/0952-4746/32/1/N15. Epub 2012 Mar 6.

10. Pazianotto MT, Federico CA, Cortés-Giraldo MA, Pinto ML, Gonçalez OL, Quesada JM, Et al. Influence of clouds on the cosmic radiation dose rate on aircraft. *Radiat Prot Dosimetry*. 2014 Oct;161(1-4):279-83.
11. Yasuda H, Sato T, Yonehara H, Kosako T, Fujitaka K, Sasaki Y. Management of cosmic radiation exposure for aircraft crew in Japan. *Radiat Prot Dosimetry*. 2011 Jul;146(1-3):123-5.
12. Anderson JL, Mertens CJ, Grajewski B, Luo L, Tseng CY, Cassinelli RT 2nd. Flight attendant radiation dose from solar particle events. *Aviat Space Environ Med*. 2014 Aug;85(8):828-32
13. O'Brien K, Felsberger E, Kindl P. Application of the heliocentric potential to aircraft dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry*. 2005;116(1-4 Pt 2):336-42.
14. Fontal B, *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*, VII Escuela Venezolana Para la Enseñanza de la Química, Mérida. Diciembre 2005
15. Bramlitt ET, Shonka JJ. Radiation exposure of aviation crewmembers and cancer. *Health Phys*. 2015 Jan;108(1):76-86.
16. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Ann ICRP*. 2007;37(2-4):1-332.
17. Wrixon AD. New ICRP recommendations. *J Radiol Prot*. 2008 Jun;28(2):161-8.
18. Alcaraz, M. *Magnitudes y Unidades radiológicas*. Febrero 20, 2015.
19. Mares V, Maczka T, Leuthold G, Ruhm W. Air crew dosimetry with a new version of EPCARD. *Radiat Prot Dosimetry*. 2009;136(4):262-266.
20. Beck P, Bartlett DT, Bilski P, Dyer C, Flückiger E, Fuller N, et al. Validation of modelling the radiation exposure due to solar particle events at aircraft altitudes. *Radiat Prot Dosimetry*. 2008;131(1):51-8.

21. Wissmann F, Burmeister S, Dönsdorf E, Heber B, Hubiak M, Klages T, Et al. Field calibration of dosimeters used for routine measurements at flight altitudes. *Radiation Protection Dosimetry* 140(4): 319-325; 2010.
22. Ferrari A, Pelliccioni M, Villari R. A mathematical model of aircraft for evaluating the effects of shielding structure on aircrew exposure. *Radiat Prot Dosimetry*. 2005;116(1-4 Pt 2):331–335.
23. Begusova M, Turek K, Vlcek B. Aircrew dosimetry by means of experimental measurements and calculations: results obtained during the year 2003. *Radiat Prot Dosimetry*. 2005;116(1-4 Pt 2):316-319.
24. Malušek A, Ploc O, Kovář I, Brabcová K, Spurný F. Routine individual monitoring of aircraft crew exposure; Czech experience and results 1998-2008. *Radiat Prot Dosimetry*. 2011 Mar;144(1-4):684-7.
25. Anderson JL, Waters MA, Hein MJ, Schubauer-Berigan MK, Pinkerton LE. Assessment of Occupational Cosmic Radiation Exposure of Flight Attendants Using Questionnaire Data. *Aviat Space Environ Med*. Nov 2011;82(11):1049-54.
26. Kojo K, Aspholm R, Auvinen A. Occupational radiation dose estimation for Finnish aircraft cabin attendants. *Scand J Work Environ Health* 2004; 30 : 157 – 63 .
27. Pukkala E, Aspholm R, Auvinen A, Eliasch H, Gundestrup M, Haldorsen T. Et al. Cancer incidence among 10,211 airline pilots: a Nordic study. *Aviat Space Environ Med*. 2003 Jul;74(7):699-706.
28. Sanlorenzo M, Wehner MR, Linos E, Kornak J, Kainz W, Posch C, Et al. The risk of melanoma in airline pilots and cabin crew: a meta-analysis. *JAMA Dermatol*. 2015 Jan;151(1):51-8.
29. Buitenhuis W, Fritschi L, Thomson A, Glass D, Heyworth J, Peters S. Occupational Exposure to Ionizing Radiation and Risk of Breast Cancer in Western Australia. *J Occup Environ Med*. Dec 2013;55(12):1431-1435.
30. Weiderpass E, Pukkala E, Kauppinen T, et al. Breast cancer and occupational exposures in women in Finland. *Am J Ind Med*. 1999; 36:48–53.

31. Shaham J, Gurvich R, Goral A, Czerniak A. The risk of breast cancer in relation to health habits and occupational exposures. *Am J Ind Med.* 2006;49:1021–1030.
32. Sigurdson AJ, Ron E. Cosmic radiation exposure and cancer risk among flight crew. *Cancer Invest.* 2004;22:743–76
33. Yong LC, Pinkerton LE, Yiin JH, Anderson JL, Deddens JA. Mortality among a cohort of U.S. commercial airline cockpit crew. *JAMA Dermatol.* 2015; 151(1): 51–58.
34. Durante M, George K, Wu H, et al. Karyotypes of human lymphocytes exposed to high-energy iron ions. *Radiat Res* 2002; 158:581–590.
35. ICRP. Statement on tissue reactions. April 21, 2011
36. RAC. Numeral 4.17.1.5. Limitaciones al tiempo de vuelo
37. Desmaris G. Cosmic radiation in aviation: radiological protection of Air France aircraft crew. *Ann ICRP.* 2016 Jun;45(1 Suppl):64-74.
38. K. Ulbak. Occupational radiation protection in workplaces involving exposure to natural radiation. Proceedings of an International Conference, Geneva, 26–30 August 2002
39. J. Liniecki. Occupational radiation protection in medicine. Proceedings of an International Conference, Geneva, 26–30 August 2002
40. B.C. Bhatt. occupational radiation protection in industrial and research facilities. Proceedings of an International Conference, Geneva, 26–30 August 2002
41. A.P. Panfilov. Occupational radiation protection in nuclear facilities. Proceedings of an International Conference, Geneva, 26–30 August 2002
42. Alves JG, Mairos JC. In-flight dose estimates for aircraft crew and pregnant female crew members in military transport missions. *Radiat Prot Dosimetry.* 2007;125(1-4):433-7.
43. Federico CA, Gonçalves OL, Agostino GM, Ehlin LV. Effects of Cosmic Radiation in Aircrafts: A Discussion about Aircrew over South America. *J. Aerosp. Technol. Manag.* vol.4 no.2 São José dos Campos Apr./June 2012
44. J. Lochard, Jf Bottollier, W.Ruhm, DT Barlett, R Hunter, H Yasuda, S mundigl. Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP ref 4842-6832-5414, july 2015.

## 11. ANEXOS

RUTA	Código OACI	Aeronave	Dosis por año							
			CARI-6	PCAIRE						
						Montería	SKMR	A319	1,42	1,11
						Montería	SKMR	A320	1,38	1,13
Apartadó	SKLC	AT46	ND	1,25		Neiva	SKNV	JS41	0,62	1,14
Arauca	SKUK	E170	ND	ND		Neiva	SKNV	AT76	0,58	1,14
Armenia	SKAR	A320	0,58	0,20		Pasto	SKPS	A318	1,53	1,18
Barrancabermej	SKEJ	AT76	0,70	1,15		Pasto	SKPS	AT46	0,89	0,78
Barranquilla	SKBQ	A319	1,69	1,94		Pereira	SKPE	A319	0,44	2,22
Barranquilla	SKBQ	A320	1,74	1,88		Pereira	SKPE	A320	0,54	2,07
Bucaramanga	SKBG	A320	0,71	1,65		Pereira	SKPE	A320	0,54	2,07
Bucaramanga	SKBG	A320	0,74	1,61		Pitalito	SKPI	AT46	ND	1,07
Bucaramanga	SKBG	A319	0,64	1,71		Popayán	SKPP	JS41	0,93	0,86
Cali	SKCL	A319	0,72	1,54		Popayán	SKPP	AT76	0,85	0,86
Cali	SKCL	A320	0,67	1,59		Puerto Asis	SKAS	AT46	ND	0,88
Cartagena	SKCG	B787	1,67	1,83		Puerto Carreño	SKPC	AT46	ND	1,21
Cartagena	SKCG	B737	1,69	1,80		Puerto Inírida	SKPD	E170	ND	1,13
Cartagena	SKCG	A320	1,63	1,80		Quibdó	SKUI	JS41	0,66	1,32
Cartagena	SKCG	A319	1,60	1,83		Quibdó	SKUI	AT46	0,61	1,32
Corozal	SKCZ	AT46	ND	0,97		Rioacha	SKRH	A320	1,87	2,09
Cúcuta	SKCC	A319	1,06	1,50		San Andrés Isla	SKSP	B737	2,55	2,65
Cúcuta	SKCC	A320	1,12	1,43		San Andrés Isla	SKSP	A320	2,39	2,70
Florencia	SKFL	AT46	0,75	0,98		San Andrés Isla	SKSP	A319	2,40	2,67
Florencia	SKFL	AT76	0,76	0,95		San Andrés Isla	SKSP	A320	2,42	2,62
Ibagué	SKIB	AT76	0,34	ND		San José del Gu	SKSJ	AT46	0,72	1,06
Ipiales	SKIP	AT46	0,92	1,03		Santa Marta	SKSM	A320	1,72	2,00
La Macarena	SKNA	AT46	ND	ND		Santa Marta	SKSM	A320	1,74	1,97
Leticia	SKLT	A319	2,13	2,35		Santa Marta	SKSM	A319	1,82	1,88
Leticia	SKLT	A320	2,16	2,30		Saravena	SKSA	AT46	ND	ND
Manizales	SKMZ	AT76	0,68	1,33		Tumaco	SKCO	AT46	0,84	1,17
Medellin	SKRG	A320	0,62	1,50		Valledupar	SKVP	A320	1,54	1,89
Medellin	SKRG	A319	0,62	1,50		Valledupar	SKVP	A319	1,54	1,89
Medellin	SKRG	A320	0,60	1,45		Villagarzón	SKVG	AT46	ND	0,83
Medellin*	SKMD	AT46	0,73	1,00		Villavicencio	SKVV	AT76	0,53	ND
Mitú	SKMU	AT46	ND	1,37		Yopal	SKYP	A318	0,83	0,92
Montería	SKMR	A320	1,49	1,07		Yopal	SKYP	A319	0,40	1,33
						Yopal	SKYP	JS41	0,73	0,80

Tabla 9. Dosis estimada para rutas nacionales

RUTA	Código OACI	Aeronave	Dosis por año		
			CARI-6	PCAIRE	EPCARD
Asuncion	SGAS	A330	3,05	2,70	ND
Barcelona	LEBL	B789	4,53	4,63	4,04
Boston	KBOS	A319	4,69	4,23	3,58
Buenos aires	SAEZ	B787	3,46	2,91	2,74
Cancun	MMUN	B737	3,38	2,77	2,61
Cancun	MMUN	A320	3,15	2,80	2,64
Cancun	MMUN	A320	3,16	2,76	2,59
Caracas	SVMI	B737	2,25	2,54	ND
Ciudad de Guatemala	MGGT	A318	2,97	2,56	2,49
Ciudad de México	MMMX	B737	3,58	2,90	2,64
Ciudad de México	MMMX	A320	3,34	2,90	2,64
Ciudad de Panamá	MPTO	B737	1,94	1,91	ND
Ciudad de Panamá	MPTO	E190	2,03	1,81	ND
Ciudad de Panamá	MPTO	A320	1,78	2,00	ND
Ciudad de Panamá*	MPPA	A320	ND	ND	ND
Ciudad de Panamá*	MPPA	B737	ND	ND	ND
Fort Lauderdale	KFLL	A320	3,40	3,06	2,78
Guayaquil	SEGU	A330	1,94	2,59	ND
La Habana	MUHA	B737	3,45	2,77	2,64
La Habana	MUHA	A320	3,23	2,77	2,64
La Paz	SLLP	A319	2,82	2,38	2,22
Lima	SPIM	A330	2,62	2,31	2,10
Lima	SPIM	A320	2,52	2,24	2,04
Lima	SPIM	A320	2,54	2,17	1,97
Londres	EGLL	B787	5,82	5,34	5,13
Los Angeles	KLAX	B787	4,66	4,21	4,09
Los Angeles	KLAX	A330	4,28	4,21	3,64
Madrid	LEMD	B790	4,45	4,50	4,23
Miami	KMIA	A330	3,53	3,21	2,95
Miami	KMIA	A320	3,38	3,05	2,80
Miami	KMIA	A320	3,38	3,05	2,80
Montevideo	SUMU	A330	3,21	2,97	2,57
Montevideo	SUMU	A319	3,07	2,72	2,35
Nueva York	KJFK	B788	5,27	4,40	4,04
Nueva York	KJFK	A330	4,84	4,30	3,95
Oranjestad	TNCA	B737	2,42	2,17	ND
Oranjestad	TNCA	A320	2,25	2,24	ND
Oranjestad	TNCA	A320	2,33	2,10	ND
Orlando	KMCO	A320	3,57	3,30	3,10
Punta Cana	MDPC	B737	2,98	3,15	2,59
Punta Cana	MDPC	A320	2,80	3,15	2,59
Quito	SEQU	B737	2,12	1,79	1,79
Quito	SEQU	A330	2,10	1,79	1,79
Quito	SEQU	A320	2,02	1,79	1,79
Rio de Janeiro	SBGL	A330	3,11	2,75	2,22
San Juan	TJSJ	A320	2,84	3,12	2,80
San Salvador	MSLP	A320	2,77	2,55	2,43
Santiago	SCEL	B787	3,39	2,77	2,34
Santiago	SCEL	A319	2,99	2,70	2,29
Santo Domingo	MDSD	A320	2,77	3,09	2,69
São Paulo	SBGR	A330	3,12	2,68	2,26
Washington D.C.	KIAD	A319	4,42	4,22	4,18
Willemstad	TNCC	A319	2,45	2,04	ND

Tabla 10. Dosis estimada para rutas internacionales

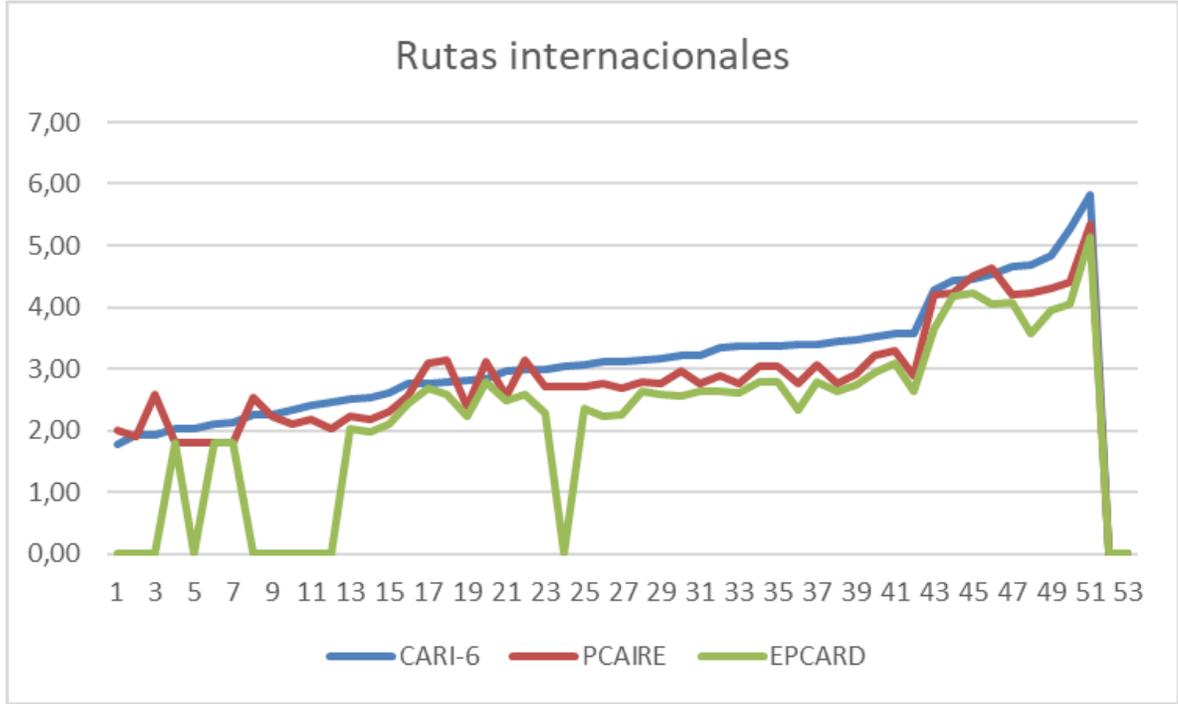


Figura 6. Dosis media estimada en vuelos internacionales

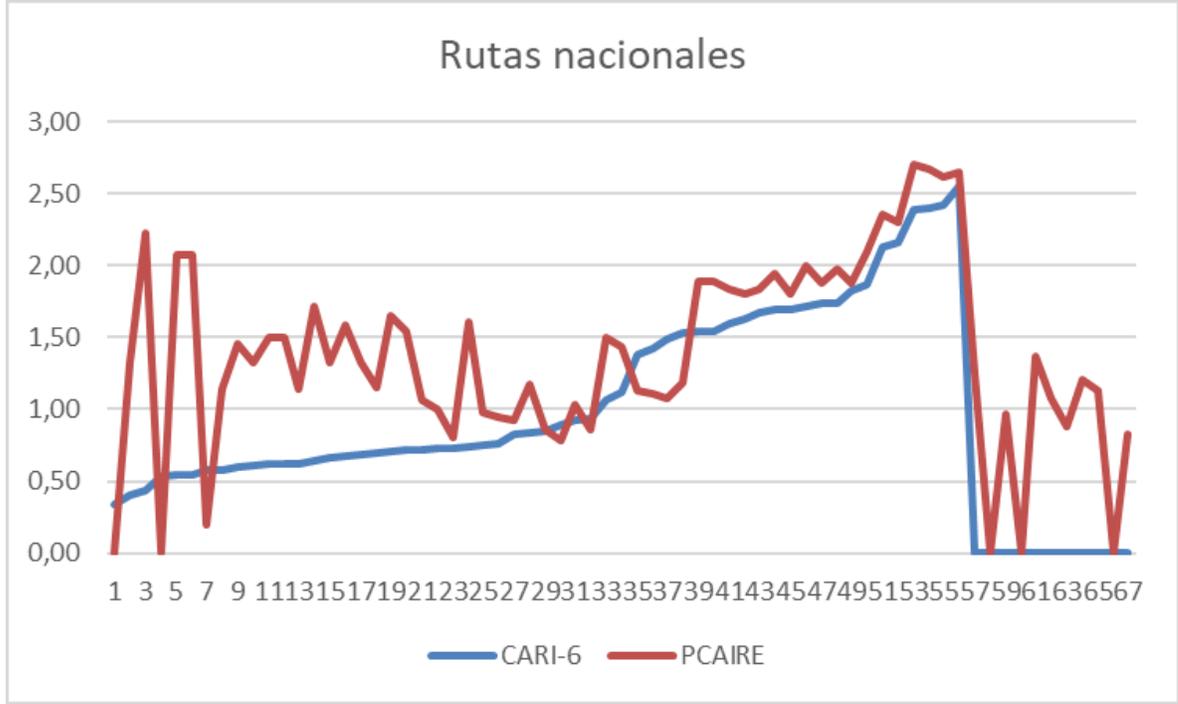


Figura 7. Dosis media estimada en vuelos nacionales

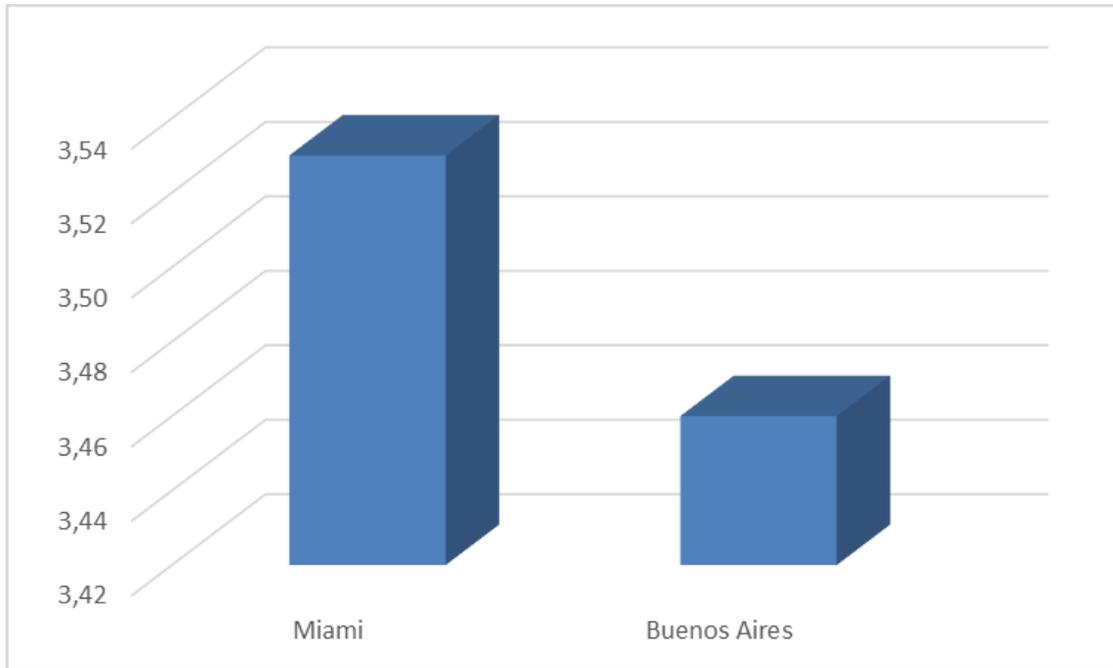


Figura 8. Dosis estimada en la ruta polar más cercana al trópico en latitud norte (Miami), comparada con dosis en ruta polar más cercana al trópico en latitud sur (Buenos Aires).

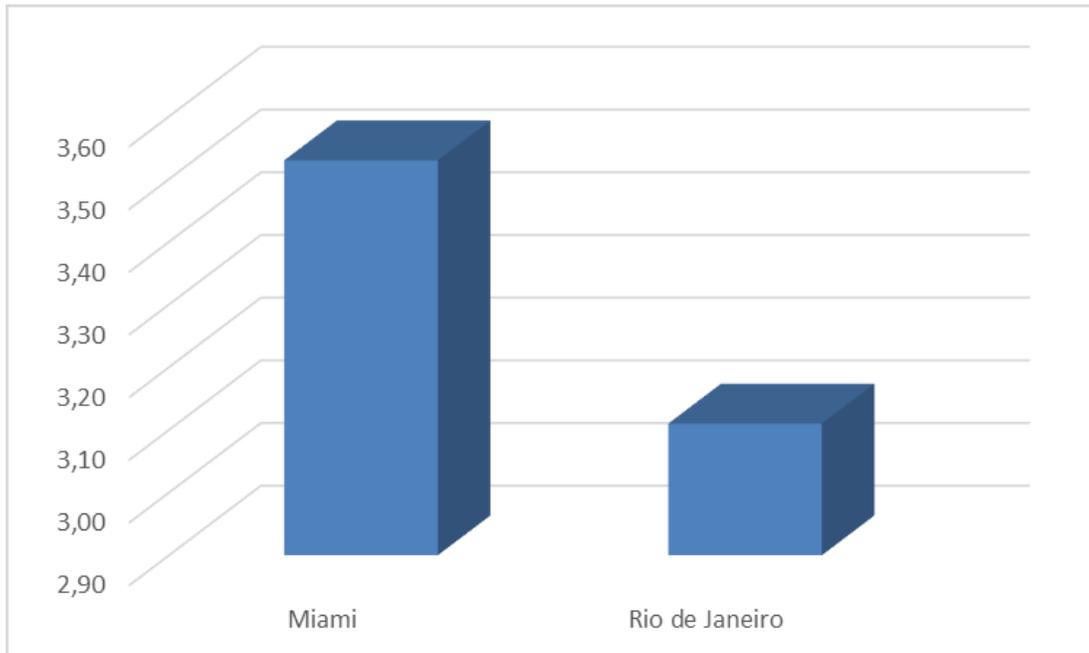


Figura 9. Dosis estimada en la ruta polar más cercana al trópico (Miami), comparada con dosis estimada en ruta más cercana al polo dentro del trópico