Proyecto DOPEN:

Desarrollo de un sistema de dosimetría personal de neutrones

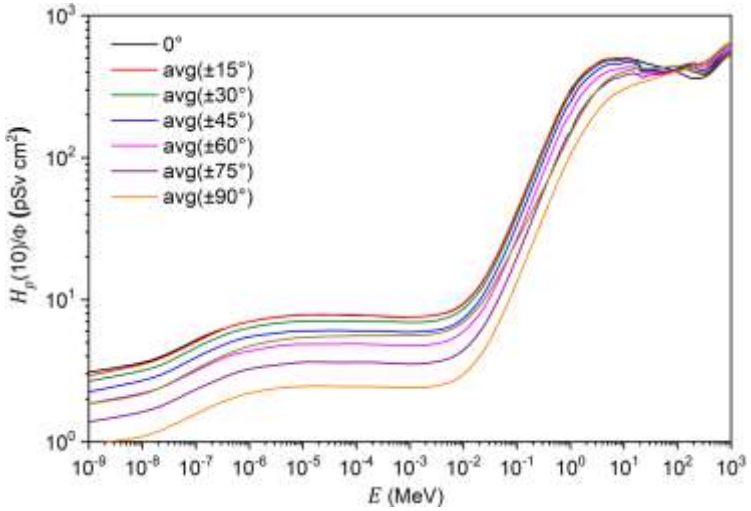
José María Gómez Ros
Montserrat Moraleda Chaves
Sergio Rivera Vázquez
Rafael Rodríguez Jiménez
Ana María Romero Gutiérrez
Icíar Sarasola Martín

Introducción

- La dosimetría personal de neutrones es esencial para la protección radiológica en instalaciones productoras de neutrones de trabajadores profesionalmente expuestos.
- La respuesta de los dosímetros personales para neutrones, en términos de $H_p(10)$, depende de la energía (10^{-9} – 10^{2} MeV) y el ángulo de incidencia de la radiación.
- No existe un dosímetro personal neutrónico que proporcione la respuesta requerida en todas las condiciones.
- El proyecto DOPEN ha puesto a punto un laboratorio de dosimetría personal neutrónica, basado en detectores de trazas de PADC (polialil diglicol carbonato).







Objetivo del proyecto: desarrollo y validación de un sistema de dosimetría personal de neutrones mediante detectores de trazas para trabajadores expuestos, de acuerdo con los estándares internacionales aplicables.

Convenio entre CSN y CIEMAT, en el Área I: *"Dosimetría de Radiaciones"*, modalidad a) "Proyectos de I+D+i"

- Vigencia inicial: 3 de julio de 2020 − 2 de julio de 2022[(1)]
- Prórroga: 3 de julio de 2022 − 2 de julio de 2024[(2)]

Responsables técnicos:

CSN: Carmen Barbero Fernández
Jorge Faba Rodríguez
Graciela Teresa Ponjuan Reyes

CIEMAT: Ana María Romero Gutiérrez

Colaboradores externos:

- Centro de Láseres Pulsados (CLPU)
- Clínica Universidad de Navarra (CUN)
- Departamento de Ingeniería Energética (ETSII, UPM)

Colaboradores CIEMAT:

- Laboratorio de Patrones Neutrónicos (LPN)

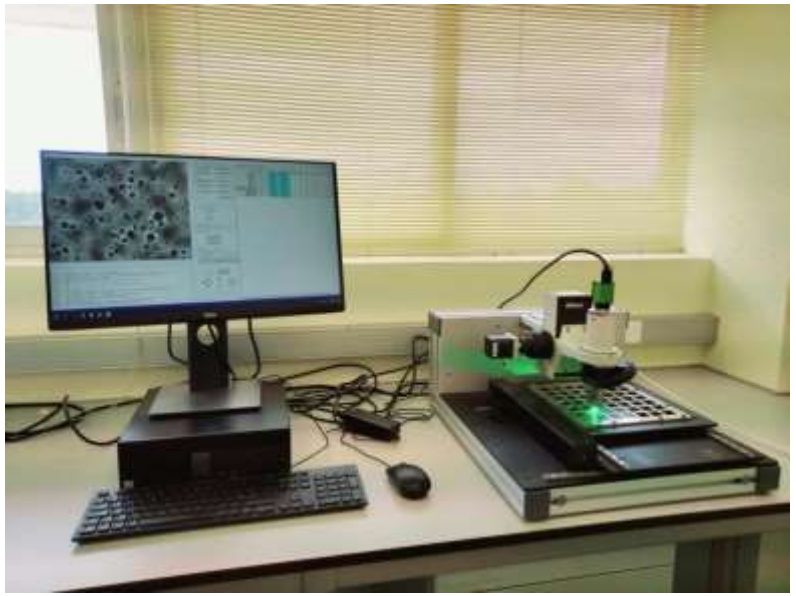
(1) Resolución 7260, de 22 de junio de 2020, del CSN, por la que se publica el Convenio con el CIEMAT (BOE núm. 183, 3 de julio de 2020, pp. 47461-47474).
(2) Resolución 7872, de 9 de mayo de 2022, del CSN, por la que se publica la Adenda al Convenio con el CIEMAT (BOE núm. 115, 14 de mayo de 2022, pp. 67350-67353).

Sistema de lectura y detectores PADC

- Sistema de medida TASLImage.
- Detectores de PADC (polialil diglicol carbonato).
- Portadosímetros de nylon.
- Revelado químico: disolución 6.25M de NaOH, 2h 50 min, 85ºC.
- Calibración con fuente de Am-Be en cada lote, $H_p(10)$ = 2 mSv.



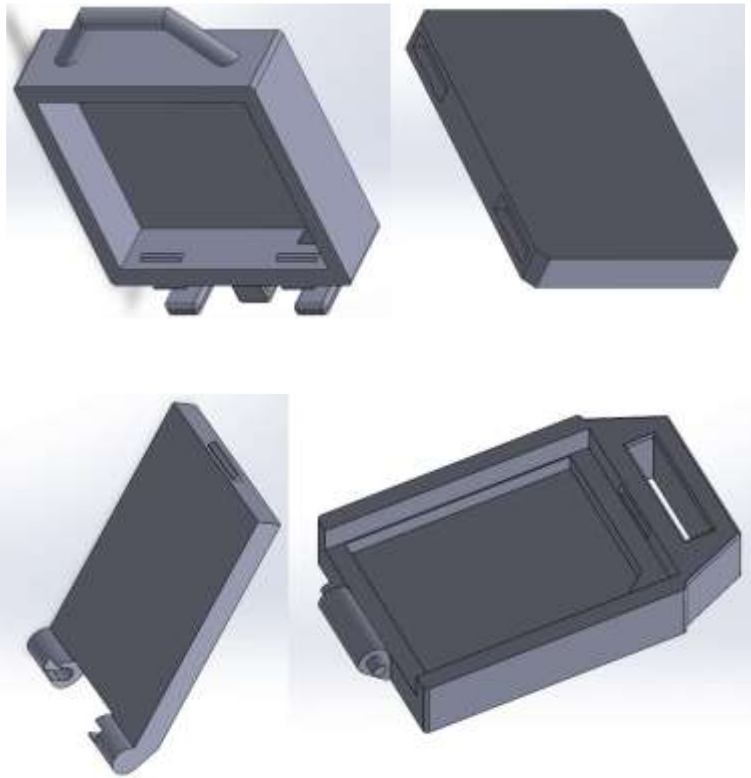


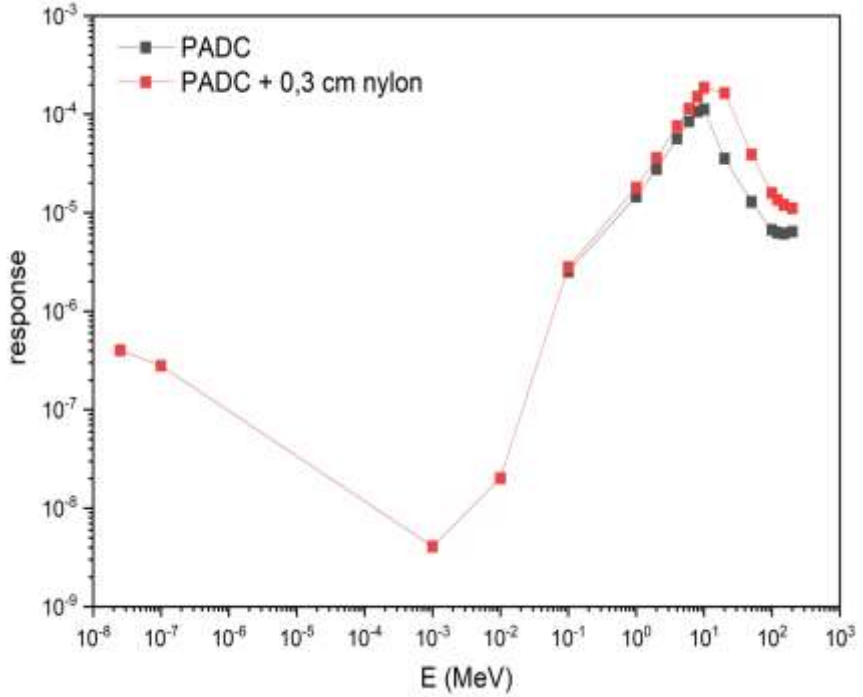




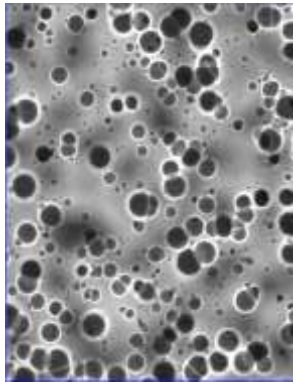
Portadosímetros











- Diseño de portadosímetros optimizado mediante simulación Monte Carlo (MCNP6 y PHITS).
- Portadosimetros fabricados mediante impresión 3D:
  - Impresora de doble extrusión Ultimaker S5.
  - Bobinas de Nylon (PAX) basadas en poliamida PA6/PA66.

Ensayos realizados (según ISO 21909-1)

1) Umbral de detección.

2) Coeficiente de variación.

3) Linealidad.

4) Respuesta energética.

5) Respuesta angular.

Umbral de detección

Irradiación de dosímetros con fuente de AmBe (LPN, CIEMAT)

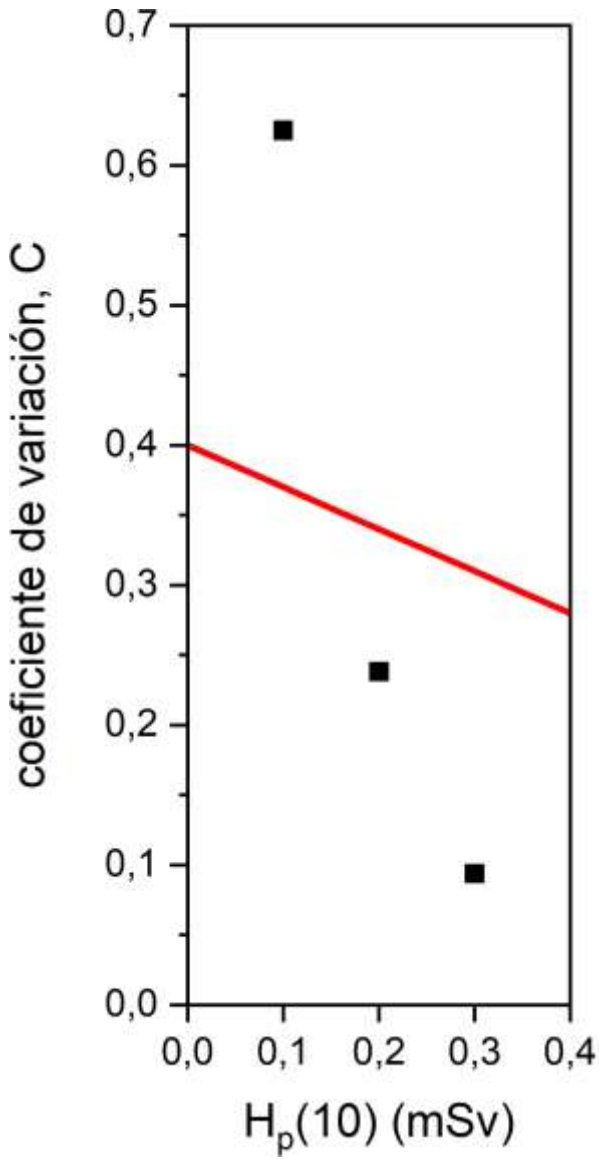
Criterio de coeficiente de variación:

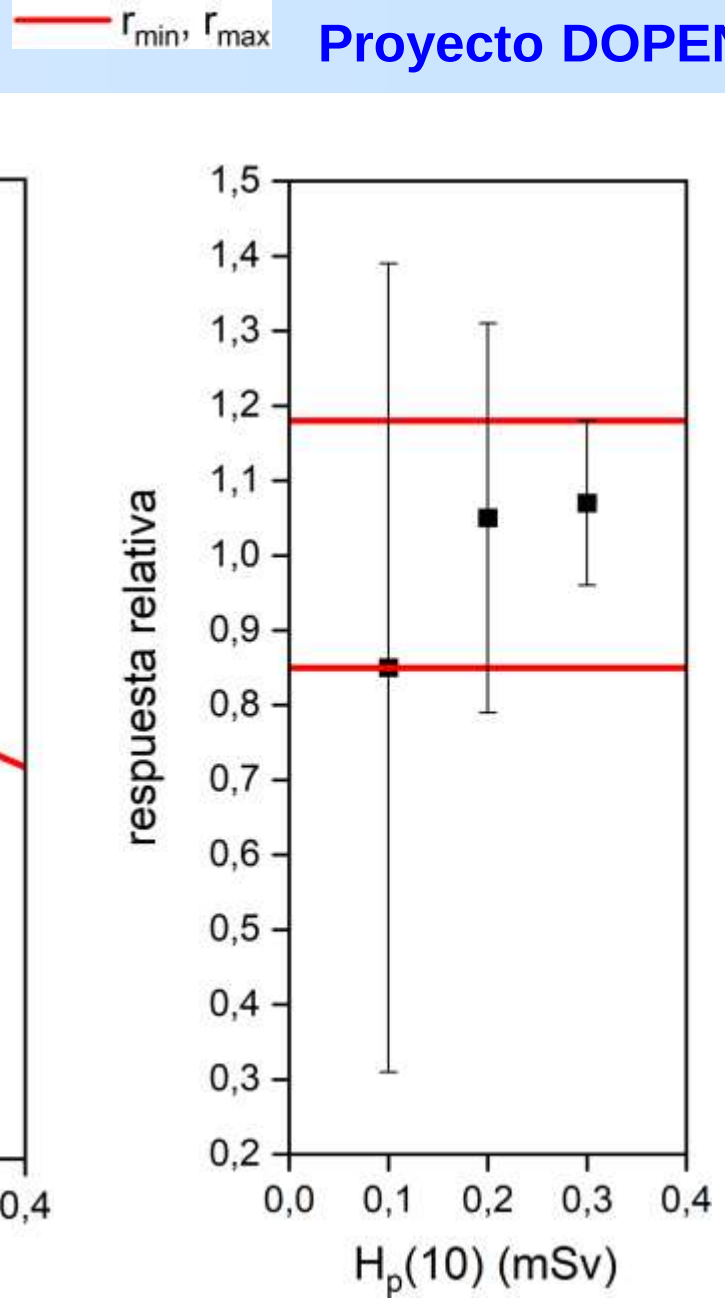
$$C < r_{max}$$

Criterio de linealidad:

$$r_{min} - U \leq \frac{R}{R^{ref}} \leq r_{max} + U$$

Nivel de registro: H_{min} = 0,3 mSv



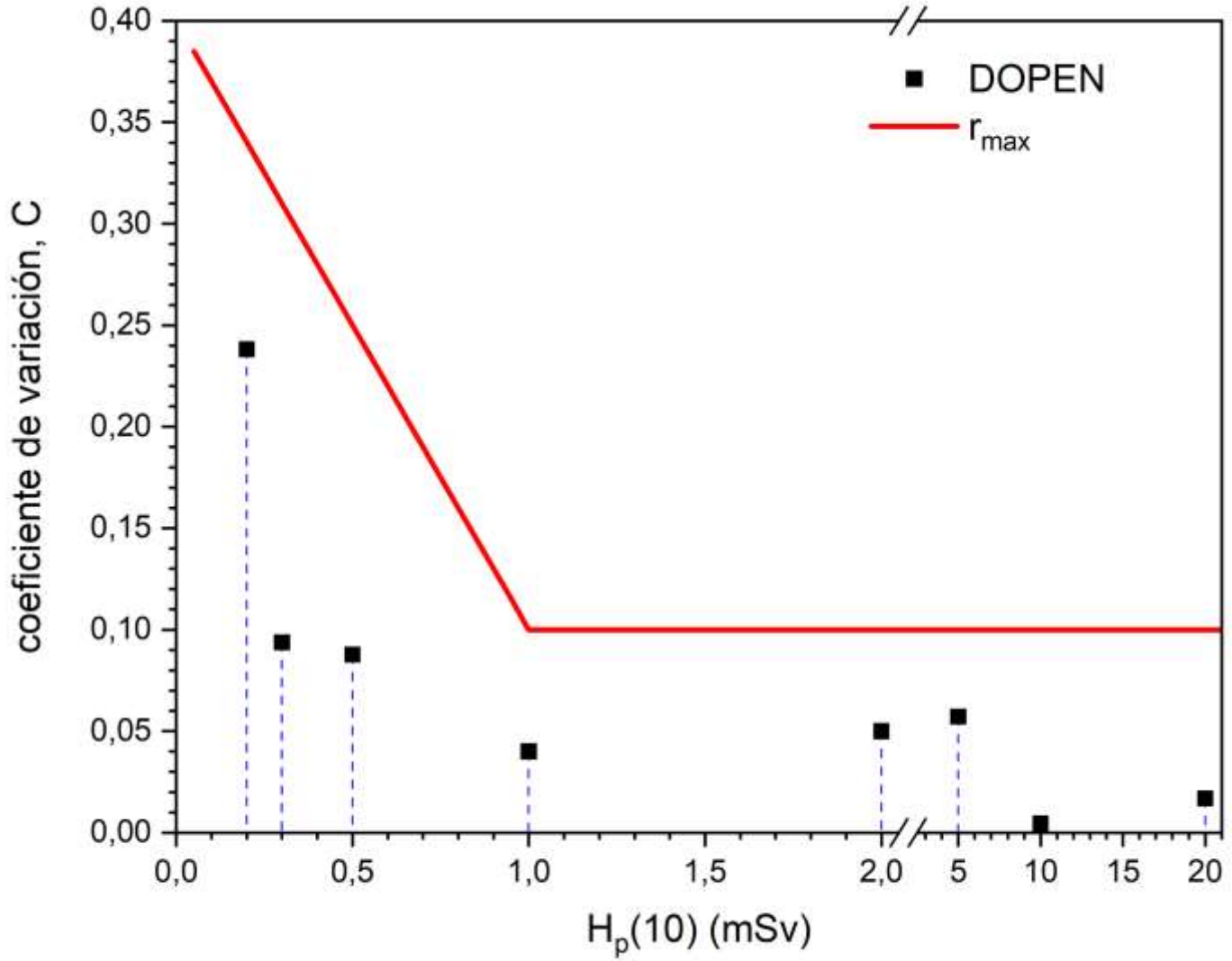


Coeficiente de variación

$$C_{k,j} = \frac{s_{k,j}}{H_{k,j}} < r_{max}$$

i.e.: desviación estándar dividida por la media inferior al valor máximo permitido por la norma.

El sistema cumple el criterio para:
0,3 mSv ≤ $H_p(10)$ ≤ 20 mSv



Linealidad

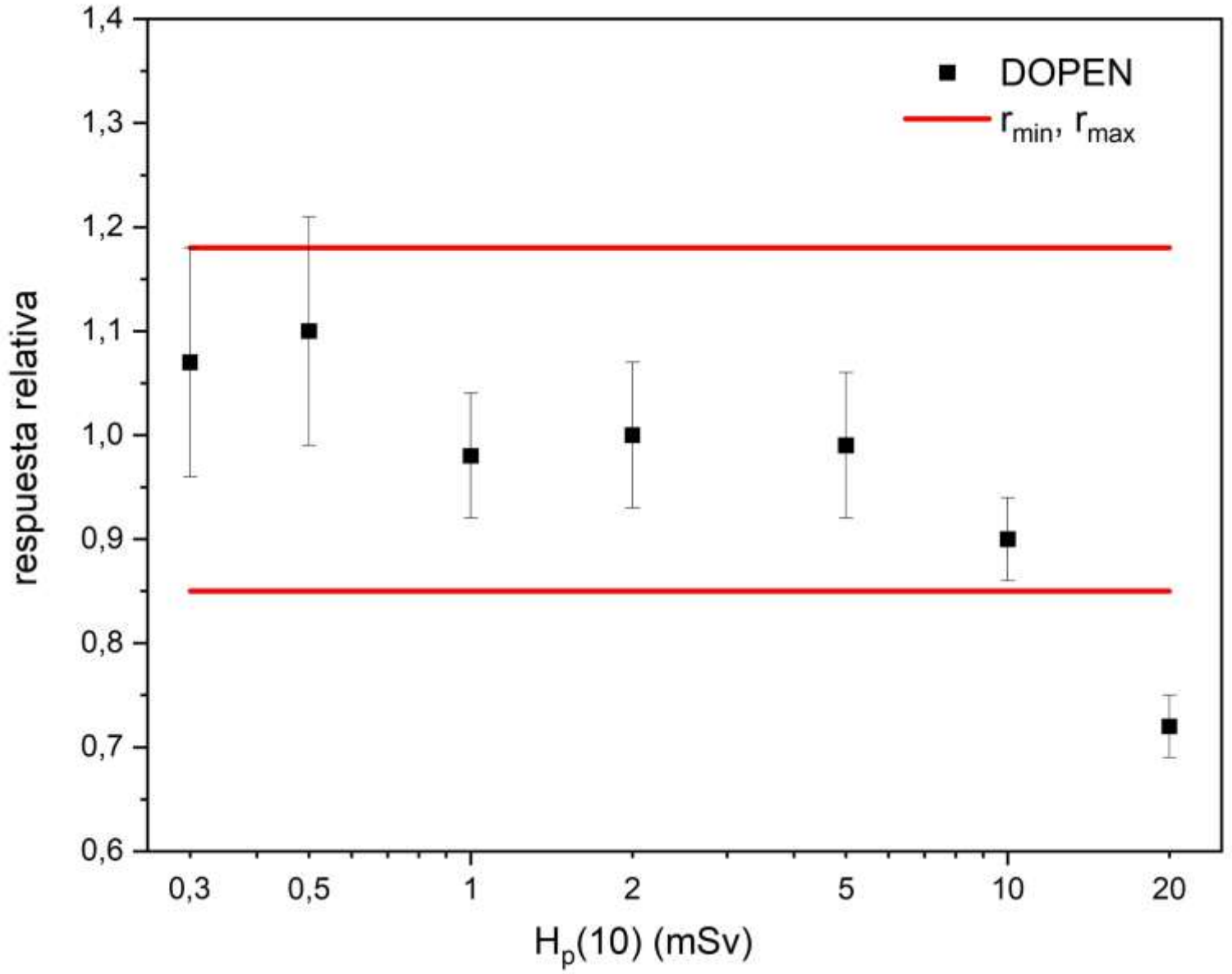
$$r_{min} - \frac{U_{com}}{R_k^{ref}} \leq \frac{R_{k,j}}{R_k^{ref}} \leq r_{max} + \frac{U_{com}}{R_k^{ref}}$$

$\frac{R_{k,j}}{R_k^{ref}}$: respuesta relativa

$R_{k,j} = \frac{\bar{H}_{k,j}}{H_{k,j}^{conv}}$: respuesta

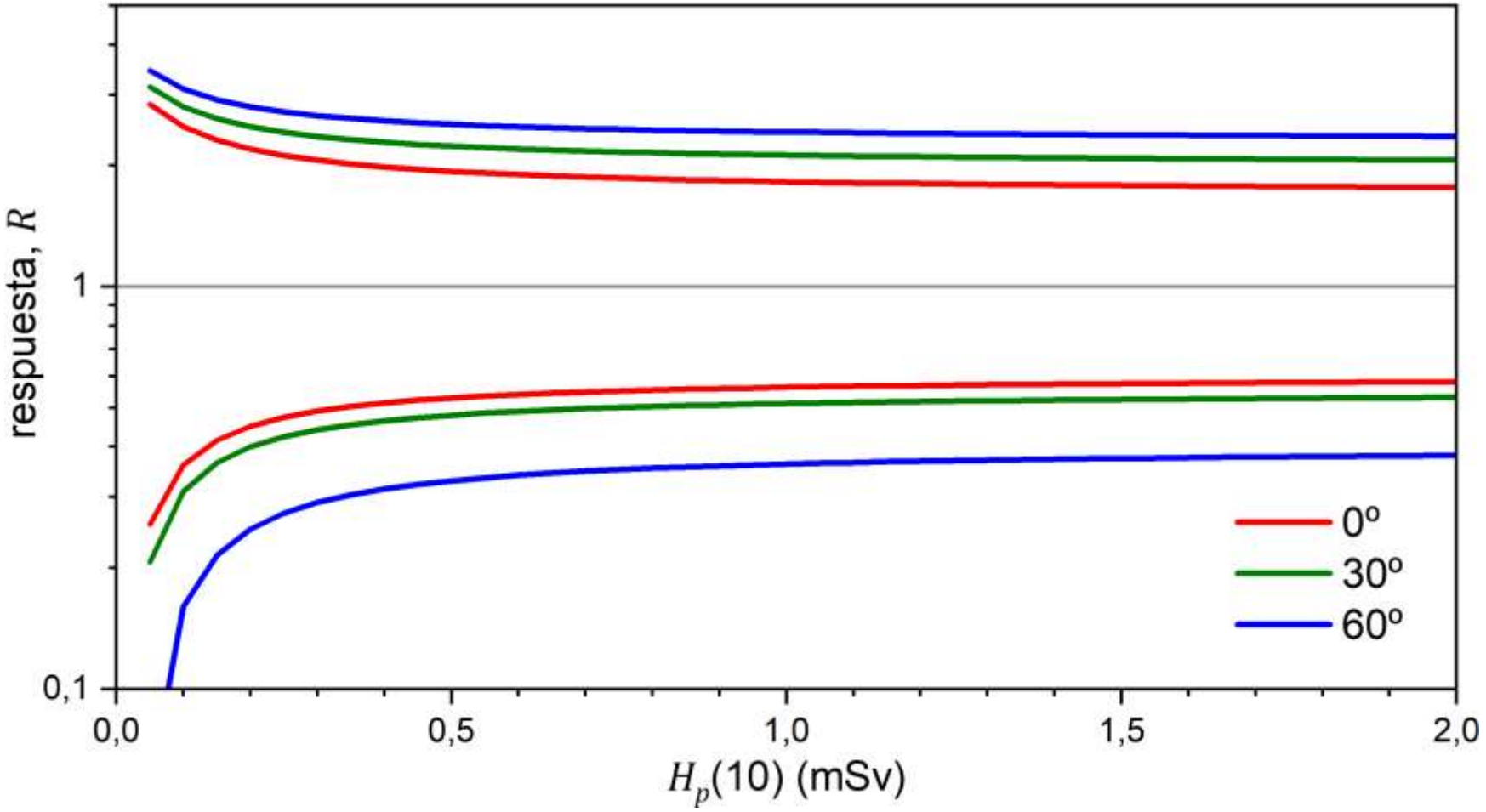
$R_k^{ref} = \frac{\bar{H}_{k,[2\ mSv]}}{H_{k,[mSv]}^{conv}}$: respuesta $H_p(10)$ = 2 mSv

El sistema cumple el criterio para:
0,3 mSv ≤ $H_p(10)$ ≤ 10 mSv



Respuesta energética y angular

Criterios de aceptación para la dependencia energética y angular de la respuesta (ISO 21909-1, 2021)



$$r_{min} - U \leq R \pm U_R \leq r_{max} + U$$

$$R = \frac{\bar{H}}{H^{conv}}$$

Respuesta energética

Irradiaciones realizadas (ISO 21909-1):

ángulo	$H_p(10)$		
	0,3 mSv	**0,4 mSv**	**1 mSv**
0º	térmicos	térmicos	térmicos
		144 keV	144 keV
	250 keV	250 keV	250 keV
		565 keV	565 keV
		1,2 MeV	1,2 MeV
		Am-Be + 250 keV	Am-Be + 250 keV
	Am-Be	Am-Be	Am-Be

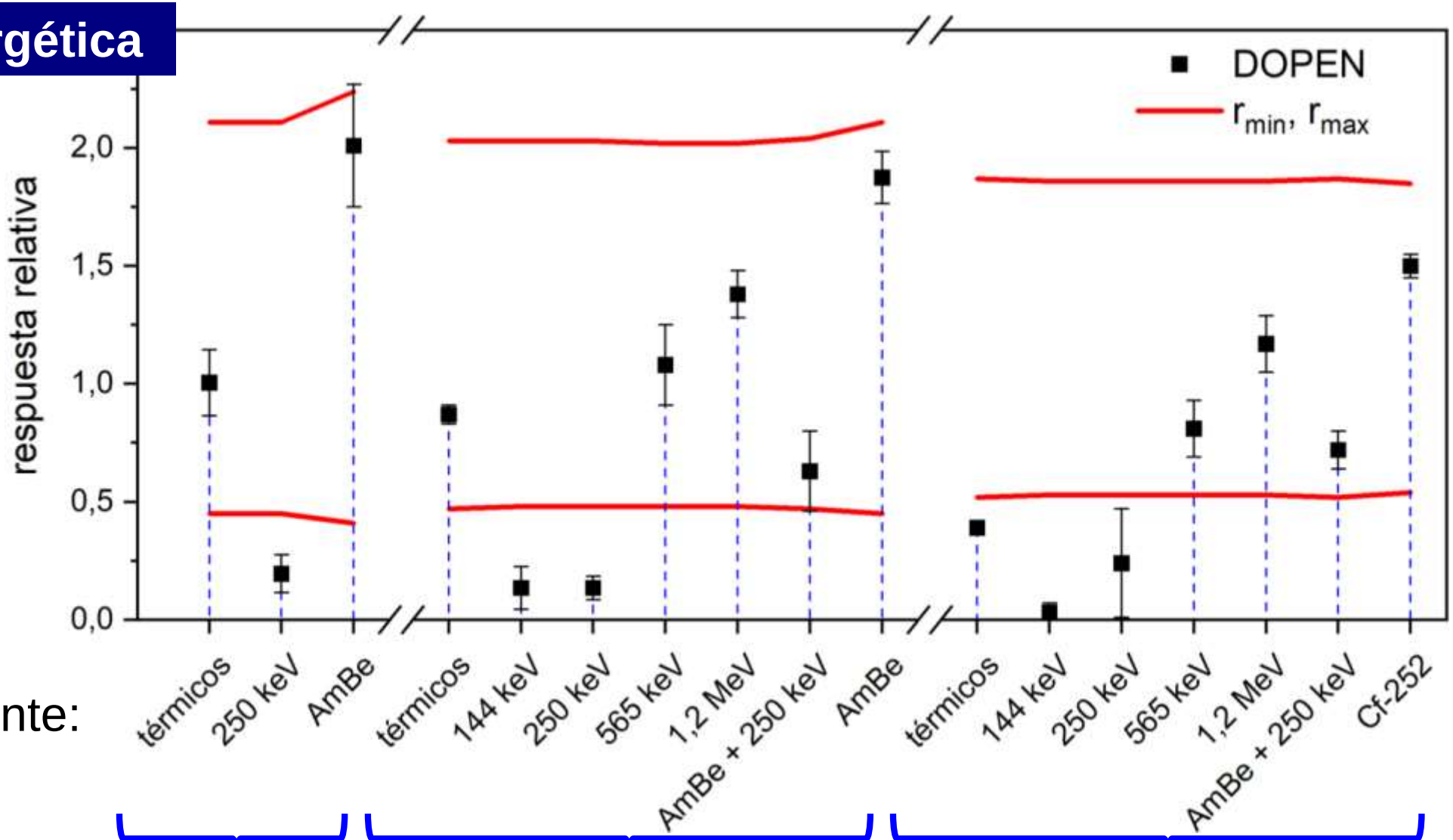
Respuesta angular

Irradiaciones realizadas (ISO 21909-1):

ángulo	$H_p(10)$		
	0,3 mSv	**0,4 mSv**	**1 mSv**
30º		144 keV	144 keV
		250 keV	250 keV
	Am-Be	Am-Be	Am-Be
60º	Am-Be	Am-Be	Am-Be

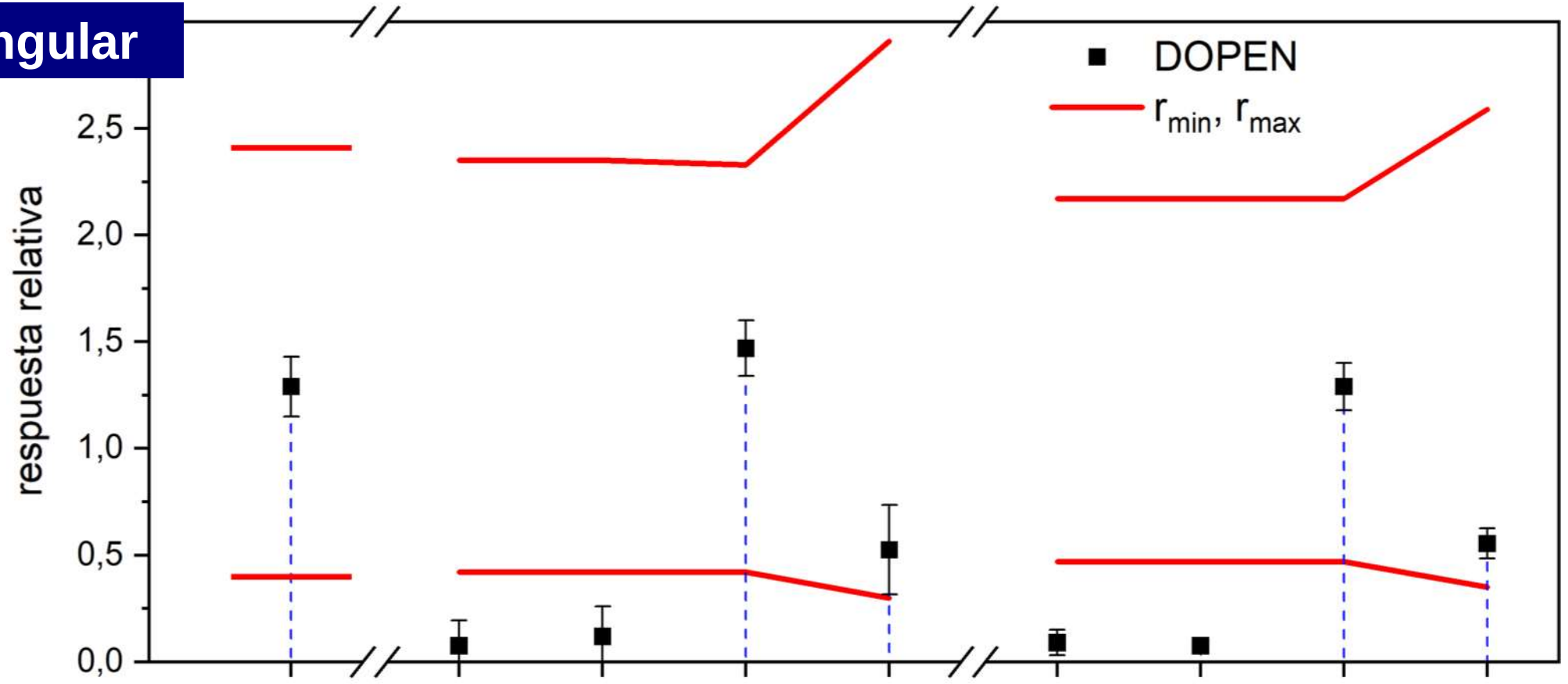
Respuesta energética

El sistema cumple el criterio para E ≥ 565 keV



Respuesta angular

El sistema cumple el criterio para
$E \geq 565$ keV
$\alpha = 30^{o}, 60^{o}$



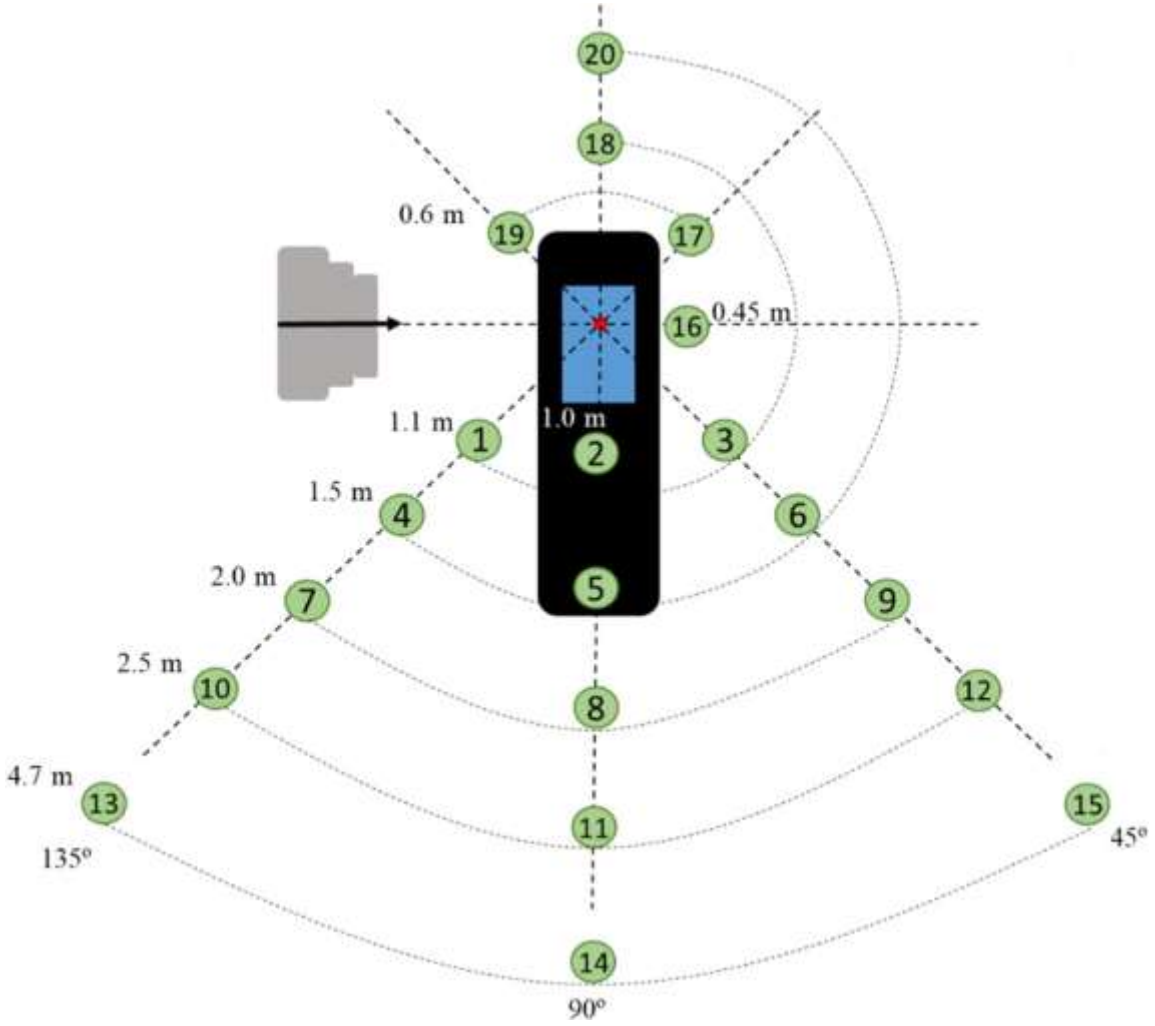
Fuente:

$H_p(10)$: 0,3 mSv 0,4 mSv 1 mSv

Evaluación de $H_p(10)$ en la instalación de protonterapia de la CUN

Clínica Universidad de Navarra



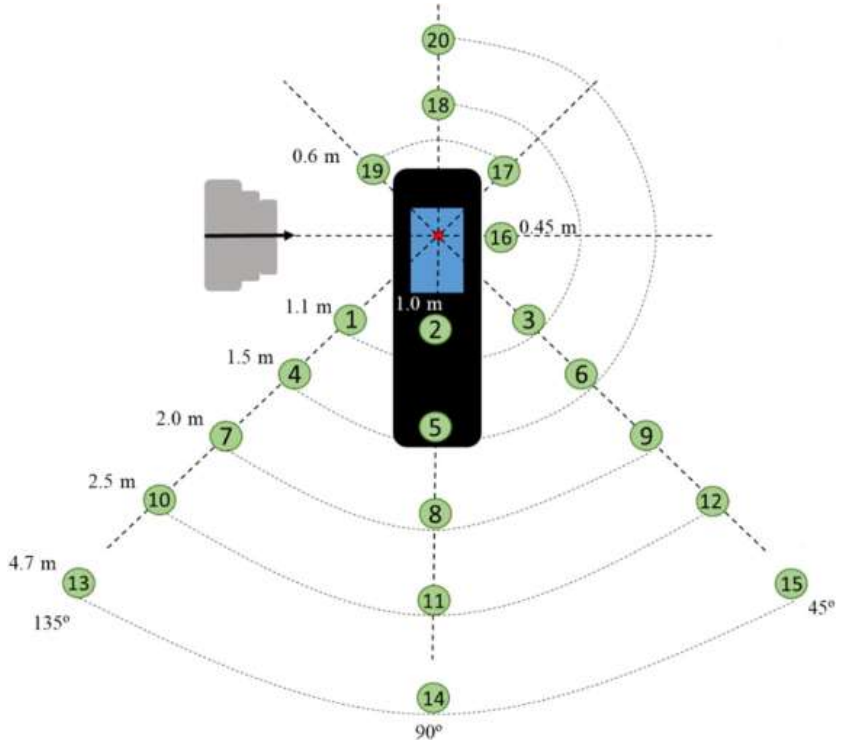


Adaptado de: Martínez-Francés, E. et al., 2025. Phys. Medica 136, 105044, bajo licencia Creative Commons CC-BY.

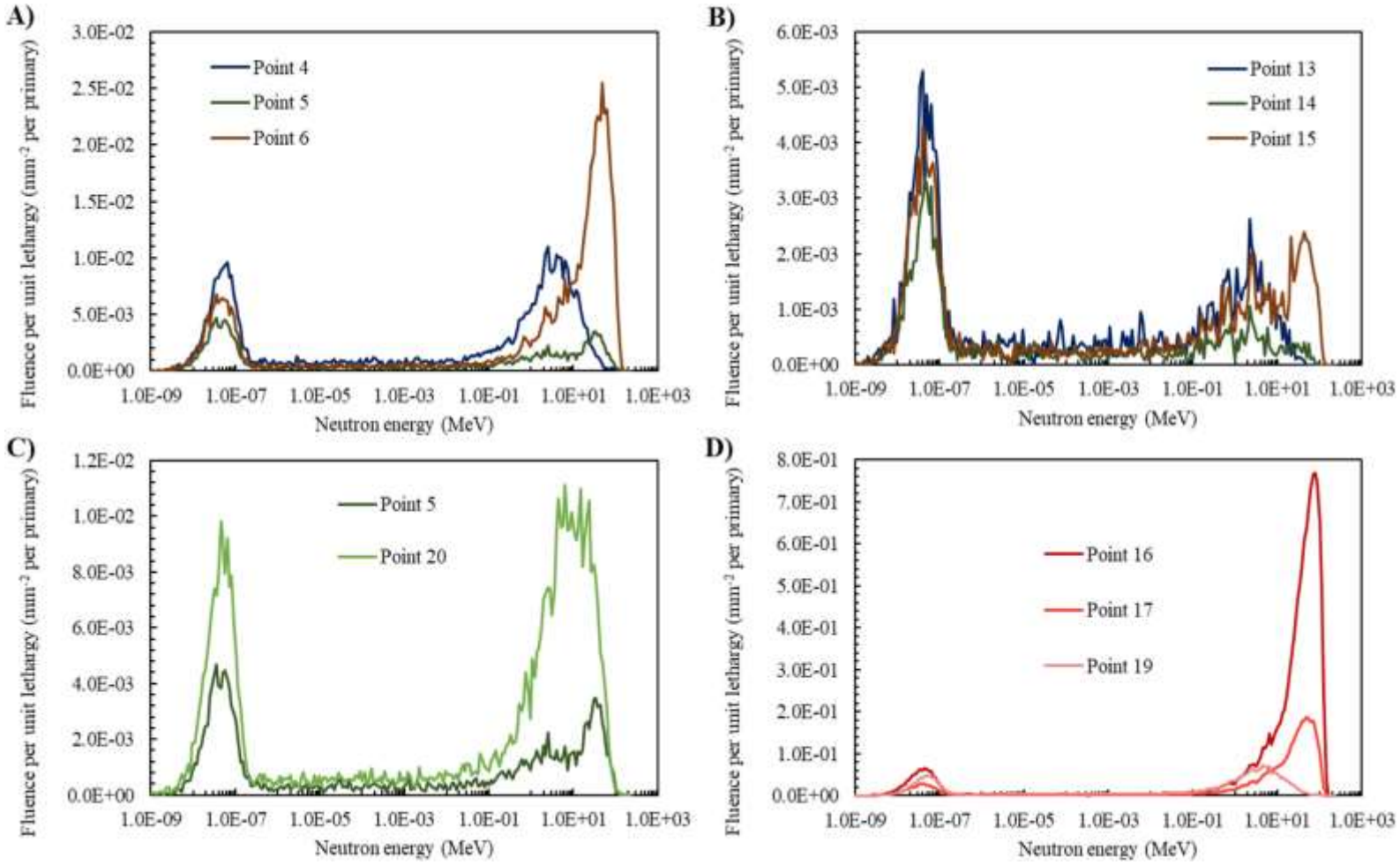
Proyecto PI23/00157: *Evaluación de dosis neutrónica en una instalación de protonterapia: implicaciones para el paciente* (ISCIII cofinanciado con FEDER).

Evaluación de $H_p(10)$ en la instalación de protonterapia de la CUN

Clínica Universidad de Navarra



Espectros de fluencia de neutrones calculados con TOPAS*.

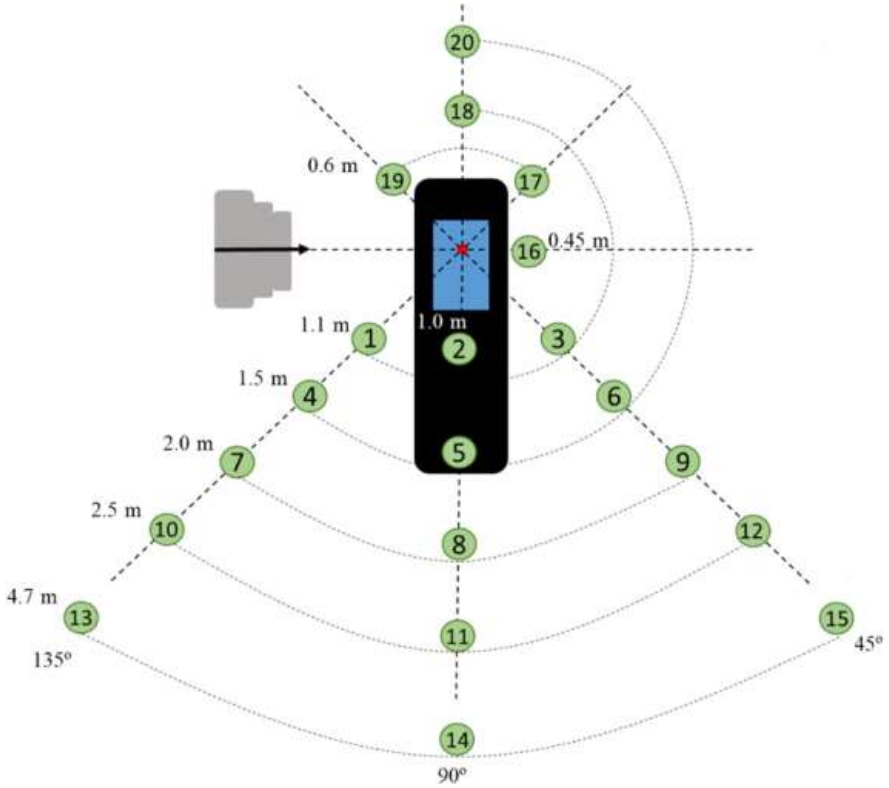


* Perl, J. et al., 2012. *TOPAS: an innovative proton Monte Carlo platform for research and clinical applications*. Med. Phys. 39(11):6818-6837.

Adaptado de: Martínez-Francés, E. et al., 2025. Phys. Medica 136, 105044, bajo licencia Creative Commons CC-BY.

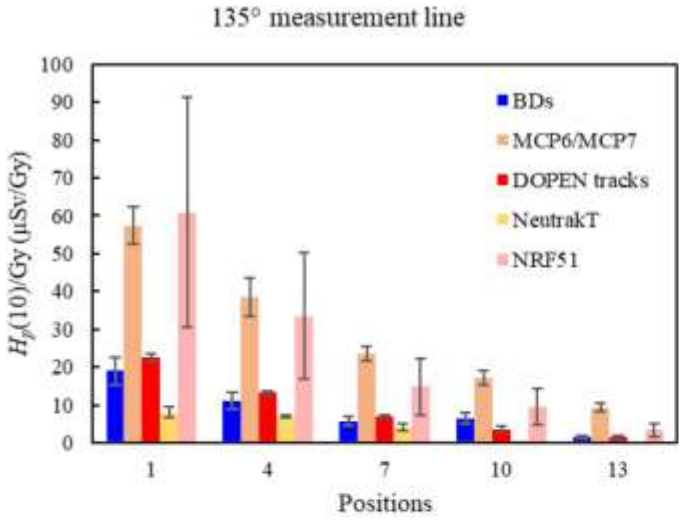
Evaluación de $H_p(10)$ en la instalación de protonterapia de la CUN

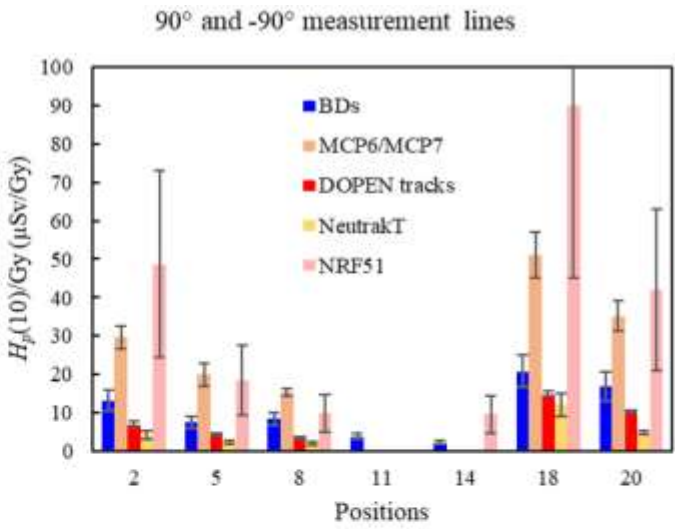
Clínica Universidad de Navarra

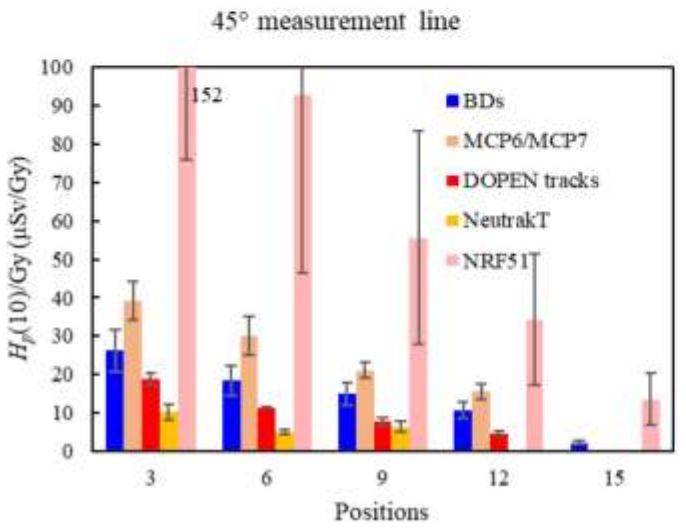


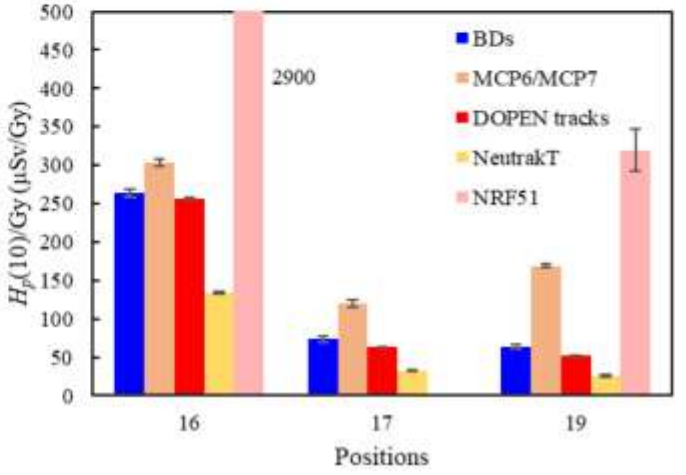
Dosímetros de referencia

DOPEN









Adaptado de: Martínez-Francés, E. et al., 2025. Phys. Medica 136, 105044, bajo licencia Creative Commons CC-BY.

Conclusiones

- ✓ Se ha desarrollado un sistema de dosimetría personal neutrónica utilizando detectores de trazas de PADC (polialil diglicol carbonato) y el equipo de medida TASLImage.
- ✓ Se ha optimizado el proceso de revelado químico y se han diseñado portadosímetros utilizando simulación Monte Carlo mediante MCNP6 y PHITS, los cuales se han fabricado utilizando impresión 3D
- ✓ El sistema de dosimetría personal neutrónica cumple los requisitos establecidos en la norma ISO 21909-1 para la determinación de $H_p(10)$ en los rangos:
  - $H_p(10)$: 0,3 – 10 mSv
  - α: 0º – 60º
  - $E \geq 565$ keV

  Fuera de estos rangos, la norma aplicable sería la ISO 21909-2.
- ✓ La incertidumbre del sistema para la determinación de $H_p(10)$ es de 33% (k=1).

Difusión de resultados

- **A.M. Romero et al.** *Proyecto DOPEN: dosimetría personal de neutrones* (7º Congreso Conjunto SEFM23 - SEPR18, 31 de mayo - 4 de junio de 2021).
- **A.M. Romero et al.** *Project CIEMAT-CSN: Personal neutron dosimetry (DOPEN)* (NEUDOS-14: Neutron and Ion Dosimetry Symposium, Cracovia, Polonia, 25-29 de abril de 2022).
- **A.M. Romero et al.** *Dosimetría personal de neutrones mediante detectores PADC. Estudio preliminar de la respuesta energética* (8º Congreso Conjunto SEFM24 - SEPR19, Oviedo, 23-26 de mayo de 2023).
- **S. Rivera et al.** *Track-based personal neutron dosimetry at CIEMAT: Techniques and developments* (SSD20: 20th International Conference on Solid State Dosimetry, Viareggio, Italia,17-22 de septiembre de 2023).
- **S. Rivera et al.** *Neutron personal dosimetry: Exploring CIEMAT track-based methods*. (ICDA-4: 4th International Conference on Dosimetry and its Applications, Valencia, 16-20 de octubre de 2023).
- **S. Rivera et al.** *Puesta a punto de un sistema de dosimetría personal neutrónica. Proyecto DOPEN*. Nucl. Esp. 461 (2024).
- **E. Martínez-Francés et al.** *Intercomparison of personal and ambient neutron detectors used for radiation protection in a synchrotron-based proton therapy facility: experimental and Monte Carlo results*. Phys. Medica 136, 105044 (2025).