



# **EVALUACIÓN DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA DE LOS SISTEMAS DE SEMICONTENCIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS SÓLIDOS DEL ÁREA GESTIÓN EZEIZA**

## **ESCENARIO DE DISRUPCIÓN POR CAIDA DE AVIÓN**

**Del Carmen, A., Tangir, D. y Perri, M.**



**PROGRAMA NACIONAL GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS  
Sección Evaluación y Planificación Ambiental**



**El Centro Atómico Ezeiza está ubicado al oeste y en las adyacencias del Aeropuerto Internacional de Ezeiza "Ministro Pistarini". Dicho Aeropuerto cuenta con tres pistas: 11/29, 17/35, 5/23 (en la actualidad solo se encuentran operativas las dos primeras)**



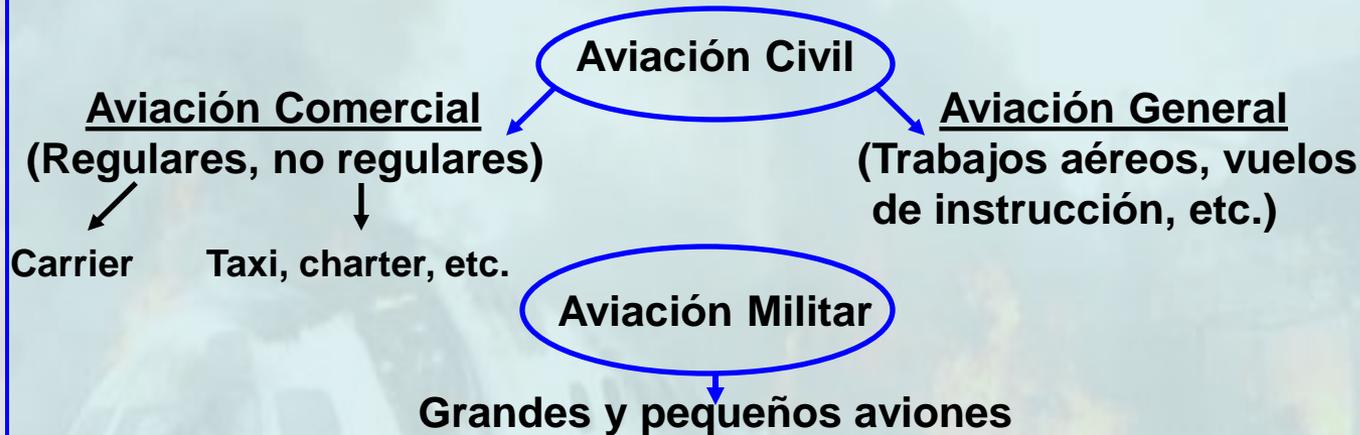
**El AGE y específicamente las trincheras objeto de la presente evaluación, se encuentran por debajo del eje del cono de aproximación de aeronaves de la pista 11/29, a una distancia de aproximadamente 3782 metros (entre la T2 y el centro de la pista)**

# La posibilidad de caída de un avión en las cercanías de un aeropuerto depende de los siguientes factores



Número de pistas operativas del aeropuerto

## Categorías y subcategorías de vuelos



Movimiento aéreo anual del aeropuerto  
(despegues y aterrizajes por pistas, por categoría y subcategorías de vuelos)

Distancia del lugar crítico respecto de las pistas

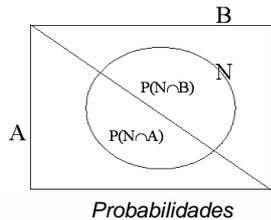
Dimensiones del lugar crítico

Debido al riesgo que implica la ubicación del AGE con respecto al aeropuerto, se plantea el escenario de interrupción de las trincheras por caída de avión

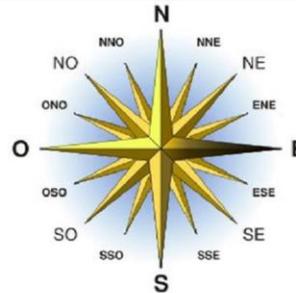


El estudio se realiza en cuatro etapas

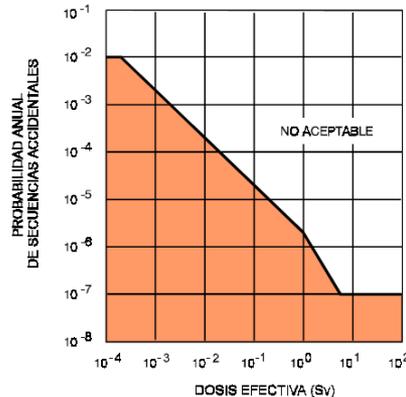
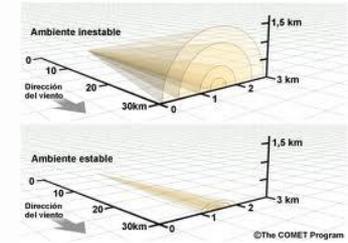
Estimación de la frecuencia de impactos de aviones por año sobre las trincheras



Estimación de las frecuencias de dirección del viento hacia el grupo crítico



Determinación de las dosis al grupo crítico debidas a la caída de un avión sobre las trincheras



Utilización de la curva criterio para el público que enfrenta la probabilidad de secuencias accidentales contra la dosis efectiva obtenida



# Estimación de la frecuencia de impactos de aviones por año sobre las trincheras



La frecuencia de impactos por año **NO ES UNA PROBABILIDAD** es un valor esperado. Es el número promedio de impactos que se pueden esperar por año

Se obtiene pesando cada valor poblacional posible (valor que toma la variable) por su probabilidad de ocurrencia

*X = "Número de aviones por año que impactan en una instalación"*

$$P(\{1 \text{ o mas impactos}\}) = P(\{1 \text{ impacto}\}) + P(\{2 \text{ impactos}\}) + P(\{3 \text{ impactos}\}) + \dots$$

$$E(\text{numero de impactos}) = 1.P(\{1 \text{ impacto}\}) + 2.P(\{2 \text{ impactos}\}) + 3.P(\{3 \text{ impactos}\}) + \dots$$

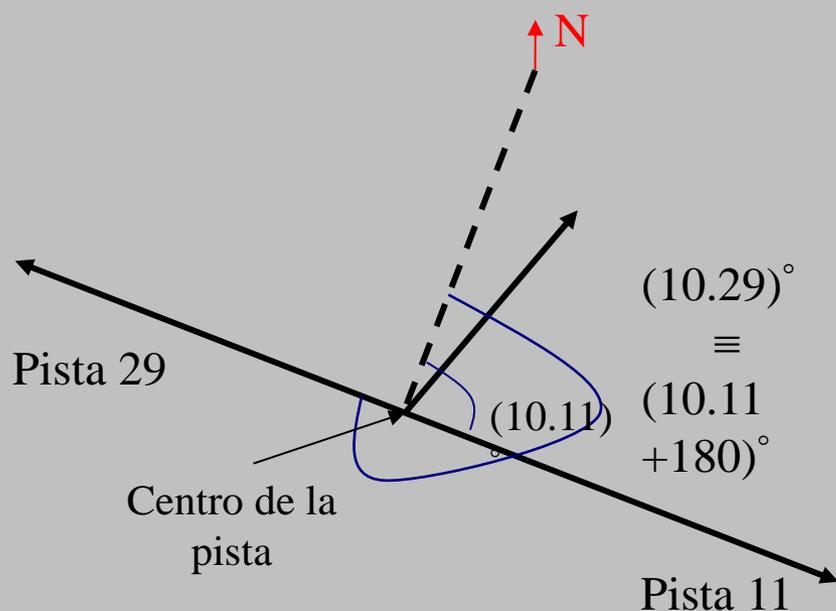
$$P(\{1 \text{ o mas impactos}\}) \leq E(\text{numero de impactos})$$

Se estimó la frecuencia de impactos por año sobre T1 y T2 para luego ser utilizada como cota superior de la P({1 o mas impactos sobre T1 y T2}) utilizando la fórmula de cuatro factores propuesta por el DOE

$$F = \sum_{ijk} N_{ijk} \cdot P(T/G)_{ij} \cdot P(G/I)_{ijk} \cdot P(I)_{ij}$$

*DOE STANDARD Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities  
U. S Department of Energy, Washington, DC 20585.  
Area Saft, October 1996*

Área efectiva



La designación del número de pista multiplicado por 10 indica aproximadamente el ángulo que la pista, considerada en la dirección de vuelo, forma con el norte magnético.

Así, por ejemplo, la pista 11/29, es la misma pista con opuestas direcciones de vuelo y forman un ángulo de  $110^\circ$  y  $290^\circ$  con el norte magnético respectivamente

**El área efectiva representa el área rodeando la instalación tal que si un avión impactara en este área, ya sea por un impacto directo**

**footprint o shadow**

$$A_f = (WS + R) \cdot H \cdot \cot \phi + \frac{2 \cdot L \cdot W \cdot WS}{OR} + L \cdot W$$

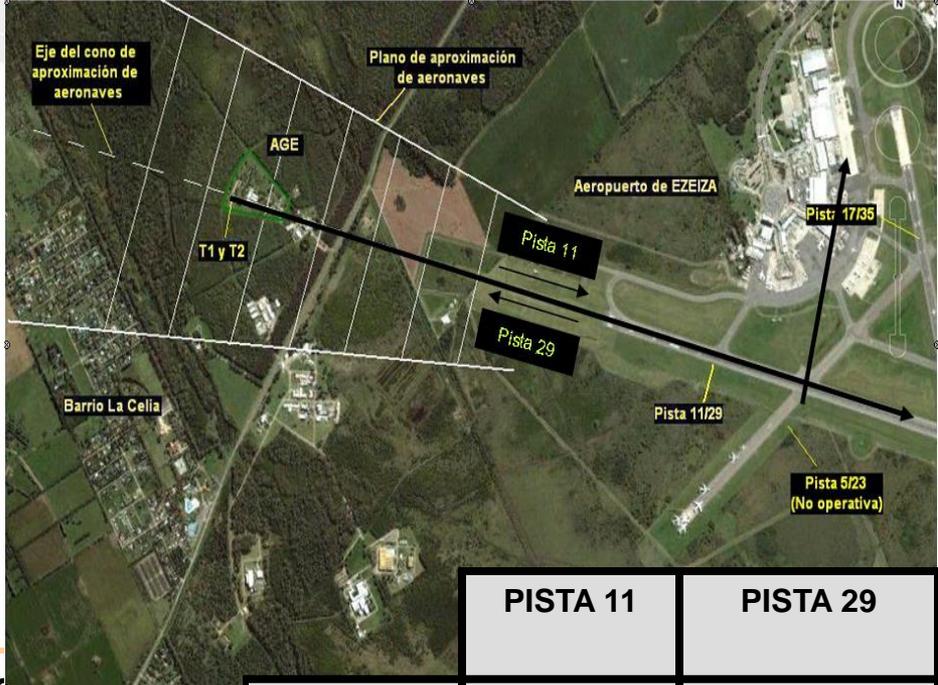
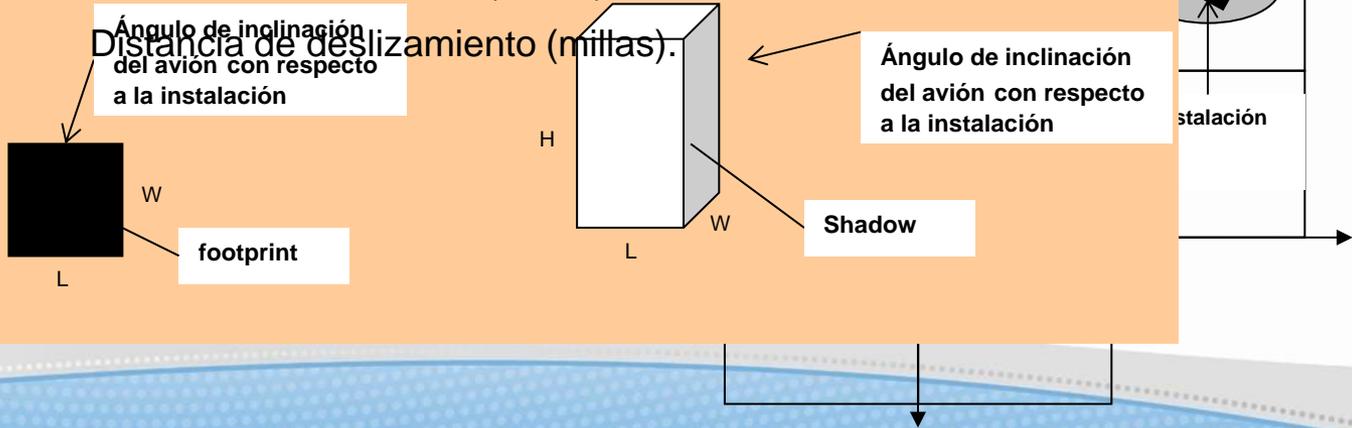
**como consecuencia de un deslizamiento posterior a un impacto en la cercanía, afectaría a la instalación**

**en la cercanía, afectaría a la instalación**

$$A_s = (WS + R) \cdot S$$

**El footprint es el área del suelo cubierto por la instalación y el shadow el área de la instalación en la cual el avión impactaría en su descenso si su altura fuera distinta de cero.**

**(si su altura fuera cero este área se desestima)**



	PISTA 11	PISTA 29
X (en millas)	-2.35	2.35
Y (en millas)	0	0



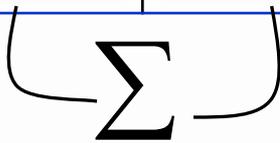
ÁREA EFECTIVA $A_{eff}$ (millas cuadradas)	Aviación General	Aviación Comercial (Carrier)	Aviación Comercial (Taxi)	Aviación Militar	
				Despegues	Aterrizajes
	4.618E-03	3.218E-02	2.974E-02	2.395E-02	1.608E-02

Frecuencia de impactos por año sobre la instalación para cada pista	Pista 11	Pista 29
	2.674 E-05	1.022 E-05



Frecuencia de impactos por año sobre T1 y T2

**3.696E-05**



**$P(\{1 \text{ o más impactos sobre T1 y T2}\}) \leq 3.696E-05$**

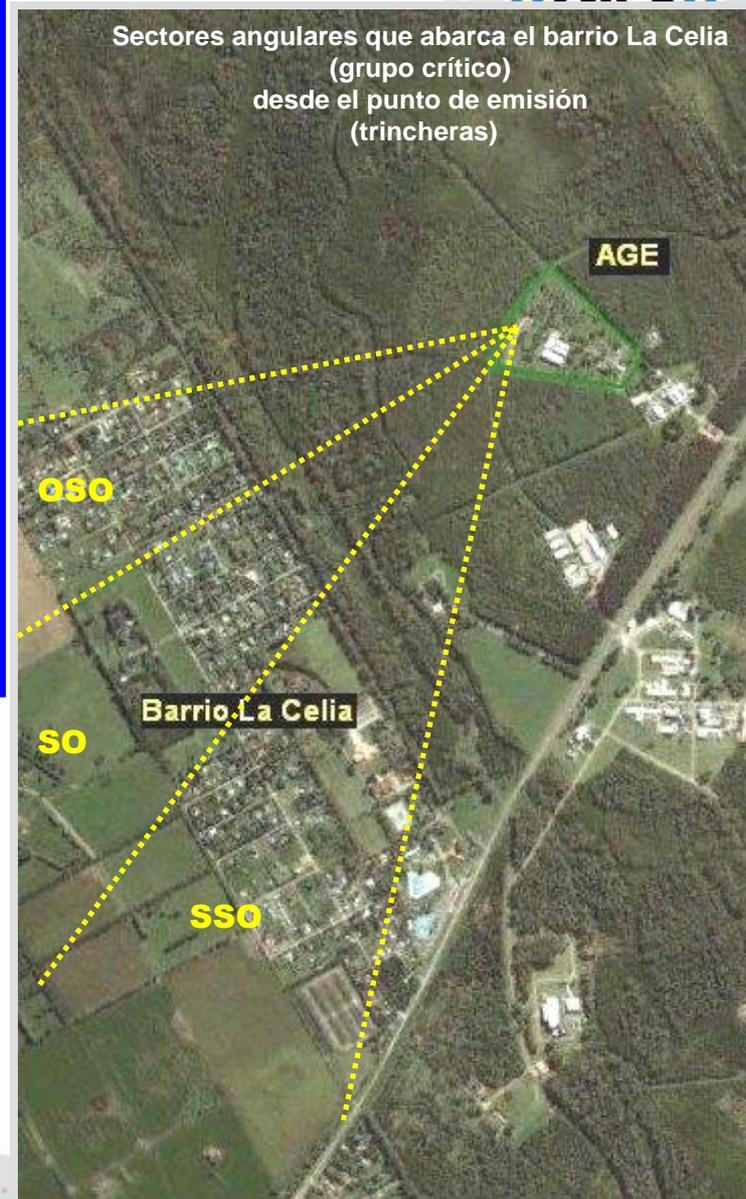


# Estimación de las frecuencias de dirección del viento hacia el grupo crítico



La probabilidad de que en el momento del impacto el viento sople hacia el grupo crítico puede asociarse con la frecuencia relativa de la dirección del viento ya que fue calculado con un número de casos suficientemente amplio basado en 86.721 registros de dirección del viento horario

$$f_D = \frac{22.241}{86.721} \approx 0,2564$$

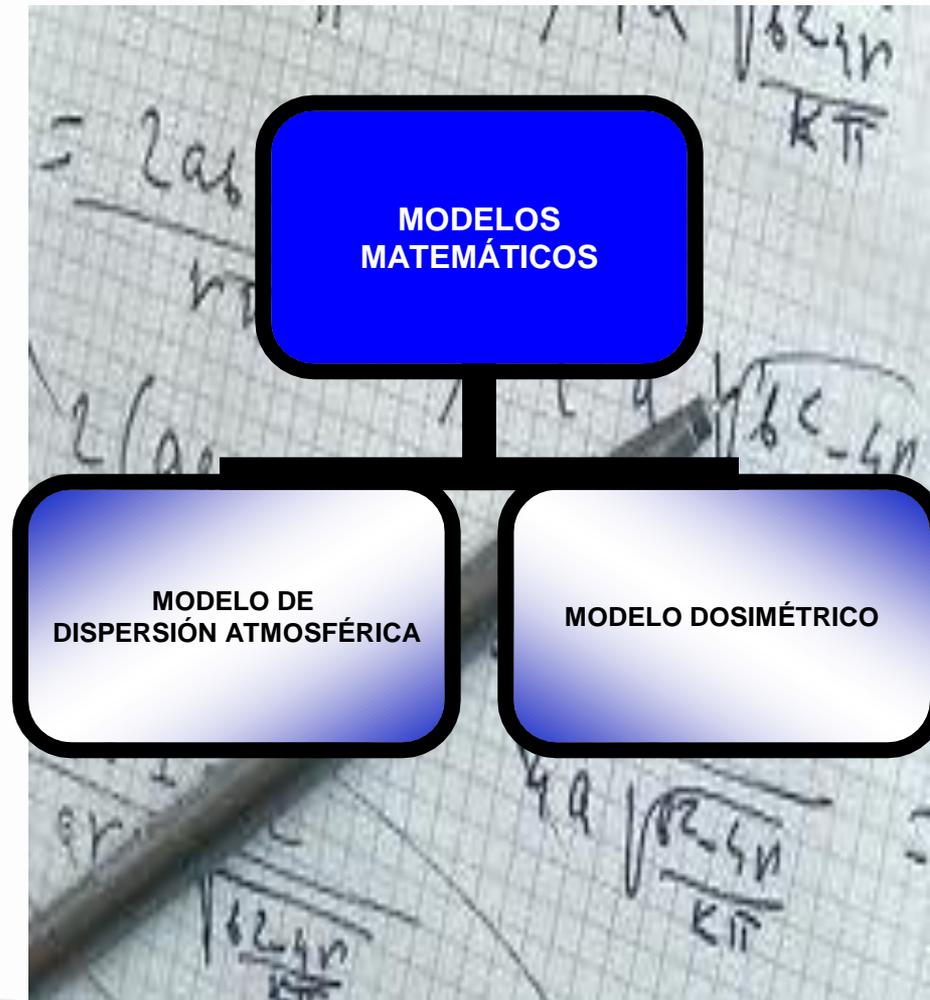


Los valores utilizados fueron extraídos de la Frecuencia absoluta por dirección del viento para Ezeiza, . Estación Ezeiza Aero, SMN, periodo 1996-2005).

# Determinación de las dosis al grupo crítico debidas a la caída de un avión sobre las trincheras



## MODELO CONCEPTUAL

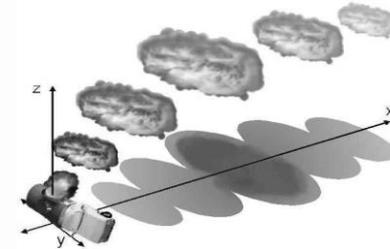
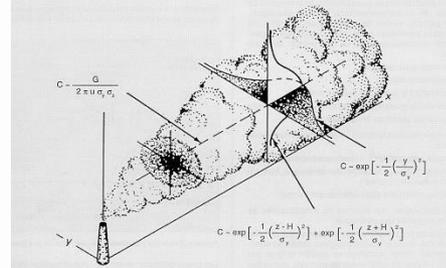


# Modelo de dispersión atmosférica



Cuando los radionucleidos son emitidos a la atmósfera se ven afectados por el campo de movimientos de la misma (advección y difusión turbulenta)

Se genera entonces una nube radiactiva a baja altura con forma de penacho para emisiones continuas y forma de puff para emisiones muy cortas



El modelo basado en la teoría gaussiana de la dispersión atmosférica estacionaria (*penacho gaussiano estacionario*) es el de mayor aplicación para realizar evaluaciones con fines de protección radiológica

$$C_i(x, y, z) = \frac{Q_i}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left[ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right]$$

$C_i(x,y,z)$  : concentración en el aire en el punto (x,y,z) (Bq.m<sup>-3</sup>)

x, y z : coordenadas del punto en el sistema que tiene como origen la fuente y el eje x en la dirección del viento (m)

$Q_i$  : tasa de emisión del radionucleido (Bq.s<sup>-1</sup>).

$\sigma_y, \sigma_z$  : parámetros de dispersión atmosférica , función de la distancia x y la estabilidad atmosférica (categorias Pasquill) (m)

u : velocidad media del viento (m.s<sup>-1</sup>)

H : altura de emisión (m).\*

Expresiones matemáticas empíricas

Curvas propuestas por Gifford

Categoría de estabilidad	Definición
A	extremadamente inestable
B	moderadamente inestable
C	ligeramente inestable
D	neutra
E	ligeramente estable
F	moderadamente estable



$$E(\tau) = \sum_{i=1}^n E_i(\tau)$$

Número de radionucleidos considerados

Dosis efectiva comprometida del radionucleido  $i$  [Sv]

Dosis efectiva comprometida total para cada grupo de edades [Sv]

$$C_i(x, y, z) = Q_i \cdot F_{dil}(x, y, z)$$

Concentración en aire integrada en el tiempo del radionucleido  $i$  [Bq.s.m<sup>-3</sup>]

Factor de dilución [s.m<sup>-3</sup>]

Para el cálculo de la dosis efectiva comprometida se considera que el tiempo de exposición del grupo crítico al penacho generado es igual al tiempo de emisión total de radionucleidos bajo el supuesto de que las condiciones atmosféricas se mantienen constantes

La emisión de radionucleidos se genera por impacto e incendio.

Una fracción de la totalidad de los radionucleidos del inventario de las trincheras es liberada

$$FL = 1 \cdot 10^{-3}$$

Dosis efectiva comprometida del radionucleido  $i$  para cada grupo de edades (niños < 1 año y adultos) [Sv]

Factor dosimétrico de inhalación del radionucleido  $i$  para cada grupo de edades [Sv.Bq<sup>-1</sup>]

$$E_i(\tau) = C_i(x, y, z) \cdot T_{resp} \cdot E_{inh\ i}(\tau)$$

Tasa de respiración para cada grupo de edades [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]

Período de integración utilizado para el cálculo de dosis. Para adultos se adopta  $\tau = 50$  años y para niños  $\tau = 70 - t_0$ , es decir, el tiempo transcurrido desde el instante en que se produce la incorporación hasta la edad de 70 años

Emisión total de material liberado del radionucleido  $i$  [Bq]

$$Q_i = Act_i \cdot FL$$

Actividad total del radionucleido  $i$  en las trincheras [Bq]

Factor de liberación [-]

# Determinación de las dosis al grupo crítico debidas a la caída de un avión sobre las trincheras

Radionucleido	$C_i$ [Bq.s.m <sup>-3</sup> ]	$E_i(\tau)$ (niños < 1 año) [Sv]	$E_i(\tau)$ (adultos) [Sv]
<sup>242</sup> Cm	2,76E-10	2,93E-19	3,89E-19
<sup>134</sup> Cs	8,59E+01	4,19E-11	1,51E-10
<sup>55</sup> Fe	9,06E-04	1,69E-16	1,86E-16
<sup>60</sup> Co	1,67E+06	7,03E-06	1,38E-05
<sup>3</sup> H	4,11E+09	4,92E-05	4,92E-05
<sup>241</sup> Pu	2,46E+06	9,79E-05	5,88E-04
<sup>244</sup> Cm	6,28E+04	2,75E-04	5,68E-04
<sup>90</sup> Sr	1,24E+05	7,12E-07	7,89E-07
<sup>243</sup> Cm	1,94E+05	9,44E-04	2,11E-03
<sup>137</sup> Cs	4,37E+06	1,70E-06	5,34E-06
<sup>238</sup> Pu	4,37E+04	1,49E-04	5,34E-04
<sup>63</sup> Ni	1,95E+08	2,16E-05	2,49E-05
<sup>241</sup> Am	1,91E+05	6,18E-04	2,08E-03
<sup>14</sup> C	3,08E+06	8,99E-07	1,64E-06
<sup>239</sup> Pu	3,25E+05	1,14E-03	4,33E-03
<sup>240</sup> Pu	2,90E+05	1,01E-03	3,86E-03
<sup>94</sup> Nb	1,04E+04	5,55E-08	1,36E-07
<sup>59</sup> Ni	2,95E+06	1,25E-07	1,41E-07
<sup>99</sup> Tc	1,19E+03	9,47E-10	1,29E-09
<sup>36</sup> Cl	1,11E+03	1,52E-09	2,15E-09
<sup>237</sup> Np	7,44E+02	1,45E-06	4,55E-06
<sup>129</sup> I	1,51E+00	4,80E-12	1,44E-11
<sup>232</sup> Th	4,78E+00	1,70E-08	5,60E-08

Radionucleido	$C_i$ [Bq.s.m <sup>-3</sup> ]	$E_i(\tau)$ (niños < 1 año) [Sv]	$E_i(\tau)$ (adultos) [Sv]
<sup>144</sup> Ce	2,77E-09	2,58E-20	3,91E-20
<sup>22</sup> Na	7,09E-05	3,05E-17	2,45E-17
<sup>125</sup> Sb	2,30E+00	2,04E-12	2,94E-12
<sup>204</sup> Tl	4,86E-02	1,08E-14	5,56E-15
<sup>133</sup> Ba	1,34E-01	6,54E-14	5,35E-14
<sup>207</sup> Bi	2,40E-01	2,56E-13	3,58E-13
<sup>234</sup> U	1,01E+05	1,47E-04	2,49E-04
<sup>235</sup> U	1,54E+03	2,05E-06	3,45E-06
<sup>238</sup> U	9,30E+04	1,15E-04	1,98E-04
<sup>234</sup> Pa	9,30E+04	1,20E-08	9,90E-09
<sup>234</sup> Th	9,30E+04	1,69E-07	1,91E-07
<sup>230</sup> Th	3,86E+03	1,30E-05	4,42E-05
<sup>226</sup> Ra	3,86E+03	1,21E-05	1,85E-05
<sup>214</sup> Pb	3,86E+03	3,76E-09	2,88E-09
<sup>214</sup> Bi	3,86E+03	1,49E-08	1,44E-08
<sup>210</sup> Pb	3,86E+03	7,70E-07	9,14E-07
<sup>228</sup> Ra	4,78E+00	4,88E-09	3,56E-09
<sup>228</sup> Ac	4,78E+00	3,82E-11	3,18E-11
<sup>228</sup> Th	4,78E+00	3,60E-08	5,35E-08
<sup>224</sup> Ra	4,78E+00	2,54E-09	4,07E-09
<sup>212</sup> Pb	4,78E+00	4,66E-12	2,29E-11
<sup>212</sup> Bi	4,78E+00	3,39E-11	3,95E-11
<b>E (τ)</b>		<b>4,61E-03</b>	<b>1,47E-02</b>

Tasa de respiración (niños) =  $4,43E-05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 Tasa de respiración (adultos) =  $2,66E-04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Dosis efectiva comprometida total para cada grupo de edades [Sv]

# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS



Probabilidad anual del evento considerado (PA)

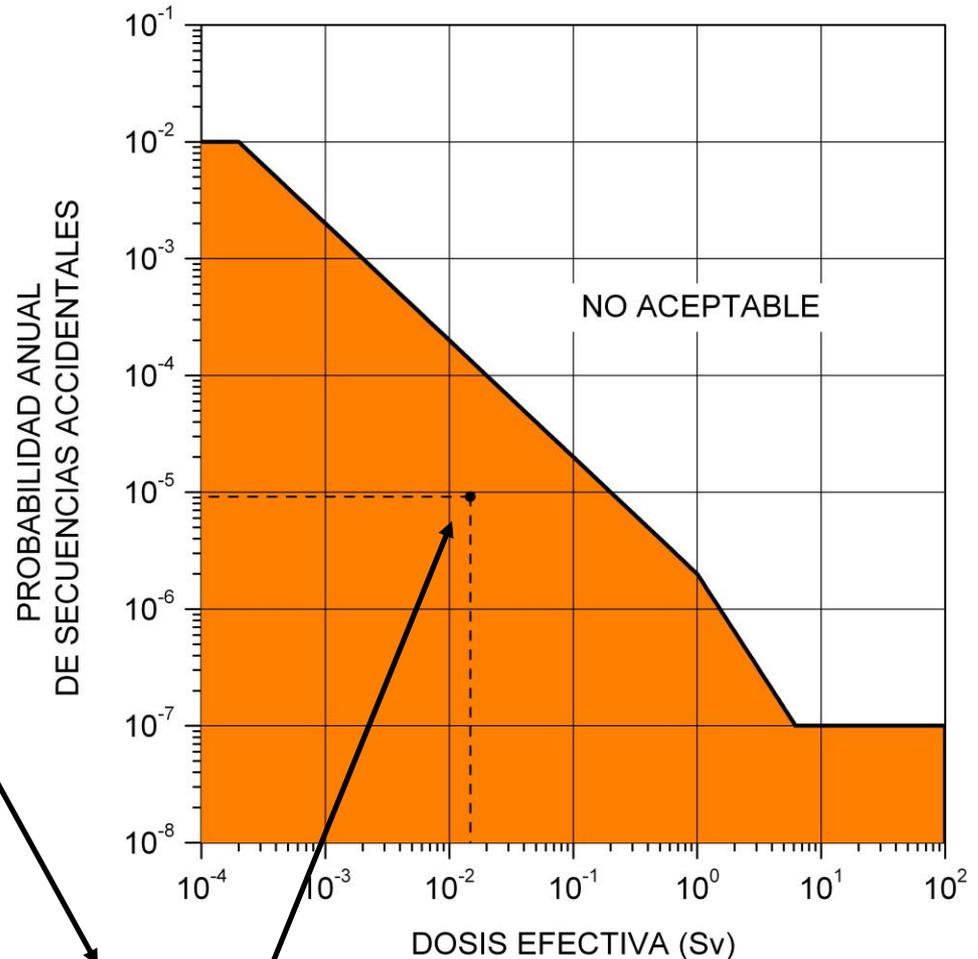
$PA = P(\{1 \text{ o más impactos}\}) \cdot P(\text{en el momento del impacto el viento sople hacia el grupo crítico})$

$$PA \leq 3,696 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2564 \leq 9,48 \cdot 10^{-6}$$

La dosis efectiva comprometida total por inhalación

$1,47 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}$   
(valor mayor para individuos adultos)

$(1,47 \cdot 10^{-2}, 9,48 \cdot 10^{-6})$



# ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE



El análisis de incertidumbre de un modelo tiene por objeto proporcionar mediciones cuantitativas de la incerteza que tienen los resultados como consecuencia de aquellas del propio modelo y en los valores introducidos inicialmente en éste (o “valores de entrada”), y examinar la importancia relativa de esos factores

$$C(x, y, z) = Q \cdot \frac{1}{2 \pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right) \cdot \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2 \sigma_z^2}\right) \right]$$

Velocidad del viento utilizada  
0,95 m.s<sup>-1</sup>  
(velocidad media anual)

El análisis de sensibilidad

**SENSIBILIDAD**

**NÚMERO DE VUELOS**

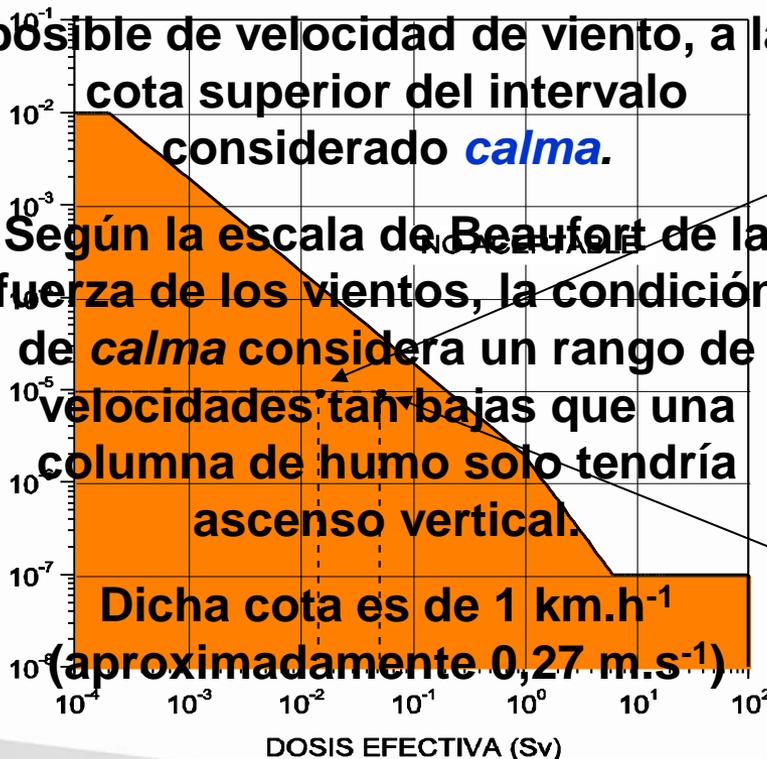
introducidos en el mismo o de los supuestos en los que éste se basa

Se consideró como límite inferior posible de velocidad de viento, a la cota superior del intervalo considerado **calma**.

PROBABILIDAD ANUAL DE SECUENCIAS ACCIDENTALES

Según la escala de Beaufort de la fuerza de los vientos, la condición de **calma** considera un rango de velocidades tan bajas que una columna de humo solo tendría ascenso vertical.

Dicha cota es de 1 km.h<sup>-1</sup> (aproximadamente 0,27 m.s<sup>-1</sup>)



Dosis  
1,47.10<sup>-2</sup> Sv

Velocidad mínima  
0,27 m.s<sup>-1</sup>

Dosis  
5,17.10<sup>-2</sup> Sv



**MUCHAS GRACIAS**  
**POR SU ATENCIÓN**

