

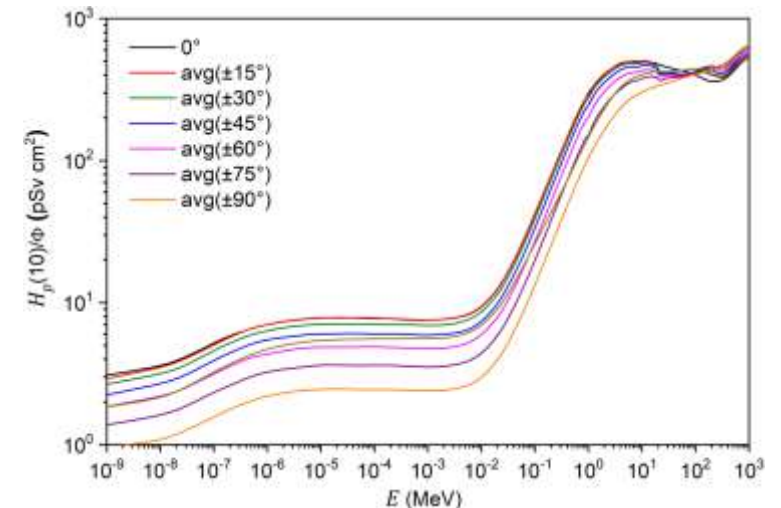
## Proyecto DOPEN:

# 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<sup>(1)</sup>
- Prórroga: 3 de julio de 2022 – 2 de julio de 2024<sup>(2)</sup>

### **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:**

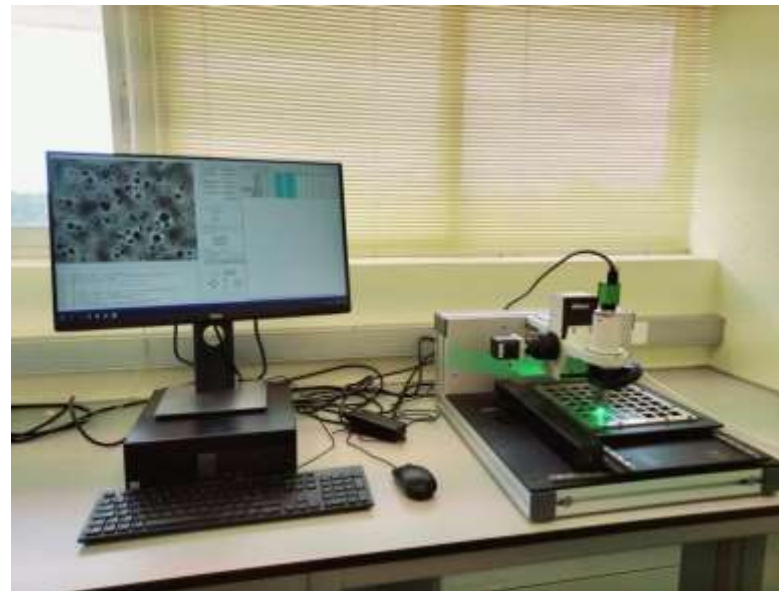
- Laboratorio de Patrones Neutrónicos (LPN)

<sup>(1)</sup> 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).

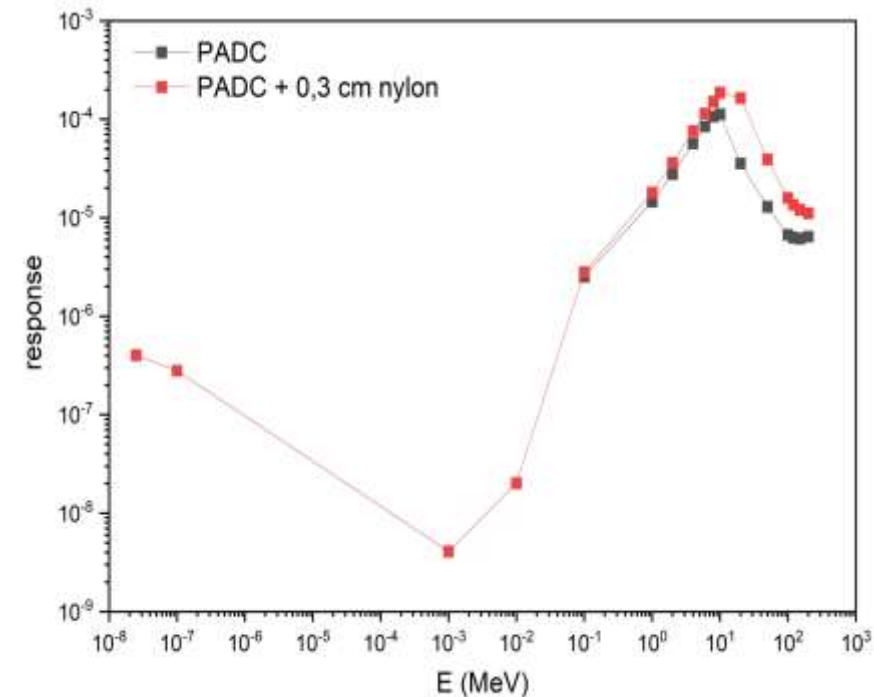
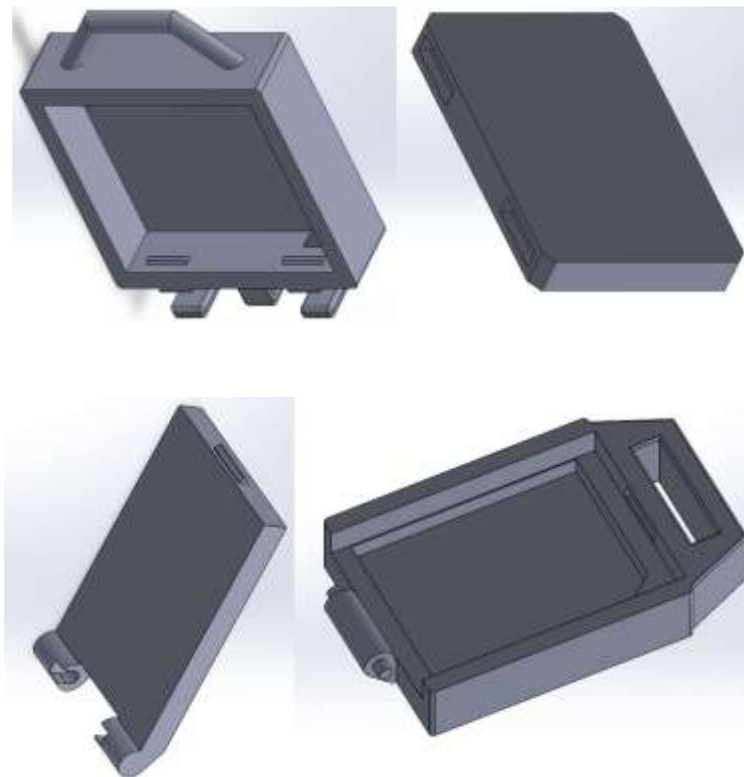
<sup>(2)</sup> Resolución 7872, de 9 de mayo de 2022, del CSN, por la que se publica la Adenda al Convenio con el CIEMAT (BOE núm. 115, 14 de mayo de 2022, pp. 67350-67353).

## Sistema de lectura y detectores PADC

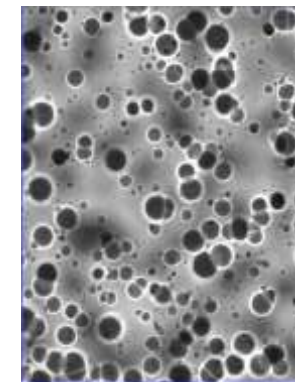
- Sistema de medida TASLImage.
- Detectores de PADC (polialil diglicol carbonato).
- Portadosímetros de nylon.
- Revelado químico: disolución 6.25M de NaOH, 2h 50 min, 85°C.
- Calibración con fuente de Am-Be en cada lote,  $H_p(10) = 2 \text{ mSv}$ .



# Portadosímetros



- Diseño de portadosímetros optimizado mediante simulación Monte Carlo (MCNP6 y PHITS).
- Portadosímetros 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)

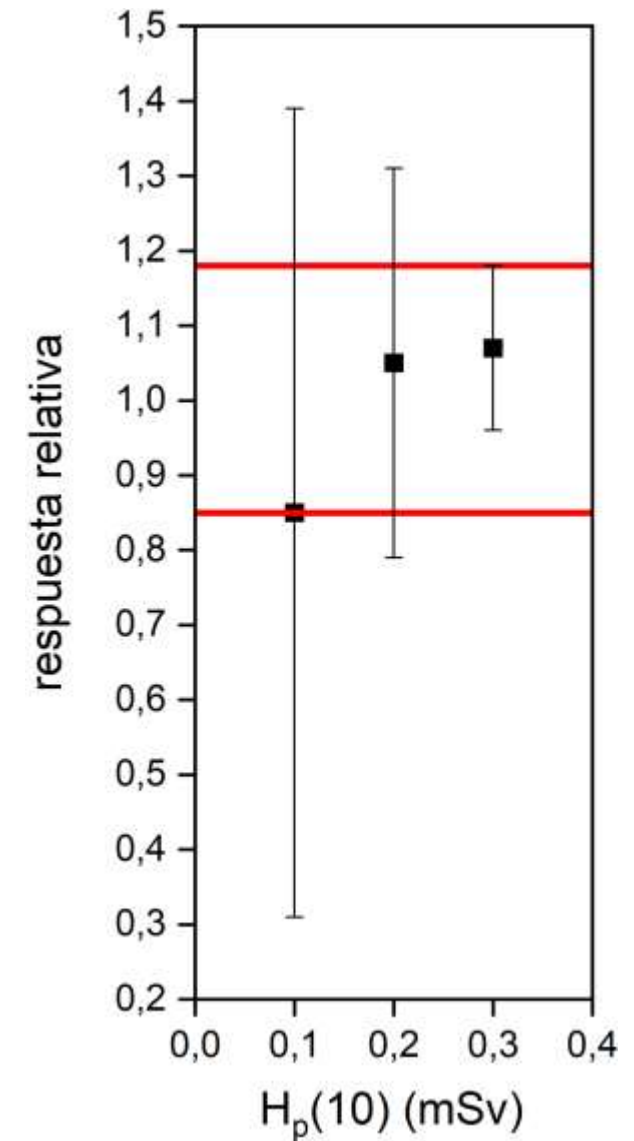
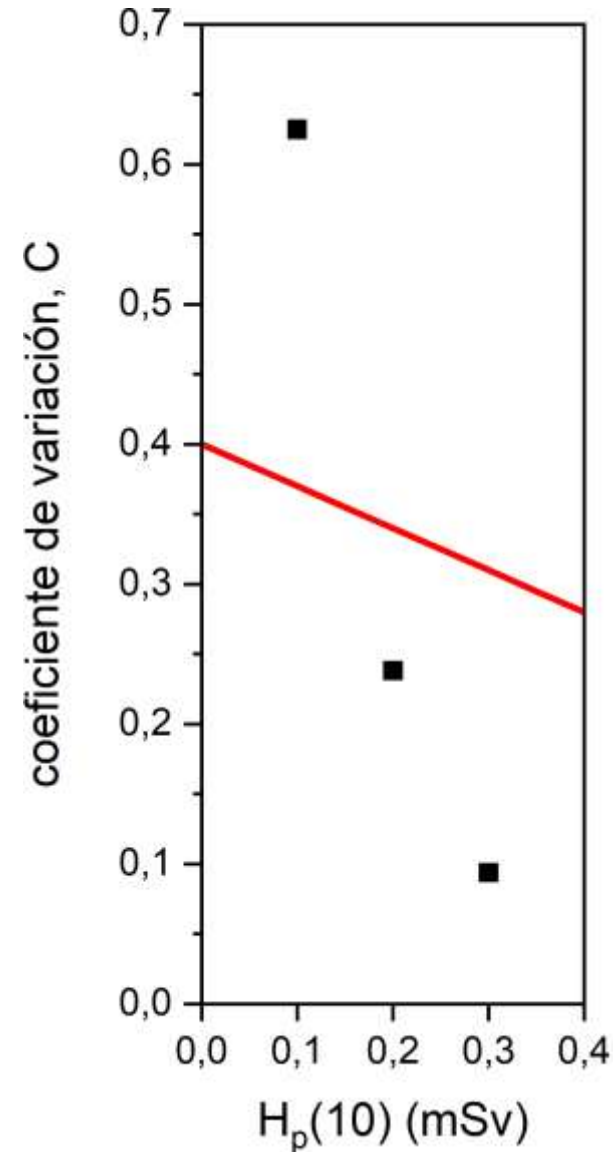
### Criterio de coeficiente de variación:

$$C < r_{max}$$

### Criterio de linealidad:

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

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

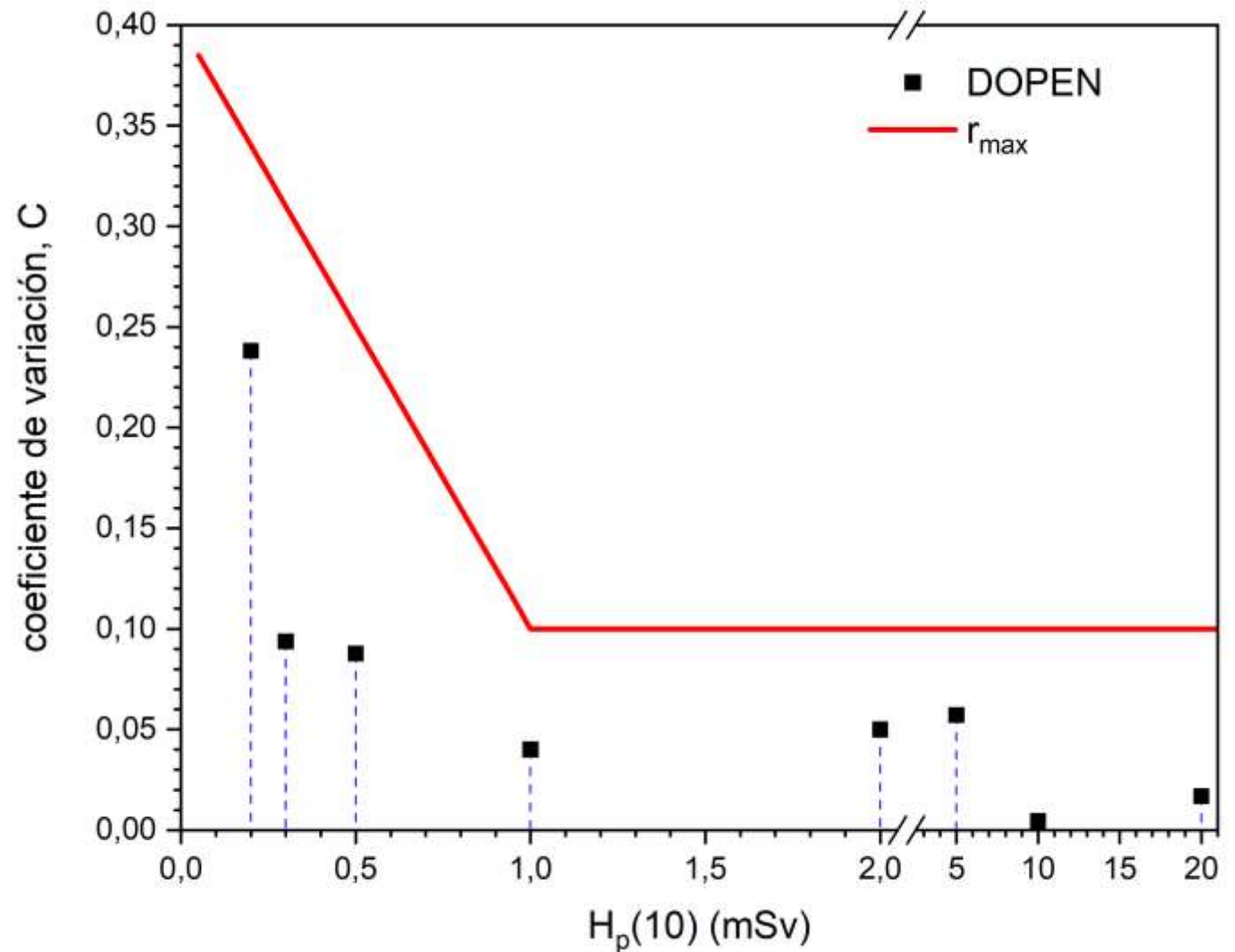


# Coeficiente de variación

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

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

El sistema cumple el criterio para:  
 $0,3 \text{ mSv} \leq H_p(10) \leq 20 \text{ mSv}$



# Linealidad

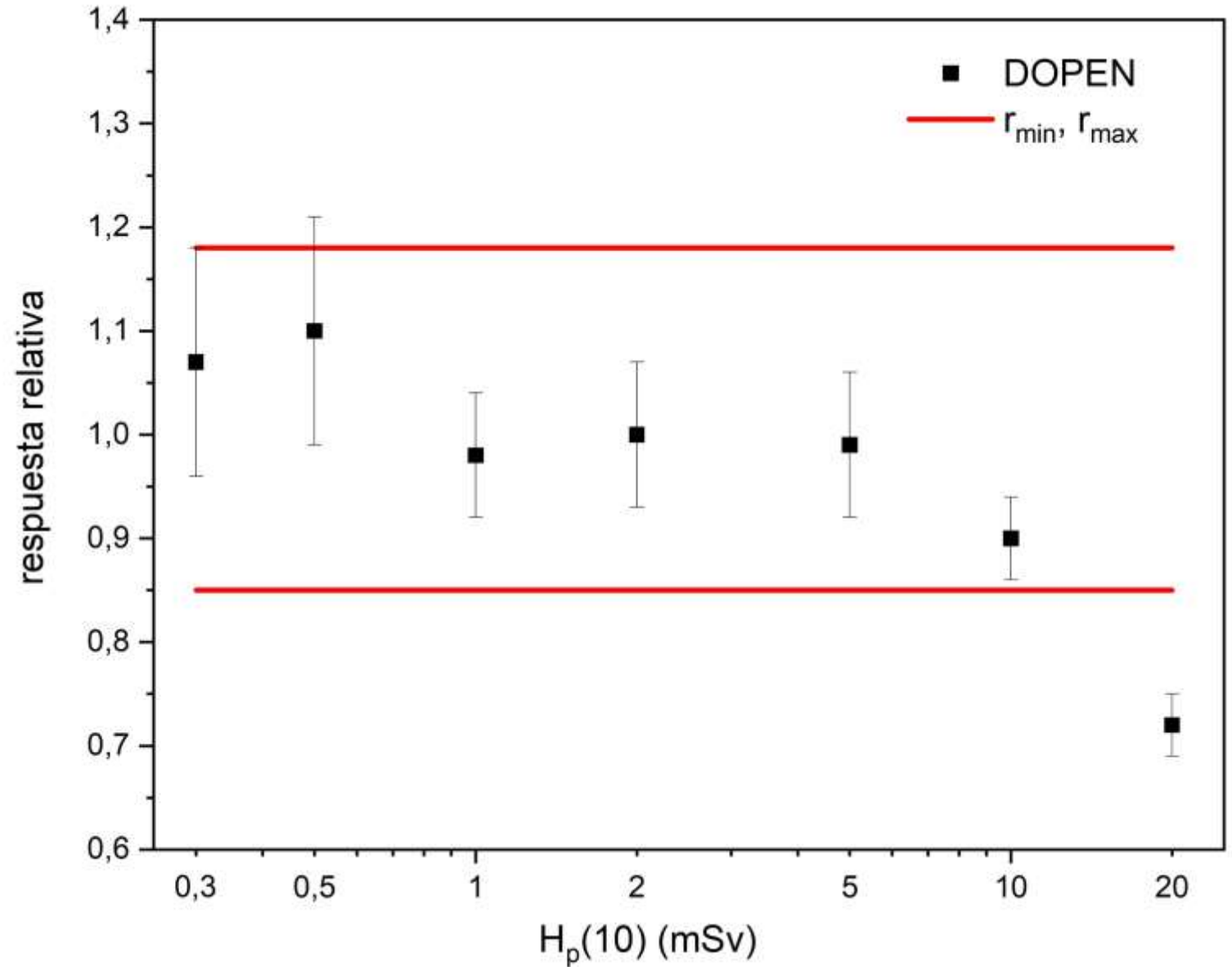
$$r_{min} - \frac{U_{com}}{R_k^{ref}} \leq \frac{R_{k,j}}{R_k^{ref}} \leq r_{max} + \frac{U_{com}}{R_k^{ref}}$$

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

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

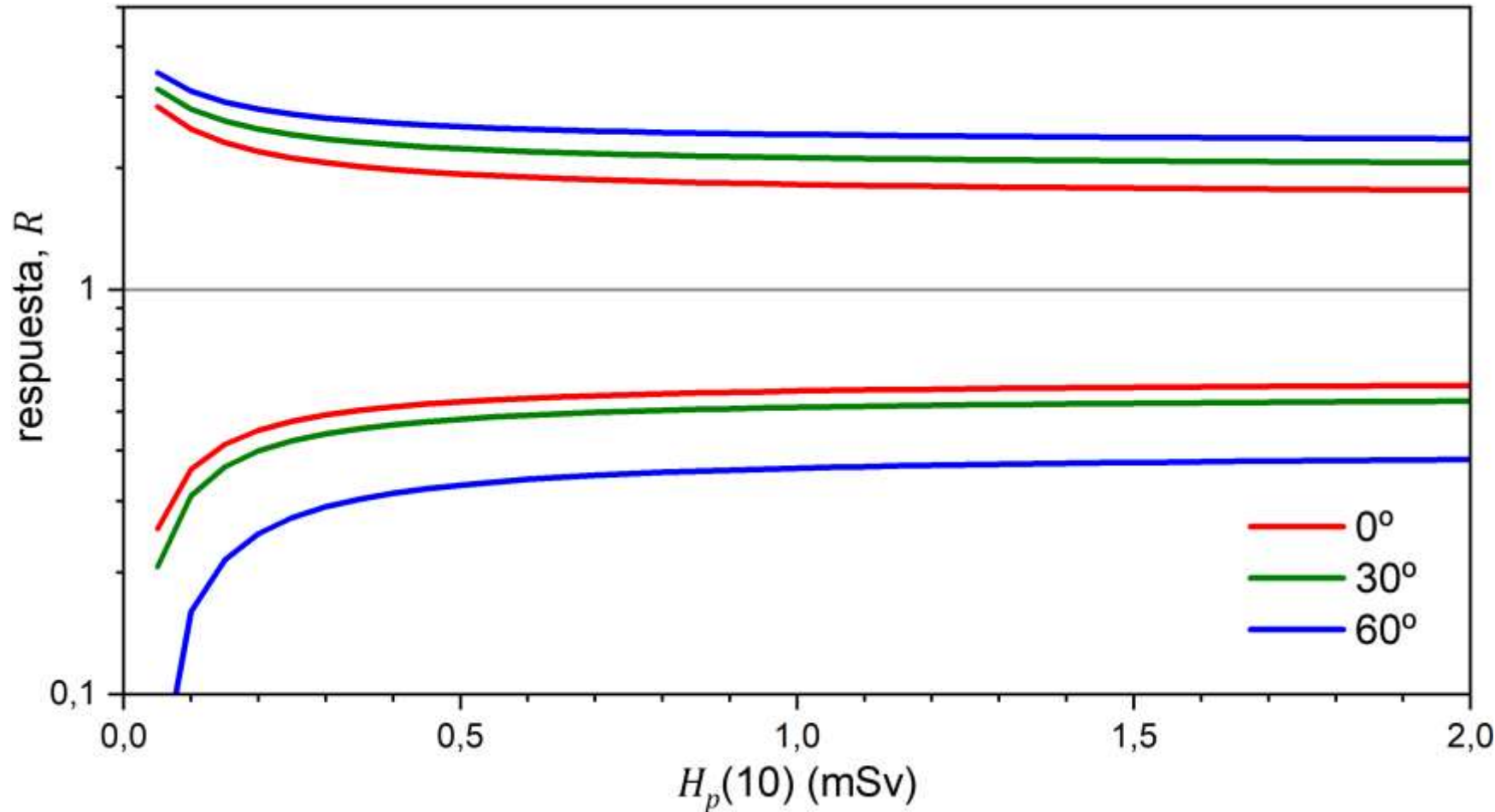
$$R_k^{ref} = \frac{\bar{H}_{k,[2\text{ mSv}]}}{H_{k,[\text{mSv}]}} : \text{respuesta } H_p(10) = 2 \text{ mSv}$$

El sistema cumple el criterio para:  
 $0,3 \text{ mSv} \leq H_p(10) \leq 10 \text{ mSv}$



# 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
0°	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

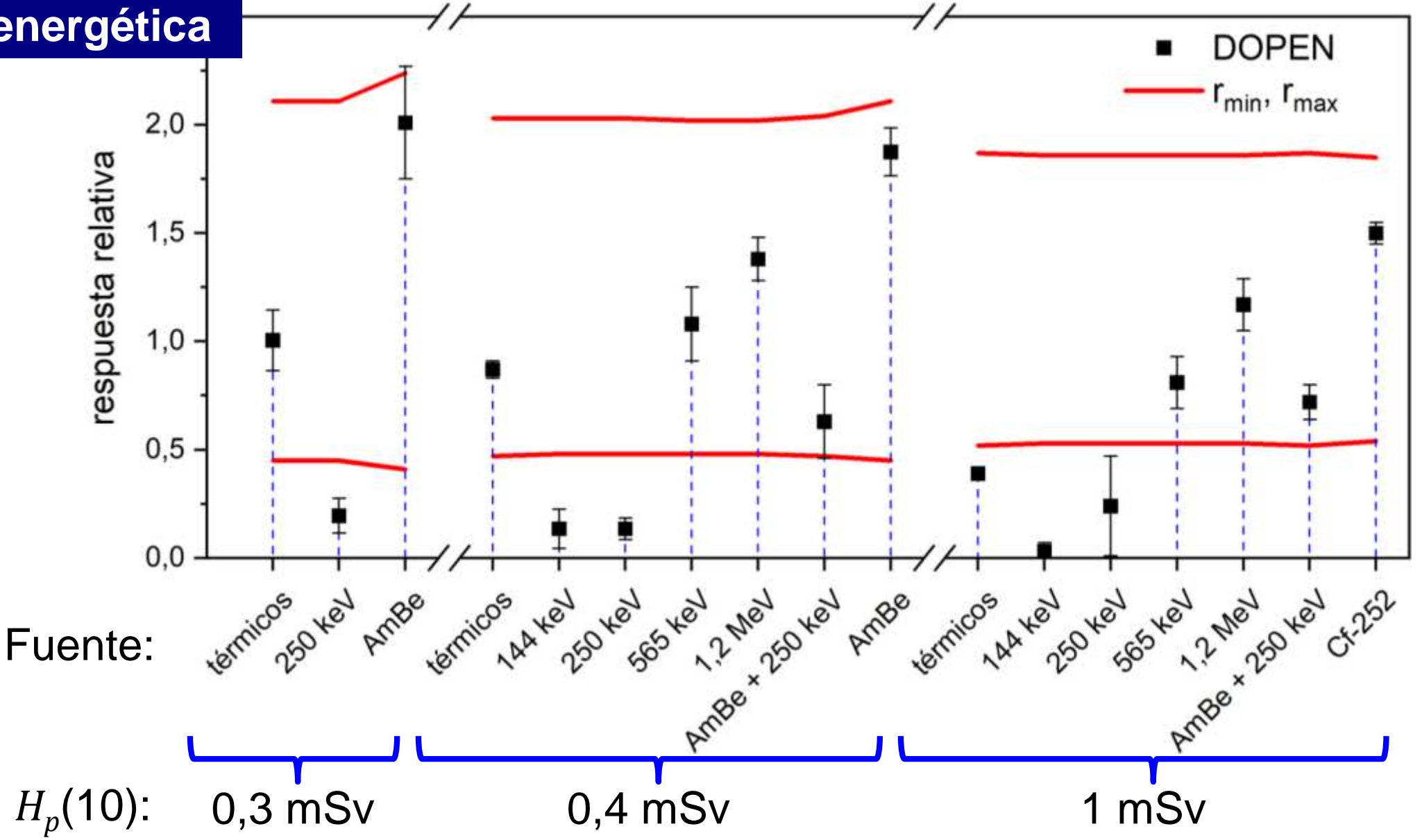
## Respuesta angular

Irradiaciones realizadas (ISO 21909-1):

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

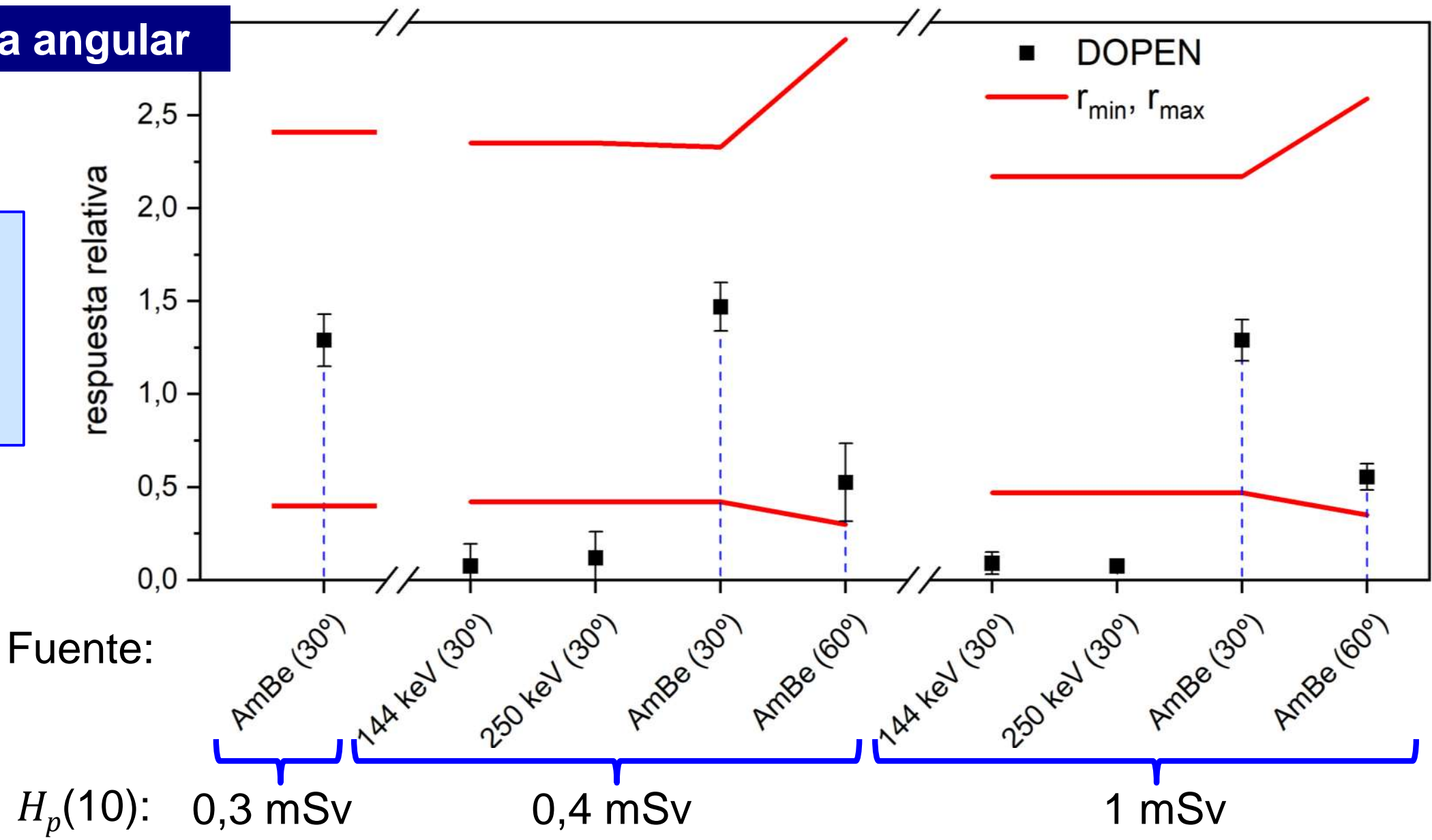
# Respuesta energética

El sistema cumple el criterio para  $E \geq 565$  keV

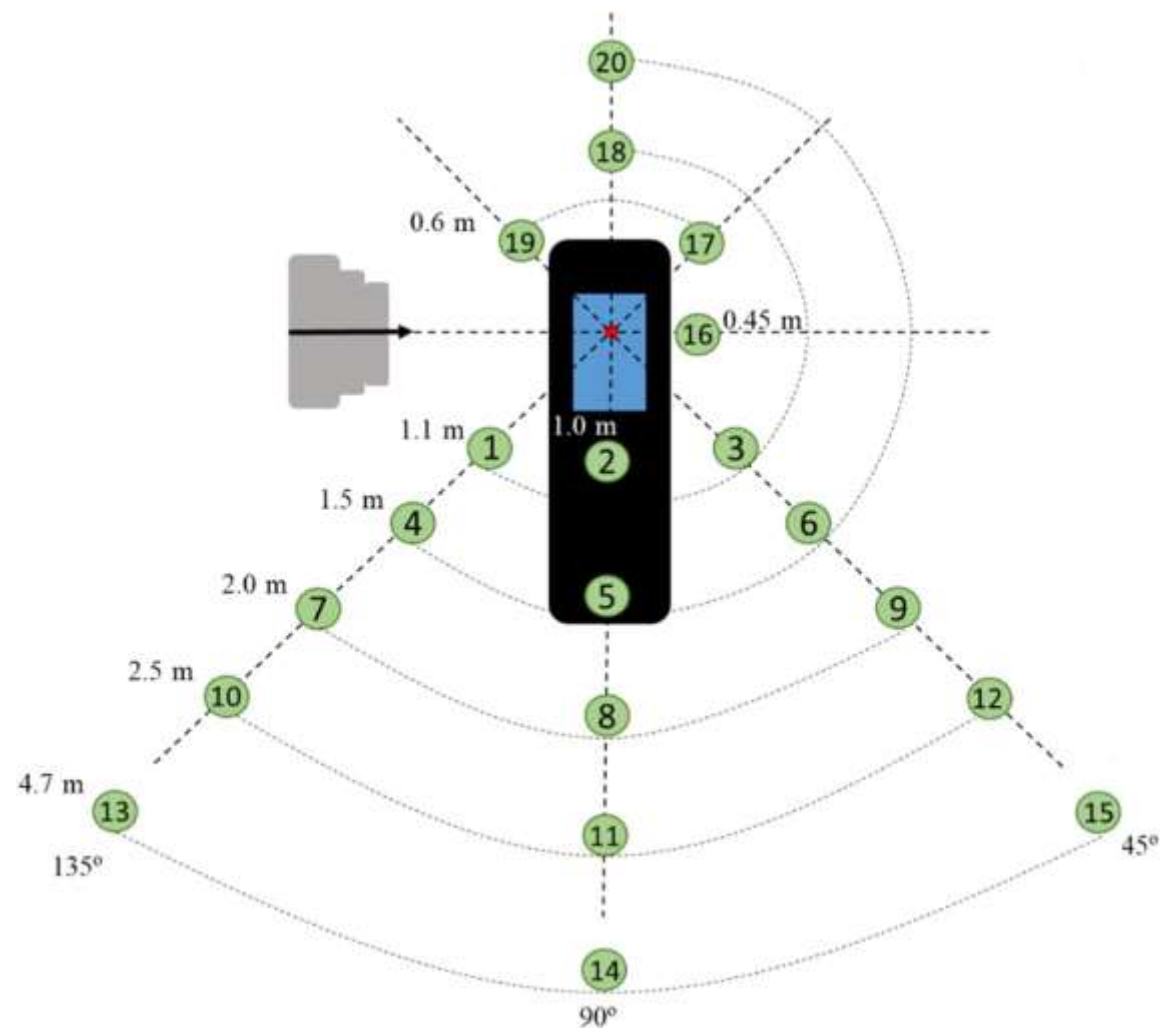


# Respuesta angular

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



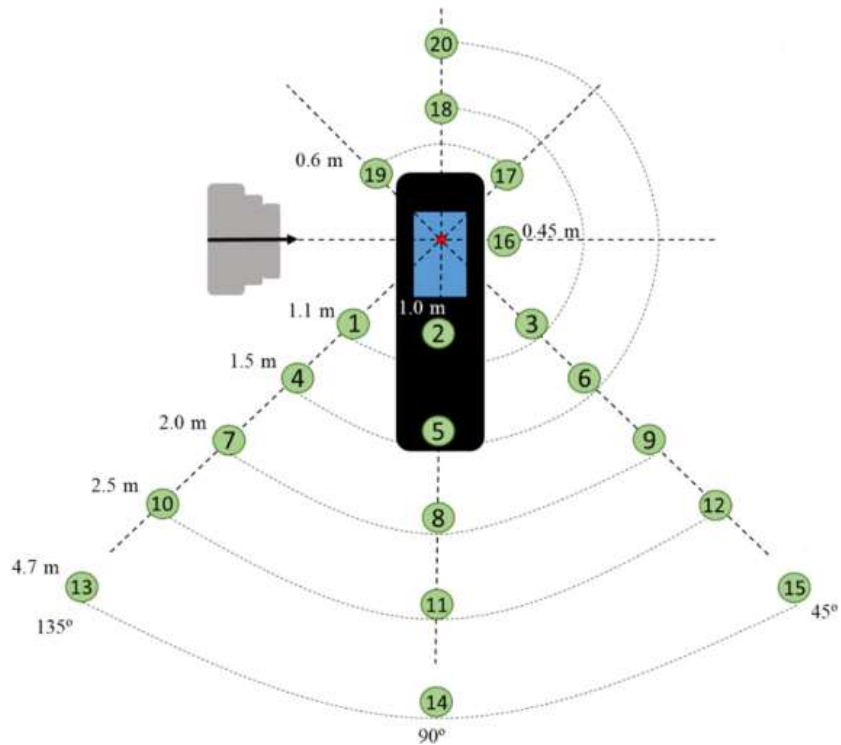
# Evaluación de $H_p(10)$ en la instalación de protonterapia de la CUN



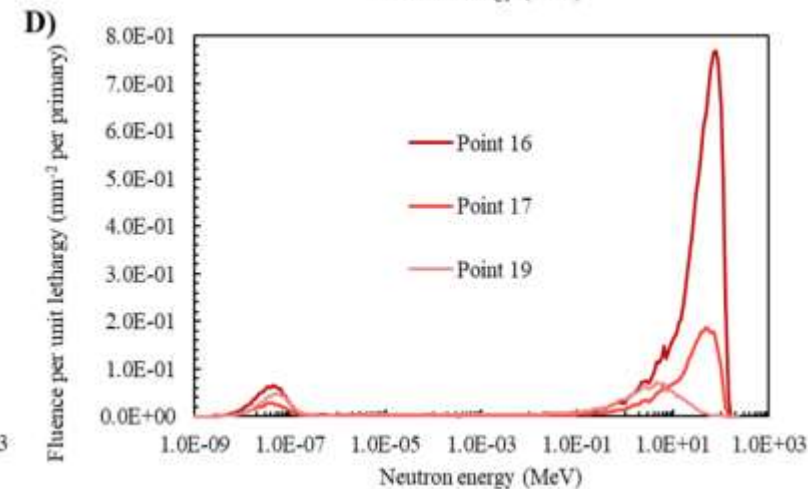
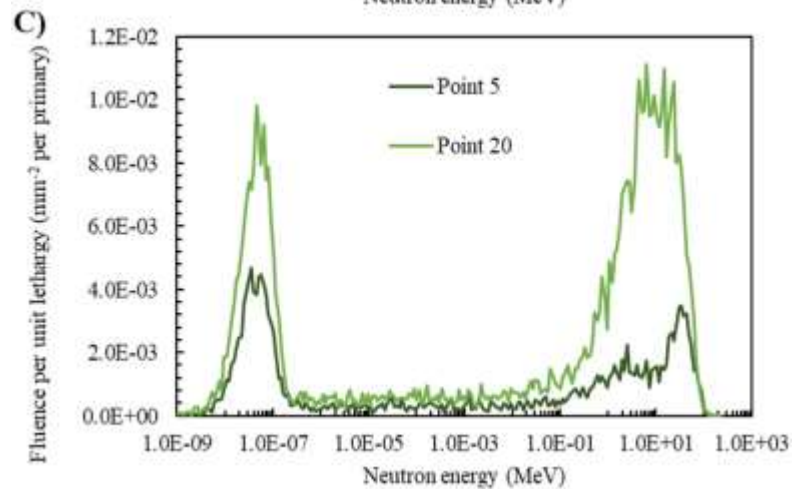
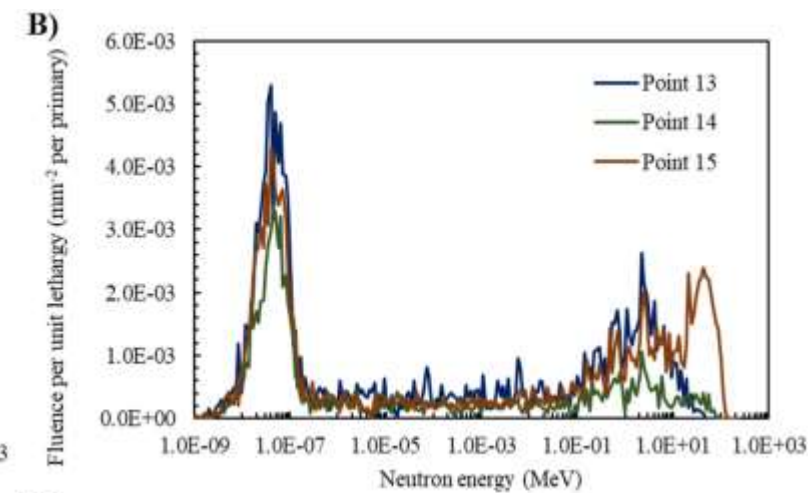
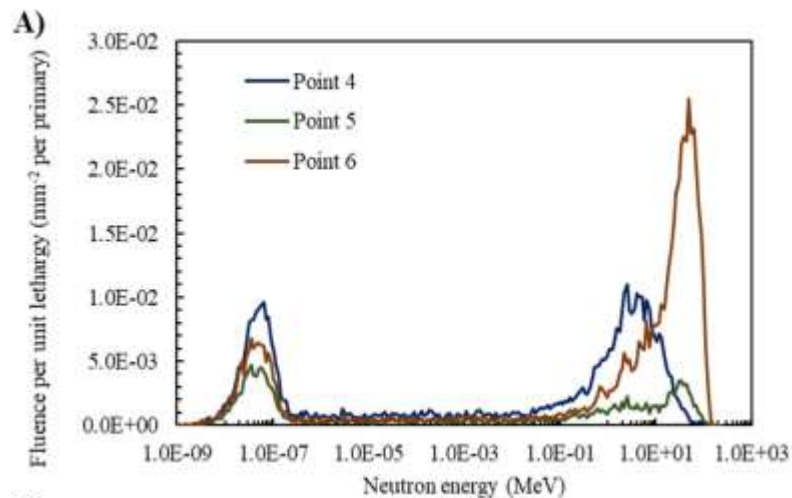
Adaptado de: Martínez-Francés, E. et al., 2025. Phys. Medica 136, 105044, bajo licencia Creative Commons CC-BY.

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



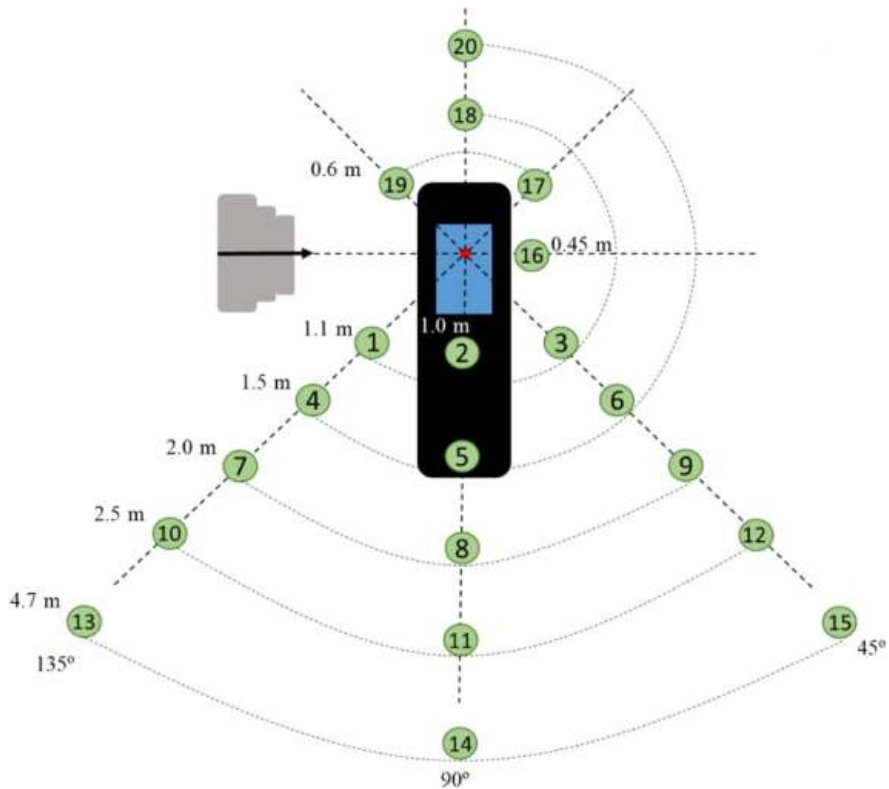
Espectros de fluencia de neutrones calculados con TOPAS\*.



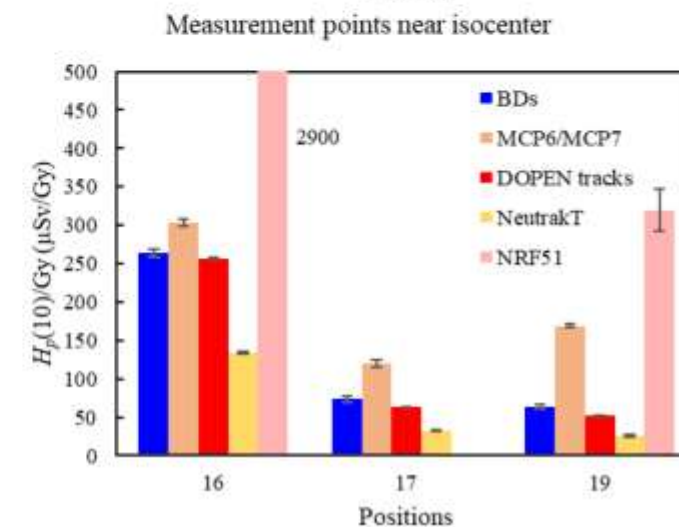
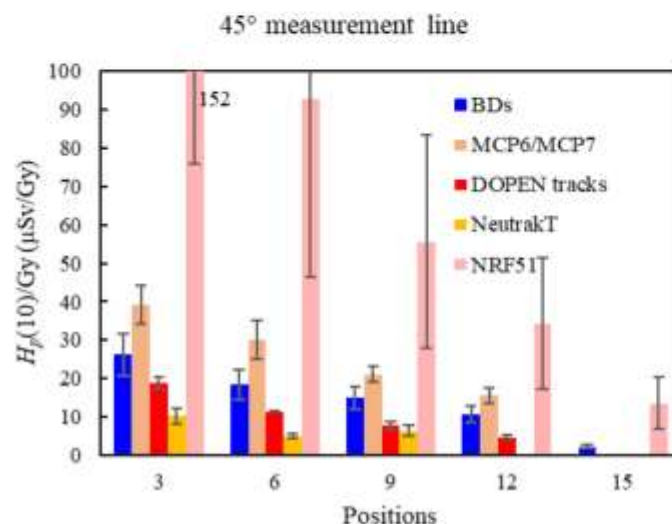
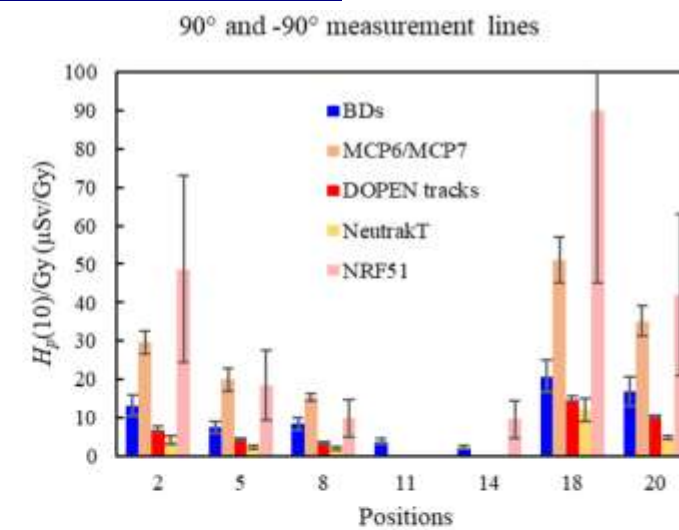
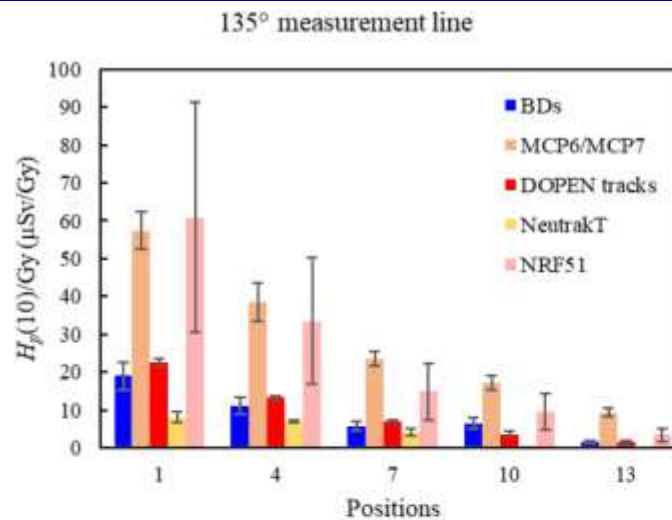
\* Perl, J. et al., 2012. TOPAS: an innovative proton Monte Carlo platform for research and clinical applications. Med. Phys. 39(11):6818-6837.

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



■ 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
  - $\alpha$ :  $0^\circ$  –  $60^\circ$
  - $E \geq 565$  keVFuera 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: 20<sup>th</sup> 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: 4<sup>th</sup> 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).