

# Impacto radiológico asociado al transporte de material radiactivo por carretera en España.

José Antonio Calleja Rubio <sup>1</sup>  
Fernando Gutiérrez Martín <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio de Prevención, Tecnatom, [jacalleja@tecnatom.es](mailto:jacalleja@tecnatom.es) Dpto. Ingeniería Eléctrica, EUIT Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, [joseantonio.calleja@upm.es](mailto:joseantonio.calleja@upm.es)

<sup>2</sup> Dpto. Química Industrial y Polímeros, Universidad Politécnica de Madrid, [fernando.gutierrez@upm.es](mailto:fernando.gutierrez@upm.es)

**Palabras clave:** material radiactivo, impacto radiológico, protección radiológica, combustible nuclear, dosis de radiación ionizante, detrimento de la salud.

## 1. Introducción

Las cuestiones relacionadas con el transporte de materiales radiactivos constituyen un objeto de renovada actualidad, por el continuo incremento en la movilidad de materiales relacionados con el ciclo del combustible nuclear u otros (e.g. el propio combustible, equipos de inspección, fuentes radiactivas, residuos, etc.), el compromiso creciente de estas actividades con el medio ambiente, la seguridad y protección de las personas [1], así como el actual marco legal.

Cabe preguntarse: ¿Cuáles son las rutas más activas? ¿Qué impacto radiológico se genera en el medio o en individuos tipo, como el trabajador de suministro de combustible, los ocupantes de un vehículo particular, en situaciones de retención del tráfico, el público en general ... ?

En España hay una “larga ruta radiactiva” de más de 10.000 kilómetros. El combustible nuclear se transporta por carretera desde Juzbado (Salamanca) hasta las centrales nucleares, y desde estas los residuos generados son transportados también por carretera a las instalaciones de El Cabril, en Córdoba. Además, también hay que tener en cuenta los transportes que generan los equipos y materiales, con origen o destino en las plantas nucleares, necesarios para la buena operación de las mismas.

## 2. Reglamentación del transporte de material radiactivo por carretera

El transporte de material radiactivo está regulado en España por una serie de normas de aplicación internacional, basados en el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos del Organismo Internacional de la Energía Atómica, OIEA [2]; en todos ellos la seguridad del transporte descansa fundamentalmente en el embalaje, estipulándose embalajes diferentes (Exceptuado, Industrial, Tipo A, Tipo B, y Tipo C) y se establecen los criterios para el diseño, en concordancia tanto con la actividad como con la forma física de los materiales radiactivos que contengan. También se detallan las precauciones que se deben tomar en cuanto a rotulación y el etiquetado, así como los requisitos para los embalajes durante el tránsito.

El aseguramiento de la protección radiológica y la prevención de riesgos ambientales, se consigue con la aplicación de límites para la intensidad de radiación y contaminación en la superficie de los embalajes y en los vehículos, así como con la limitación de las actividades transportadas. Otro requisito fundamental es la formación de conductores, además de la supervisión y control por parte de los consejeros de seguridad [3].

### 3. Presentación del sector

La metodología utilizada en la elaboración de este trabajo está basada en el método 'descriptivo-explicativo', que permite la observación y recogida de datos con enfoque de 'estudio de caso' [4, 5], y pretende describir sistemáticamente la logística para el transporte de material radiactivo por carretera así como el impacto radiológico asociado al mismo, mediante el uso de fuentes directas e indirectas; para las primeras, se ha contado con la colaboración de empresas del sector (centrales nucleares, de transportes de material radiactivo, Enresa, instalaciones, etc.). Así mismo, se consultó a organismos oficiales relacionados con el sector, para identificar las regulaciones en cuanto a los permisos y trámites para las expediciones de material radiactivo por carretera.

Se ha elegido el ciclo de combustible nuclear por ser el más representativo en el caso de los transportes radiactivos, por el control que las autoridades competentes ejercen, por la base normativa tan importante que los regula, además de la atención del público en general y su candente actualidad para el desarrollo energético nacional.

En España hay seis centrales nucleares en explotación: Cofrentes, Garoña, Vandellós II, Trillo, Almaraz y Ascó [6], contando en total con ocho reactores, y una central que ha sido declarada en cese definitivo de explotación (José Cabrera).

### 4. Efectos de las radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes, i.e. también las emitidas en los transportes de materiales radiactivos relacionados con el ciclo del combustible nuclear, producen ionización al atravesar los tejidos de organismos vivos. Dicha ionización perturba el comportamiento químico de los constituyentes de las células afectadas, algunas de las cuales pueden autorregenerarse mientras que otras resultan dañadas.

Las dosis recibidas por las personas deben alcanzar cierto valor para provocar lesiones agudas, pero no para causar cáncer o efectos hereditarios. Al mismo tiempo, la persona expuesta a una determinada dosis de radiación no está, ni mucho menos, destinada a padecer cáncer o lesiones genéticas, simplemente incurre en un riesgo mayor que otra no irradiada; el riesgo aumenta a medida que lo hace la dosis [7].

Para mayor claridad de conceptos en el estudio de los efectos biológicos de la radiación, conviene distinguir los términos daño y detrimento: el "daño" representa algún grado de cambio negativo, por ejemplo en las células, pero no apunta necesariamente a un efecto nocivo en el individuo expuesto; el "detrimento" es un concepto que combina la probabilidad de que se produzca un efecto perjudicial para la salud a dosis bajas y una valoración de la gravedad de dicho efecto.

Para poder realizar estimaciones de aplicación general, la Comisión Internacional de Protección Radiológica recomienda unos valores de riesgo, obtenidos con la población de distintos países y continentes [8]; "el promedio de dichos valores para probabilidad de muerte por cáncer es del 5% por cada *Sievert* en una población de todas las edades, siempre que se trate de dosis y tasas de dosis bajas".

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los sistemas biológicos no dependen sólo de la dosis absorbida [9], sino que también de otros factores como el tipo de radiación, la energía de la radiación, etc.

Para evaluar cuantitativamente el daño biológico se usa la **dosis equivalente** [10], magnitud que mide los *efectos biológicos que producen las radiaciones ionizantes en los seres vivos*. En nuestro estudio se trata de emisión gamma, por tanto tenemos las siguientes equivalencias de exposición, dosis absorbida y dosis equivalente:

$$\text{Renguenio} = \text{rad} = \text{rem}; \quad \text{y en el S.I., } 1\text{Gray} = 1 \text{ Sievert} \quad (1)$$

## 5. Impacto radiológico del transporte radiactivo por carretera en España

El impacto negativo asociado a este tipo de transporte se refiere al medio ambiente, sobre todo a los organismos vivos expuestos, y en especial a la salud de las personas.

Comenzamos fijando un año representativo por el volumen de transportes realizados, el 2007, ya que es el de mayor tráfico asociado al ciclo del combustible nuclear, como consecuencia del número de paradas programadas para recarga de combustible en las centrales nucleares; ello generó más trasiego de combustible, equipos de inspección y control, así como más residuos radiactivos de media y baja actividad, procedentes de la servidumbre asociada a los trabajos de mantenimiento en las centrales nucleares.

A partir de más de 6.000 datos recibidos fuimos adecuando la información a nuestras necesidades con ayuda de procesos informáticos, mediante la composición de tablas con parámetros referentes a trasiego de residuos radiactivos, combustible nuclear, fuentes y equipos, fijando “rutas radiactivas” (entre las más importantes están las de transportes de residuos de baja y media actividad procedentes de las seis centrales nucleares con destino al almacén de residuos radiactivos en El Cabril, Córdoba).

En total consideramos “**24 rutas para el transporte de material radiactivo**”. Por ellas se han realizado “**243 transportes**” en el año estudiado, identificándose las provincias de paso expuestas, las distancias recorridas, el tiempo invertido, así como la población por ruta y la población nacional a estudio; en este último caso, solo se tiene en cuenta las poblaciones de paso en todas las rutas, quedando al margen la comunidad gallega, cántabra, País Vasco, Navarra, región de Murcia, y gran parte de la comunidad andaluza, ya que por las vías de circulación de estas no se realiza trasiego.

El impacto global que causan las radiaciones ionizantes en el medio ambiente, como suma del número de transportes por las horas de desplazamiento y por el nivel de radiación a un metro del transporte es de **46,64 mSv·a<sup>-1</sup>** (tabla 1), similar al límite legal anual permitido para un trabajador profesionalmente expuesto a radiaciones ionizantes en España (50,00 mSv·a<sup>-1</sup>).

Sin embargo, en la emisión de radiaciones ionizantes hay un proceso de atenuación de las mismas en función de la distancia, es decir, a medida que se aleja del foco emisor el nivel de radiación decrece en una proporción inversa al cuadrado de la distancia [10]. Dicha atenuación se confunde con el fondo radiactivo natural del ambiente en una zona que, para el caso más desfavorable, se estima en una decena de metros (i.e. o se está “cerca” del transporte o la dosis recibida será despreciable).

La dosis que puede recibir un individuo (conductor o pasajero de un vehículo particular) que coincide con el transporte de material radiactivo es de 1,36 μSv·a<sup>-1</sup>, mientras en el repostaje es de 3,31 μSv y en una retención de tráfico próximo al transporte 20,12 μSv.

El impacto sobre el “colectivo expuesto” [11], ubicado en las regiones de paso de este tipo de transportes (impacto nacional), aplicado a toda la población residente en las distintas provincias es de  $1,1 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ .

Como el vehículo está generalmente en movimiento (fig. 1), la dosis D(P) producida por la fuente móvil a lo largo de toda la trayectoria se obtendrá integrando la expresión:

$$\int dD(P) = \int (IT / v^2 \cdot t^2 + b^2) dt = 1/b \cdot v (\arctg v \cdot t / b) \quad (2)$$

y como resultado, obtenemos:  $D(P) = \pi \cdot IT / b \cdot v \quad (3)$

IT= Índice de Transporte (nivel de radiación a un metro de la unidad de transporte)  
v = velocidad del vehículo                      b = distancia al vehículo

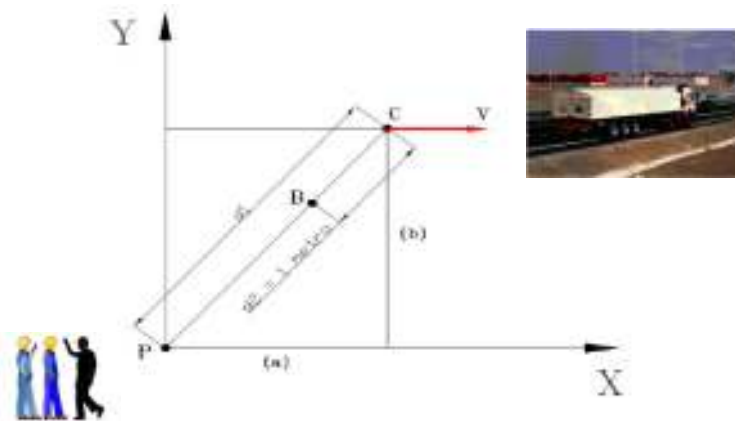


Fig. 1: Dosis producida en un punto por un vehículo en movimiento con material radiactivo

Con esta expresión podremos conocer con exactitud la dosis de radiación gamma que recibiría el público en general, situado a una distancia conocida del transporte que se desplaza a una velocidad prefijada.

Aunque apostamos por una solución generalizada, sin tener en cuenta con exactitud la proximidad al transporte de todo el colectivo impactado, así como la velocidad variable del vehículo, si nos interesa conocer el margen de error en el estudio, comparado con el resultado que se obtendría por la solución propuesta más científica.

Si nos ceñimos al impacto generado al público nacional y teniendo en cuenta la dosis Global obtenida de  $46638 \mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$ , calculada en función del nivel de radiación a un metro del transporte, una velocidad de 90 km/h (que es afín a las directrices de seguridad vial para este tipo de transportes), y una distancia de impacto de 1000 metros (distancia a la que dentro de este radio puede estar el grueso de la población de una gran urbe y que será el colectivo mas significativo), obtendremos:

$$D(P) = 3,1416 \times 46638 / 1000 \times 90000 = 1,6 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1} \quad (4)$$

Que es muy similar a la dosis que ya habíamos acordado ( $1,1 \cdot 10^{-3} \mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$ ).

La probabilidad de padecer enfermedad grave (cáncer), al recibir la radiación ionizante por el individuo mas expuesto es de  $2,31 \cdot 10^{-7}$  y si consideramos el entorno nacional esta probabilidad es de aproximadamente  $10^{-12}$ .

Las rutas de transporte mas activas son las autovías A-2, A-3 y A-5, considerándose el resto de menor tránsito o incluso vías secundarias (fig. 2).



Fig. 2: Rutas de trasiego de material radiactivo

Tabla 1: Impacto radiológico asociados al transporte de material radiactivo por carretera

| <b>IMPACTO RADIOLÓGICO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE MATERIAL RADIATIVO POR CARRETERA EN ESPAÑA (AÑO 2007)</b> |   |   |   |  |   |           |
|--|---|---|---|--|---|-----------|
| <b>RUTAS</b>   | <b>Dosis Impacto Global (<math>\mu\text{Sv. a}^{-1}</math>)</b> | <b>Dosis individuo MAS expuesto (<math>\mu\text{Sv. a}^{-1}</math>)</b> | <b>Dosis al Público (impacto en trayecto) (<math>\mu\text{Sv. a}^{-1}</math>)</b> | <b>Dosis al Público (impacto nacional) (<math>\mu\text{Sv. a}^{-1}</math>)</b> | <b>Detrimiento de la salud (individuo MAS expuesto)</b> | <b>De</b> |
| DE CENTRALES NUCLEARES AL ALMACEN DE RESIDUOS RADIATIVOS, EL CABRIL  | 42005   | 4,63  | 1,44 E-03   | 9,81E-04   | 2,31E-07  |           |
| DE FABRICA ELEMENTOS COMBUSTIBLES, JUDBAGO A CENTRALES NUCLEARES   | 1592  | 0,24  | 9,43 E-05   | 3,72 E-05  | 1,23E-08  |           |
| DE CENTRALES NUCLEARES A MADRID  | 2218  | 0,46  | 4,35 E-05   | 4,53 E-05  | 2,31E-08  |           |
| DE CENTRALES NUCLEARES A LA FRONTERA, JUNQUERA   | 521   | 0,10  | 1,36 E-05   | 1,22 E-05  | 5,00E-09  |           |
| ENTRE CENTRALES NUCLEARES  | 303   | 0,12  | 6,96 E-05   | 7,07 E-06  | 6,33E-09  |           |
| <b>GLOBAL</b>  | <b>46638</b>  | <b>1,36</b>   | <b>N/A</b>  | <b>1,10 E-03</b>   | <b>6,80 E-08</b>  |           |

**Dosis impacto global:** Valor obtenido por aportación de todos los transportes realizados y en todas las rutas.

**Dosis individuo expuesto (adelantamiento):** 15 segundos x 3 adelantamientos en la ruta: consideramos que el individuo trasiega por la ruta a

**Dosis al público, impacto en trayecto:** Se considera la población de todas las edades, residente en las provincias por las que circula el transpo

**Dosis al público, impacto nacional:** Población de todas las edades del entorno nacional, sometido a impacto.

**Detrimiento de la salud (muerte por cáncer):** el valor promedio para la probabilidad de muerte por cáncer es del 5% por cada Sievert en u cada  $\mu\text{Sievert}$ .

Aunque las unidades para caracterizar el impacto global se proponen en dosis equivalente ( $\mu\text{Sv}$ ), es más correcto referirlas a unidades de exposición puede ser o no adquirida por los humanos (según si están o no en la zona de exposición), pero como se ha indicado, para emisión gamma la exposición es dosis equivalente. Por tanto, como los valores de medida del nivel de radiación a un metro del transporte se proponen en unidades de dosis referiremos siempre a estas unidades.

## 6. Programa de cálculo de impacto radiológico

Como aportación final, proponemos una aplicación informática para el tratamiento de los datos estudiados y una hoja resumen “Impacto Radiológico Asociado al Transporte de Material Radiactivo por Carretera en España”.

Pensamos que esta es quizá la parte más interesante del trabajo y que con ella se avanza en el estudio de estos impactos, pudiendo complementar la documentación legalmente estipulada para este tipo de transportes.

Así, sin más que introducir el nivel de radiación a un metro del transporte y elegir la ruta, (fig. 3), que son datos que suministra el expedidor, obtendremos los impactos radiológicos asociados (fig. 4).

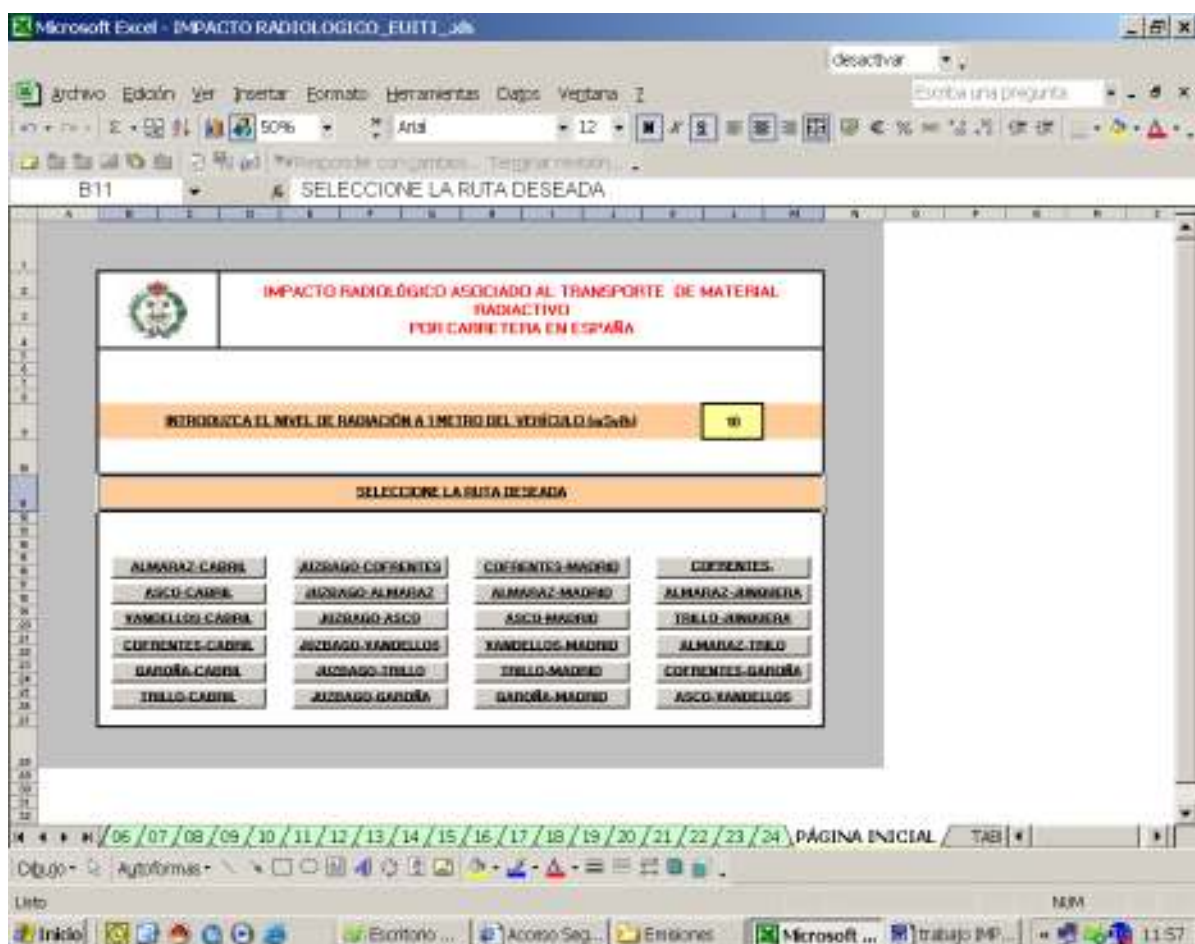


Fig. 3: Página de introducción de datos



## IMPACTO RADIOLÓGICO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE MATERIAL RADIACTIVO POR CARRETERA EN ESPAÑA

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| RUTA:                               | VANDELLOS-MADRID                           |
| TIEMPO EN RUTA:                     | 6 Horas                                    |
| POBLACIONES EXPUESTAS:              | Tarragona-Castellon-Valencia-Cuenca-Madrid |
| IMPACTO RADIOLÓGICO GLOBAL (uSv):   | 60   |
| DOSIS INDIVIDUO MAS EXPUESTO (uSv): | 0,35                                       |
| DETRIMENTO DE SU SALUD:             | 1,75E-08                                   |
| APORTACIÓN POBLAC. TRAYECTO (uSv):  | 3,89E-05                                   |
| DOSIS APORTACIÓN NACIONAL (uSv):    | 9,46E-06                                   |
| DETRIMENTO DE LA SALUD:             | 4,73E-13                                   |

### CONSIDERACIONES:

Los datos son reflejo de un trabajo de investigación considerando los transportes realizados en un año natural en España; en el estudio desfavorable.



Fig. 4: Página de resultados

## 7. Conclusiones

En primer lugar, observamos que las vías de circulación elegidas para este tipo de transportes cubren casi la totalidad del territorio nacional; de las 24 rutas existentes, tres de ellas son particularmente activas por la afluencia de transportes, así como de la significativa carga radiológica asociada (autovía de Extremadura, A-5, de Levante, A-3 y de Aragón, A-2), lo que potencia el riesgo radiológico asociado, ya que la exposición debido a la densidad de tráfico en estas vías será mayor.

En segundo lugar, indicar que el impacto radiológico global anual es muy reducido y con una incidencia de efectos adversos para su salud despreciable.

Como tercera conclusión, que respalda la hipótesis planteada al inicio de este trabajo y que creemos más importante, se demuestra que la emisión de radiaciones ionizantes procedentes de los transportes de material radiactivo en España no es significativa a la hora de generar efectos adversos en la salud humana, es decir, que su impacto radiológico es despreciable o nulo.

## 8. Agradecimientos

Al personal de la organización de protección radiológica de las centrales nucleares, personal de la empresa E.T.S.A., y a los componentes del servicio de prevención de Tecnatom, que han propuesto muchos de los datos referidos a los transportes realizados.

## Referencias.

- [1] Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/95) de 8 de diciembre. *Boletín Oficial del Estado* n° 269 de 10 de noviembre. Páginas 33408 – 33434.
- [2] Acuerdo Europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR 2007) *Boletín Oficial del Estado*, suplemento de 21 de enero de 2007, núm. 18, p. 34564.
- [3] Real Decreto 1566/1999, sobre los consejeros de seguridad para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable. *Boletín Oficial del Estado*, de 20 de octubre de 1999. p. 36825-36914.
- [4] YIN, R. *Case study research: Design and métodos*. Sage Publishing. Beberly hills. 1994.
- [5] CHETTY, S. *The case Study Method for Research in Small and Medium – sized Firms*. International Small Business Journal. Vol 15. pp. 73 – 85.
- [6] [www.csn.es](http://www.csn.es)
- [7] ORTEGA X. y JORBA B. *Radiaciones Ionizantes*. Editorial Universidad Politécnica de Cataluña. 1988. p 56-65.
- [8] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1999 (ICRP) Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991). Traducción al español por la Sociedad Española de Protección Radiológica. Madrid (1995).
- [9] COLL BUTÍ, Pedro. Fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica. Editorial Junta de Energía Nuclear. Año 1990. p. 56-59.
- [10] TANARRO SANZ, Agustín. *Radiaciones ionizantes: Instalaciones radiactivas y de Rayos X*. Editorial Junta de Energía Nuclear, año 1986. p. 85-135.
- [11] [www.ine.es](http://www.ine.es)