Optimized Monte-Carlo based dose calculation for low energy X-rays intraoperative radiation therapy

P. Ibáñez[1], M. Vidal[1], P. Guerra[2] y J.M. Udías[1]

[1]Grupo de Física Nuclear, Universidad Complutense de Madrid, CEI Moncloa, Madrid, España

[2] Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Madrid, CEI Moncloa, Madrid, España

pbibanez@ucm.es

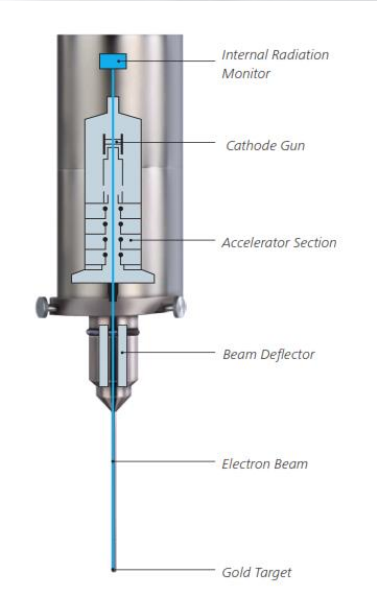
Introducción

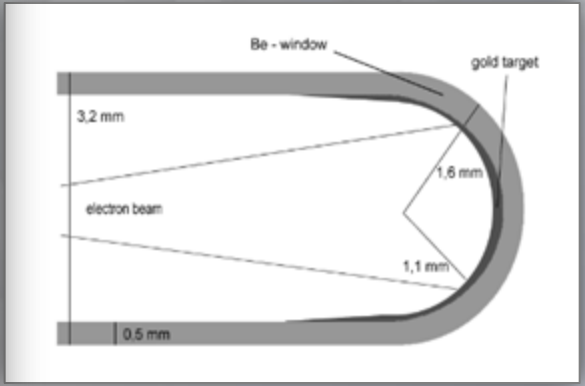
Sistema INTRABEAM

Radioterapia Intraoperatoria con rayos X de baja energía (XIORT)

Fuente de rayos X en miniatura

- Haz de electrones de 50 keV que interacciona en un blanco de oro
- Rayos X de baja energía (hasta 50 kV)





Geometría de la aguja [1]

Intrabeam (Carl Zeiss Meditec)

[1] S. Clausen, *et al*. 2012. Z. Für Med. Phys. 22(3), 197-204.

Aplicadores del sistema INTRABEAM

Aplicador de aguja
Espina, cerebro

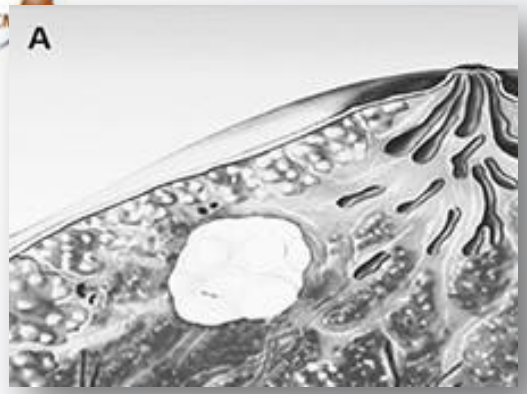
Aplicador esférico
Mama

Aplicador cilíndrico
Vagina, endometrio

Aplicador de superficie
Piel

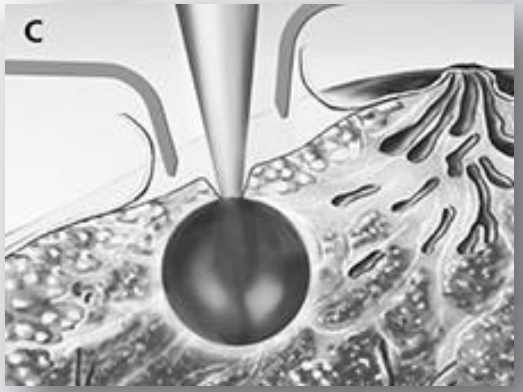
Aplicador plano
Gastrointestinal

Intrabeam (Carl Zeiss Meditec)



A: Paso 1. Se determina la posición del tumor.

B: Paso 2. El tumor se elimina mediante cirugía.



C: Paso 3. Se posiciona el aplicador de INTRABEAM en la cavidad del tumor.

D: Paso 4. Se aplica radiación durante unos 30 minutos. Se quita el aplicador y se cierra la incisión.

Figuras adaptadas de zeiss.com

Objetivo y Motivación

• La radioterapia intraoperatoria con rayos X de baja energía se usa cada vez más, especialmente para cáncer de mama con aplicadores esféricos, pero también en casos de cifoplastia con aplicadores de aguja y tumores superficiales con aplicadores planos y de superficie.

Objetivos:

○ Generación de espacios de fase optimizados para los aplicadores esféricos, de aguja, planos y de superficie.

○ Calcular dosis de forma rápida y precisa a partir de un perfil experimental de dosis en profundidad (PDD) en agua.

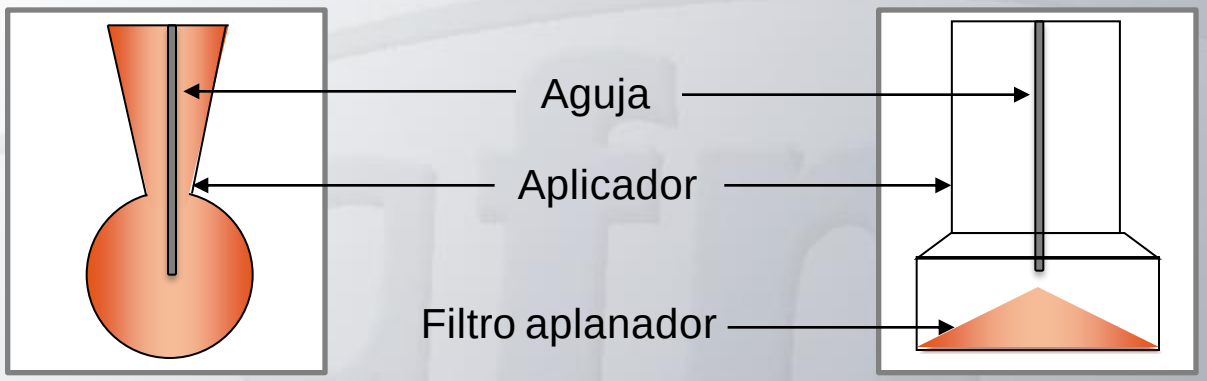
- Posible gracias a una generación previa de una base de datos de espacios de fase y PDD en agua para cada aplicador.

○ Validación del proceso de ajuste completo contra medidas.

Métodos

I) Generación de la base de datos

- Simulación Monte Carlo (MC) de la aguja y de los aplicadores esféricos, planos y de superficie
  - Código: penEasy [2]
  - Modelos realistas basados en la geometría detallada de cada aplicador.
  - Espacios de fase y PDD monocromáticos para cada bin de energía.



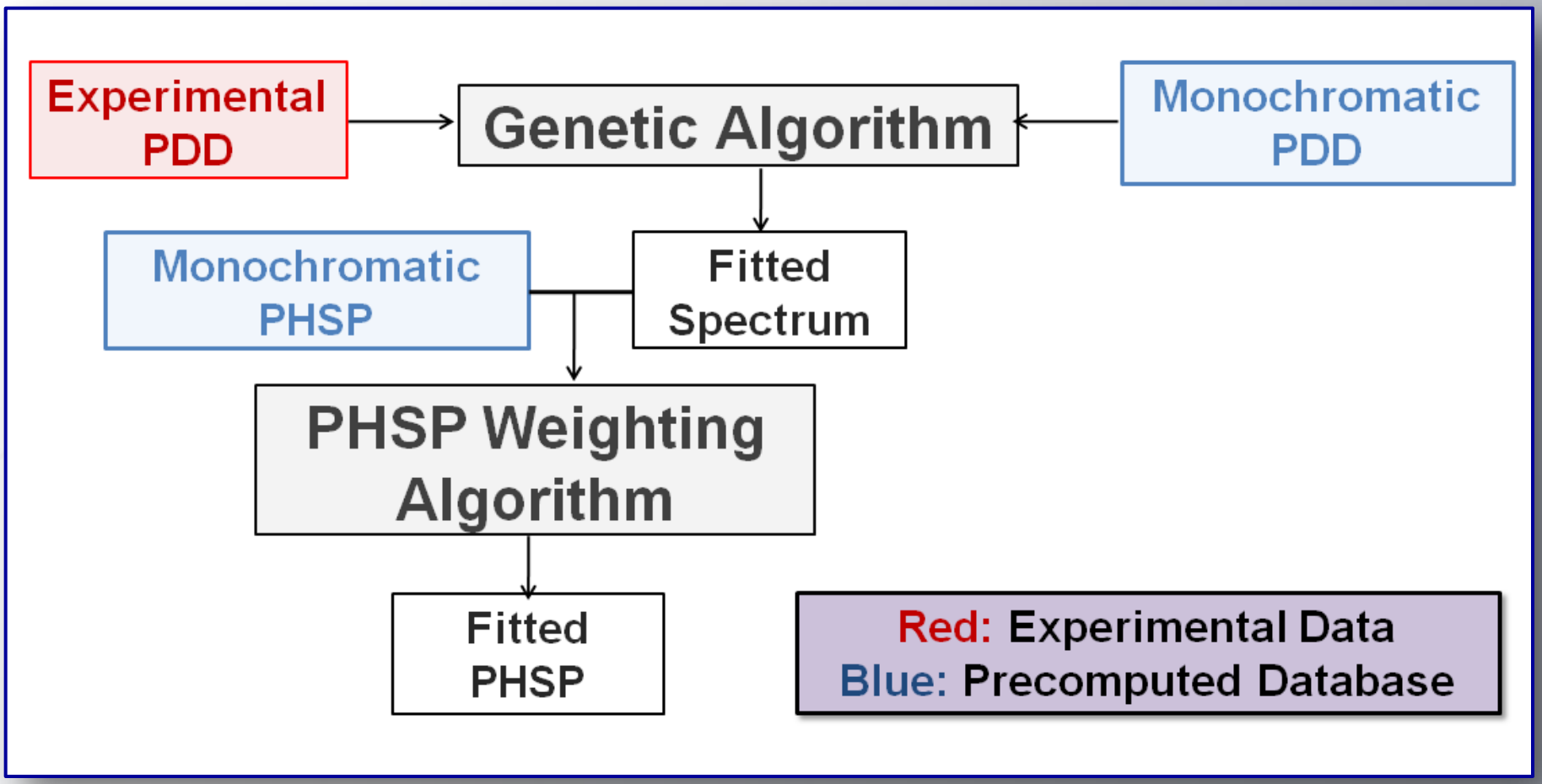
- Bineado de los espacios de fase [3] para facilitar la manipulación

PHSP(E,x,y,z,v_x,v_y,v_z) — PHSP(E,ρ,θ,ϕ')

- Tiempo de computación: Varias horas

[2] J. Sempau *et al.* 2011. Med. Phys. 38(11), 5887. [3] E.Herranz, *et al.* 2015. Phys Med Biol. 60(1):375-401.

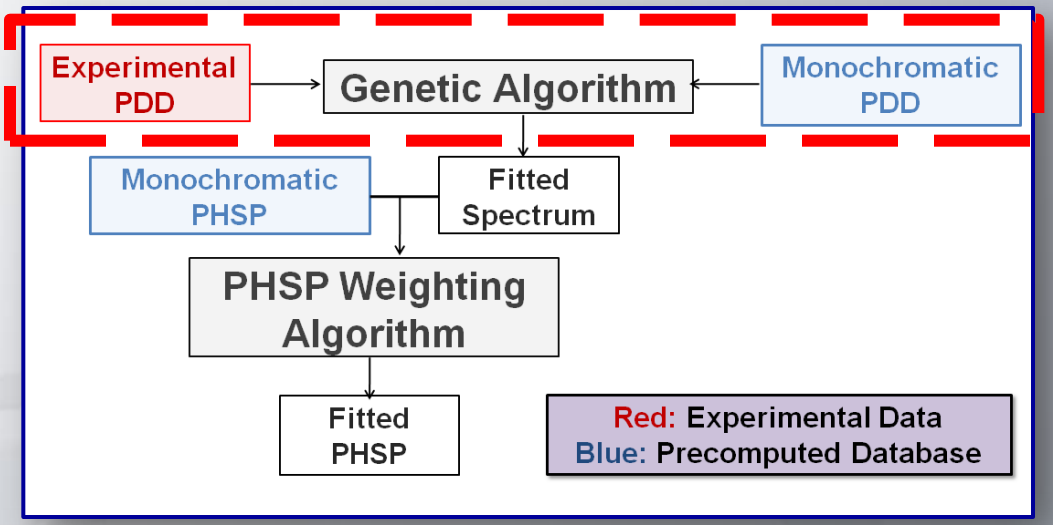
II) Procedimiento de ajuste

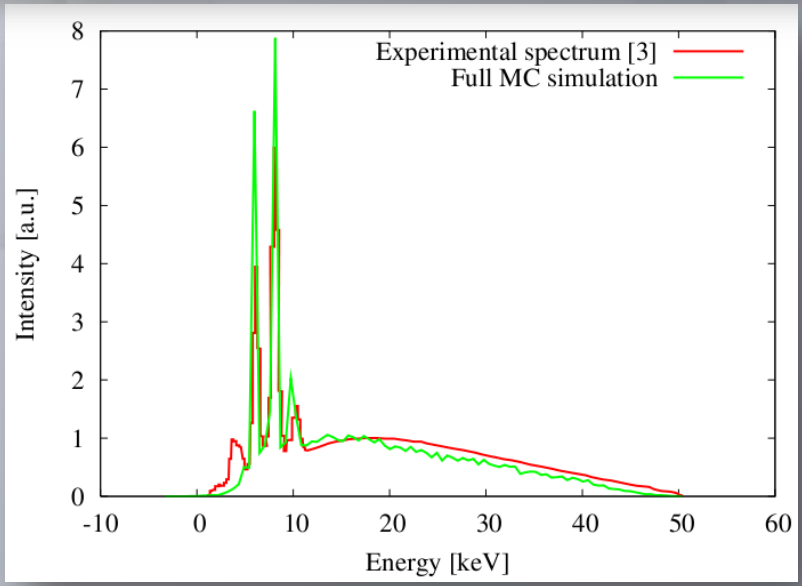


II) Procedimiento de ajuste

Fase 1:

- Ajuste de una combinación de PDD monocromáticas a la PDD experimental.
- Espectro de energía como una función sencilla de energía que incluye un fondo de bremsstrahlung y rayos X característicos [3]
- Utilización de un algoritmo genético [4] que permite un ajuste robusto y restringido de los parámetros del espectro.





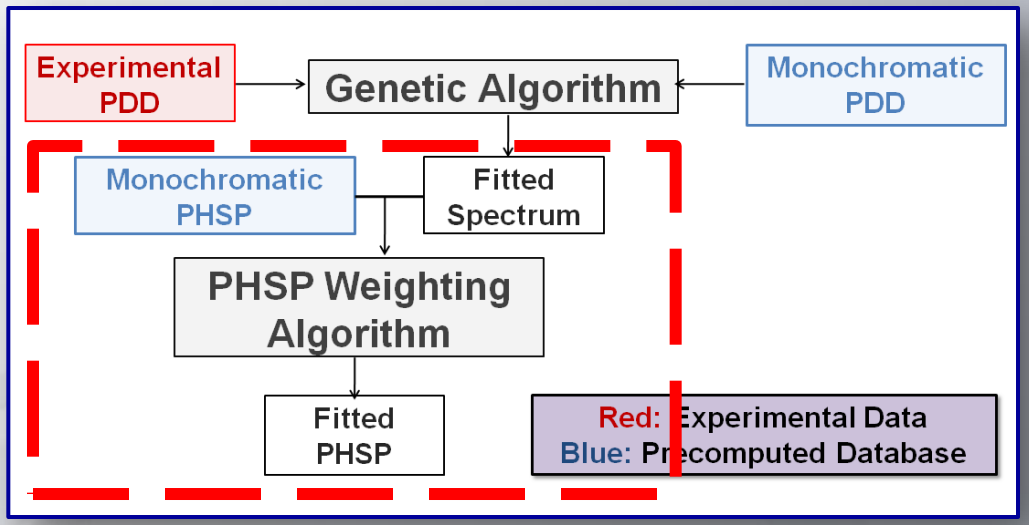
Espectro de energía de la aguja

[3] S. Clausen, *et al*. 2012. Z. Für Med. Phys. 22(3), 197-204
[4] C. Fernández-Ramírez, *et al*. 2008. Phys. Rev. C 77(6)

II) Procedimiento de ajuste

Fase 2:

- Combinación de los PHSP monocromáticos en función del espectro.
- PHSP ajustado que reproduce la PDD experimental.
- Cálculo de dosis a partir del PHSP optimizado:
  - penEasy.
  - Algoritmo híbrido casero [6].



Menos de 6 minutos de tiempo de computación

[6] M. Vidal, *et al.* 2014. Radiother. Oncol., 111(S.1):117-118. ESTRO 2014. Vienna, Austria.

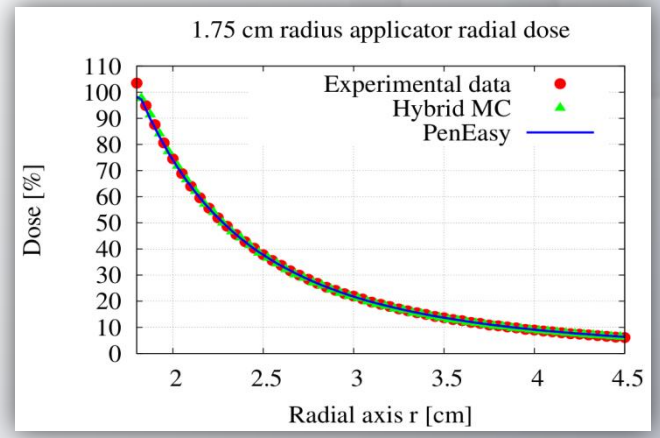
Algoritmo híbrido

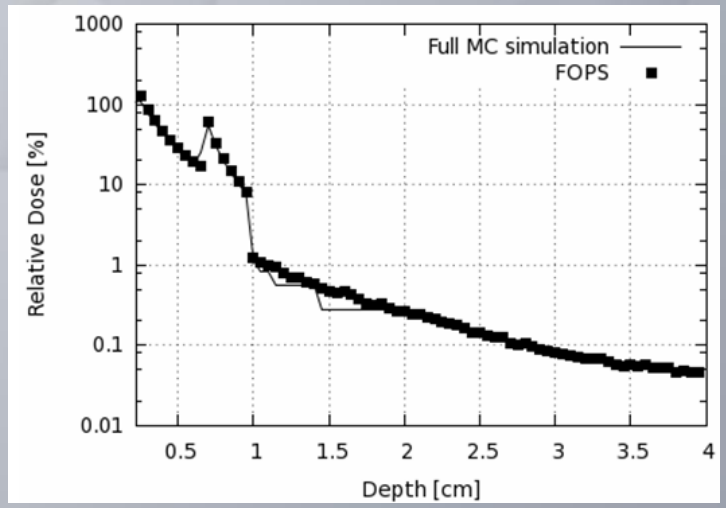
Incluye

- Efecto fotoeléctrico
- Scattering Compton (primer y segundo orden)
- Suavizado de la dosis (normalización)

Validado contra simulaciones Monte Carlo en medios homogéneos y heterogéneos [6]

Tiempo de computación: Menos de 5 minutos en un PC (vs. 10-12h usando el código penEasy)





[6] M.Vidal, *et al.* 2014. Radiother. Oncol., 111(S.1):117-118. ESTRO 2014. Vienna, Austria.

III)Validación del procedimiento de ajuste

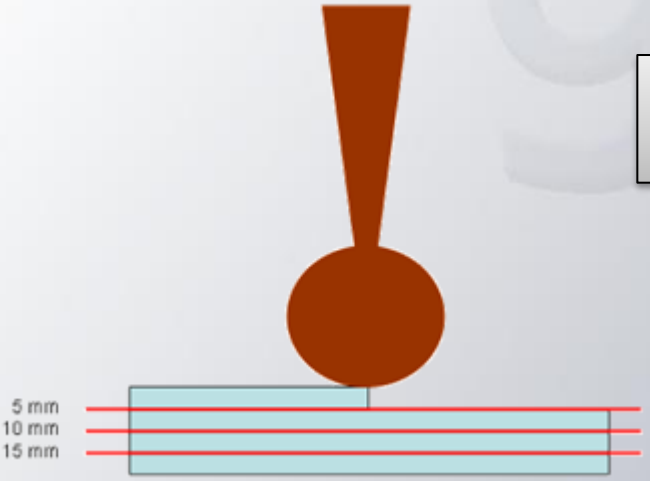
Aplicadores esféricos y de aguja

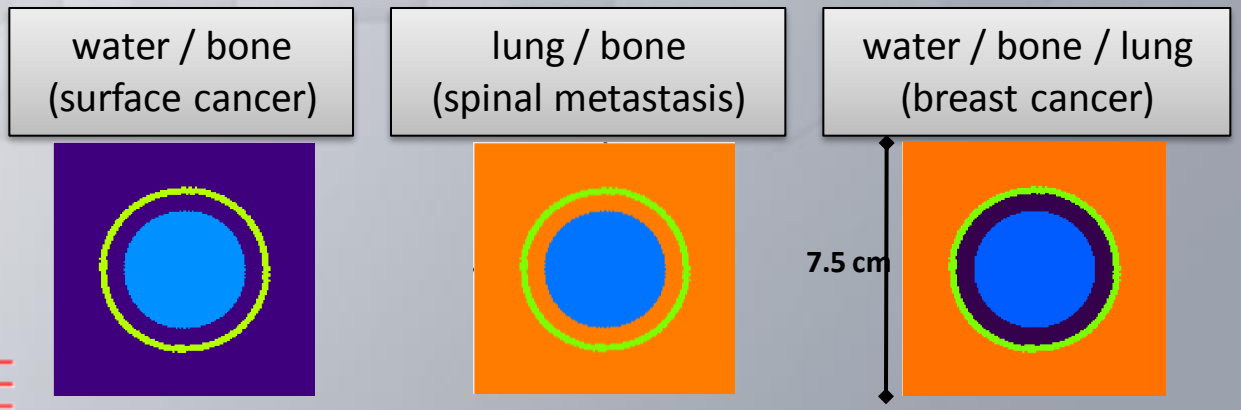
Maniquíes homogéneos

- Simulaciones MC (penEasy)
- Datos experimentales en agua

Maniquíes heterogéneos

- Simulaciones MC (penEasy) como referencia
- Medidas experimentales realizadas en el UniversitätsKlinikum de Mannheim





III)Validación del procedimiento de ajuste

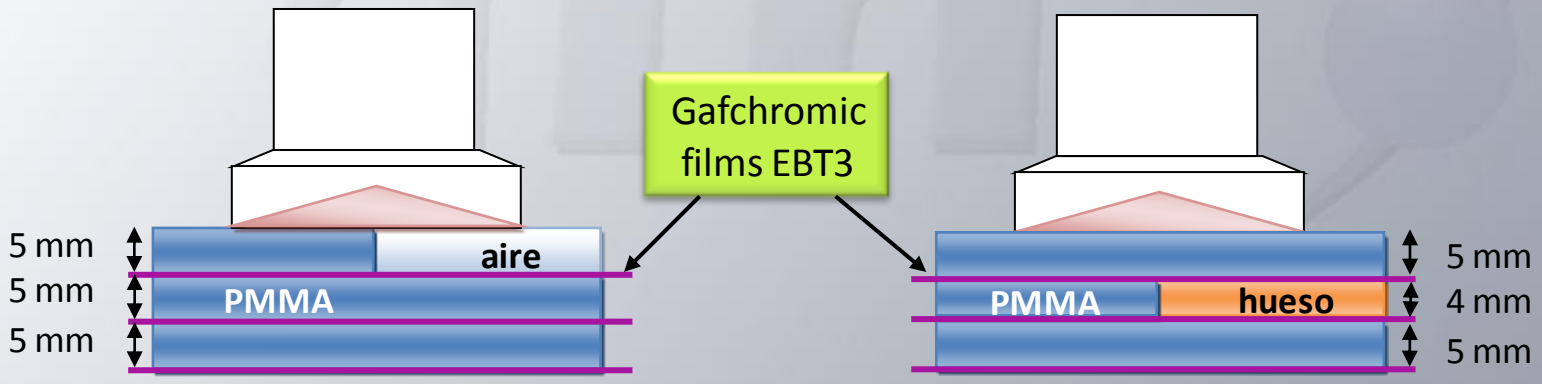
Aplicadores planos y de superficie

Maniquíes homogéneos

- Simulaciones MC (penEasy)
- Datos experimentales en agua

Maniquíes heterogéneos

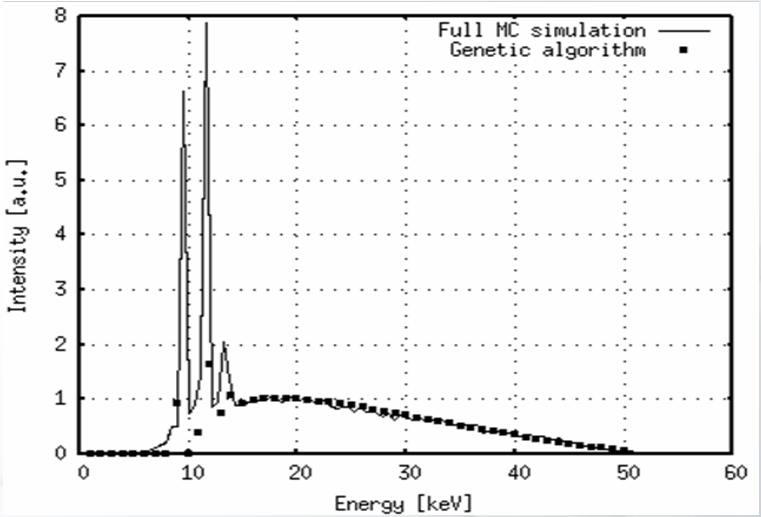
- Realizadas en el Institut Universitaire du Cancer de Toulouse.

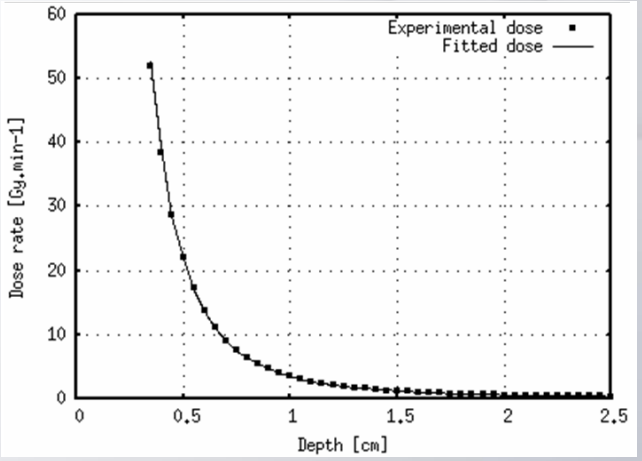


Resultados

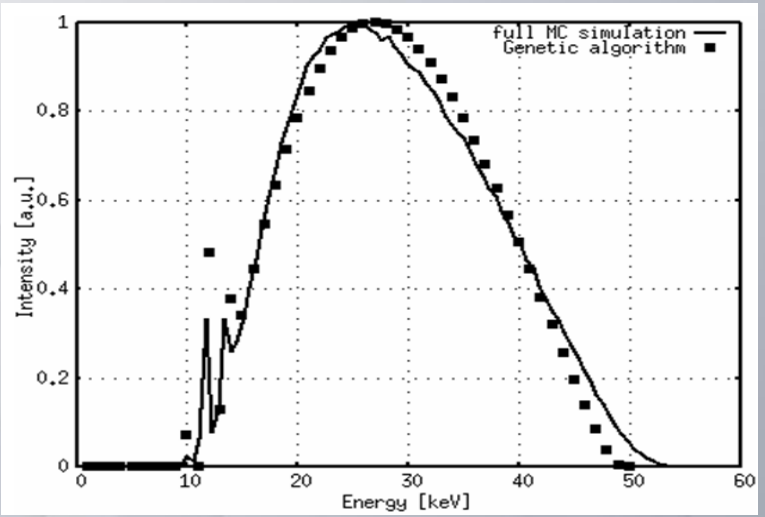
Optimización del espectro de energía

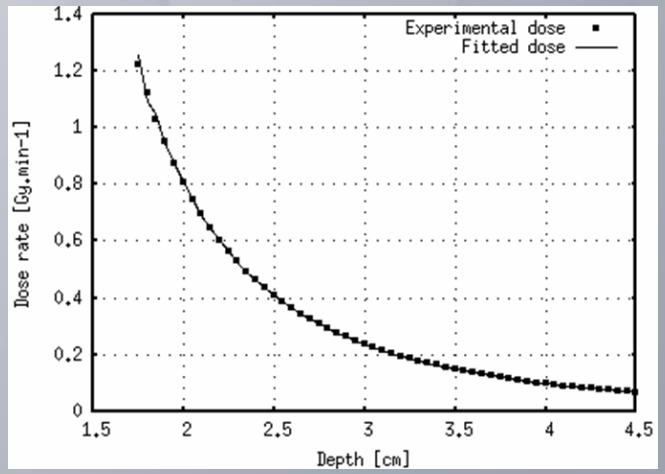
Aplicador de aguja





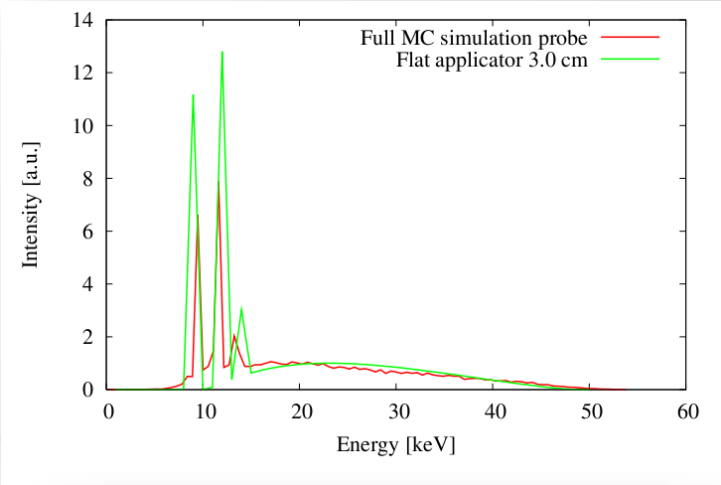
Aplicador esférico

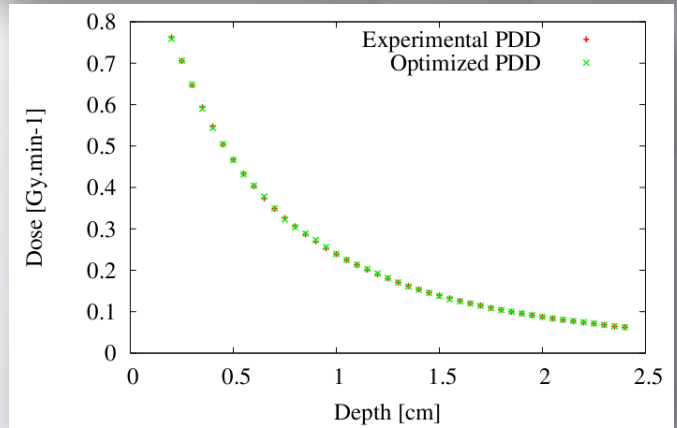




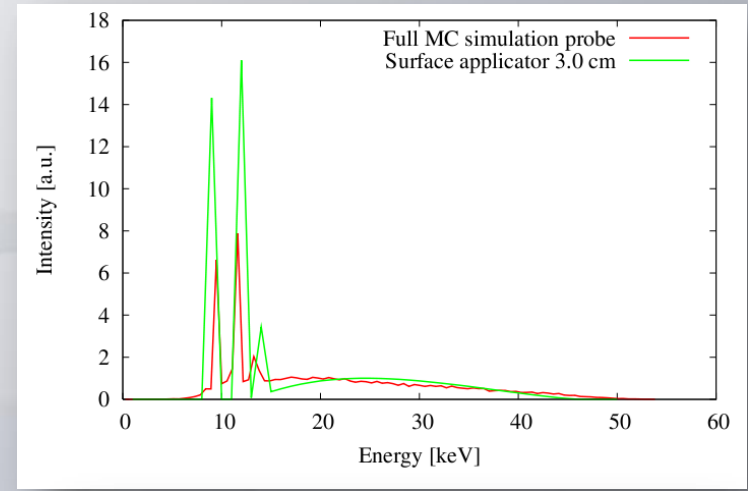
Optimización del espectro de energía

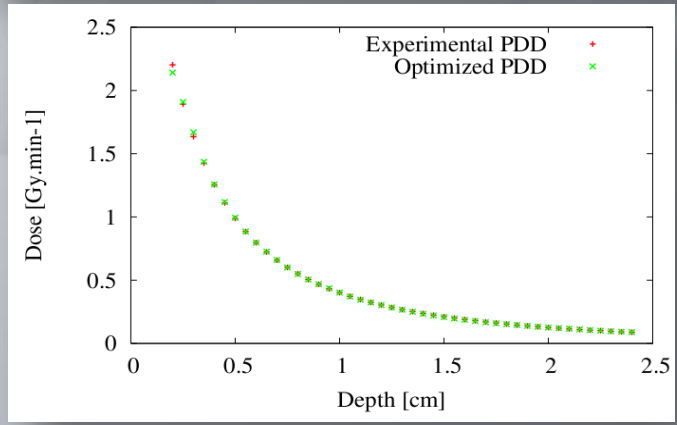
- Aplicadores planos





- Aplicadores de superficie





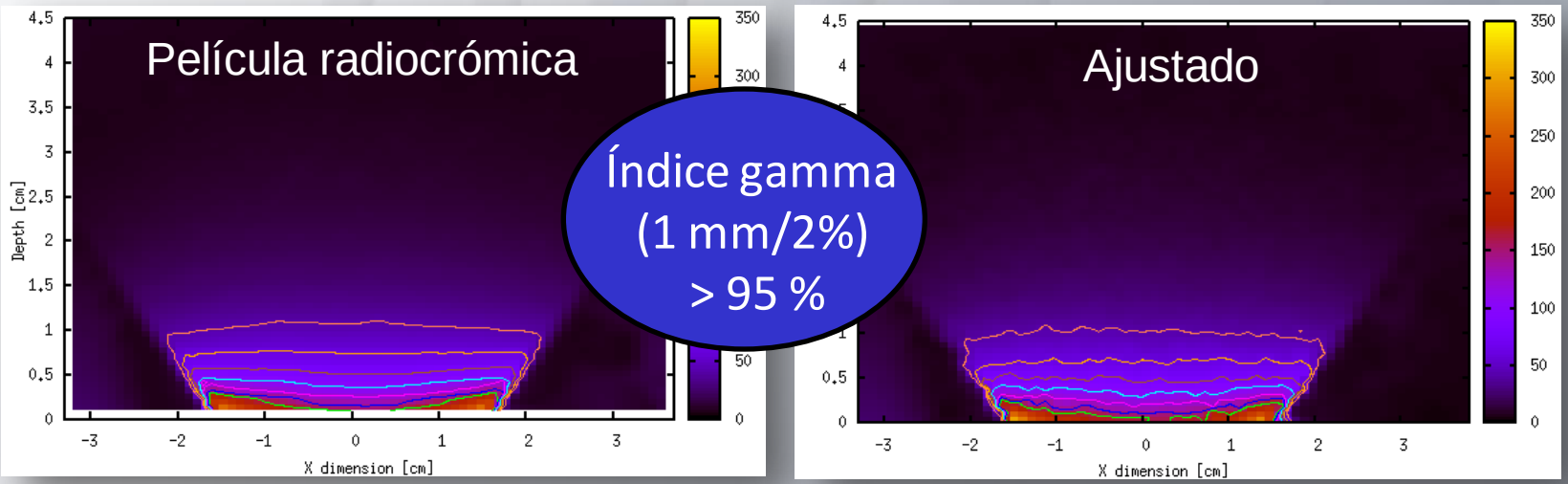
Validación del procedimiento de ajuste

Maniquí de agua:

Aplicadores esféricos: Comparación contra simulaciones MC
Índice gamma (2% / 1 mm) > 97 %

Aplicadores planos y de superficie: Comparación contra medidas experimentales
Índice gamma (2% / 1 mm) > 95 %

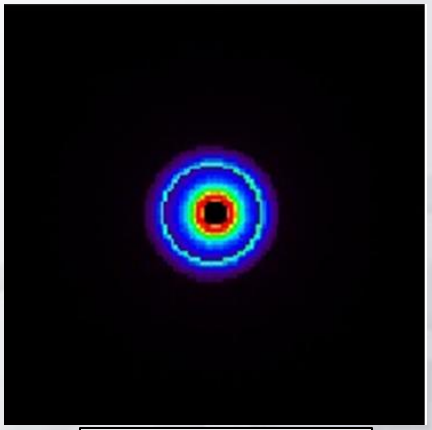
Ejemplo de aplicador plano de 3 cm de diámetro



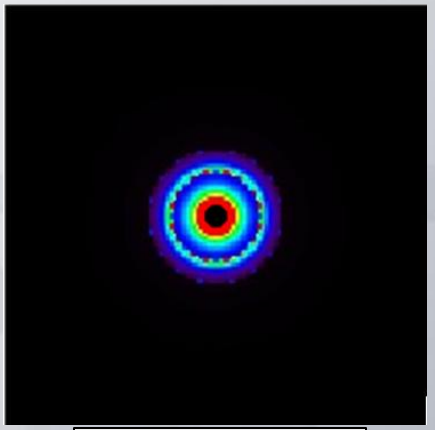
Validación del procedimiento de ajuste

Maniquíes heterogéneos. Simulaciones penEasy:

•Aplicador de aguja en maniquí de pulmón / hueso/ pulmón



Ajustado



penEasy

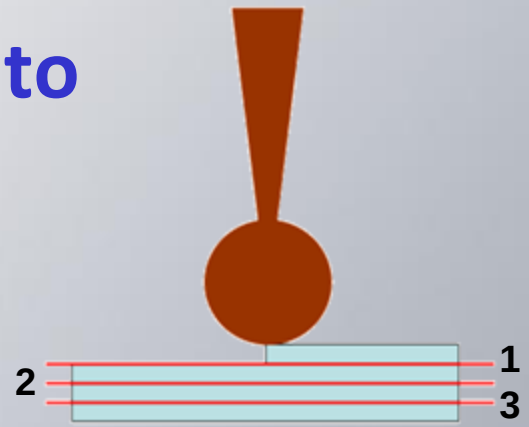
Índice gamma(2% / 2 mm): γ > 95 %

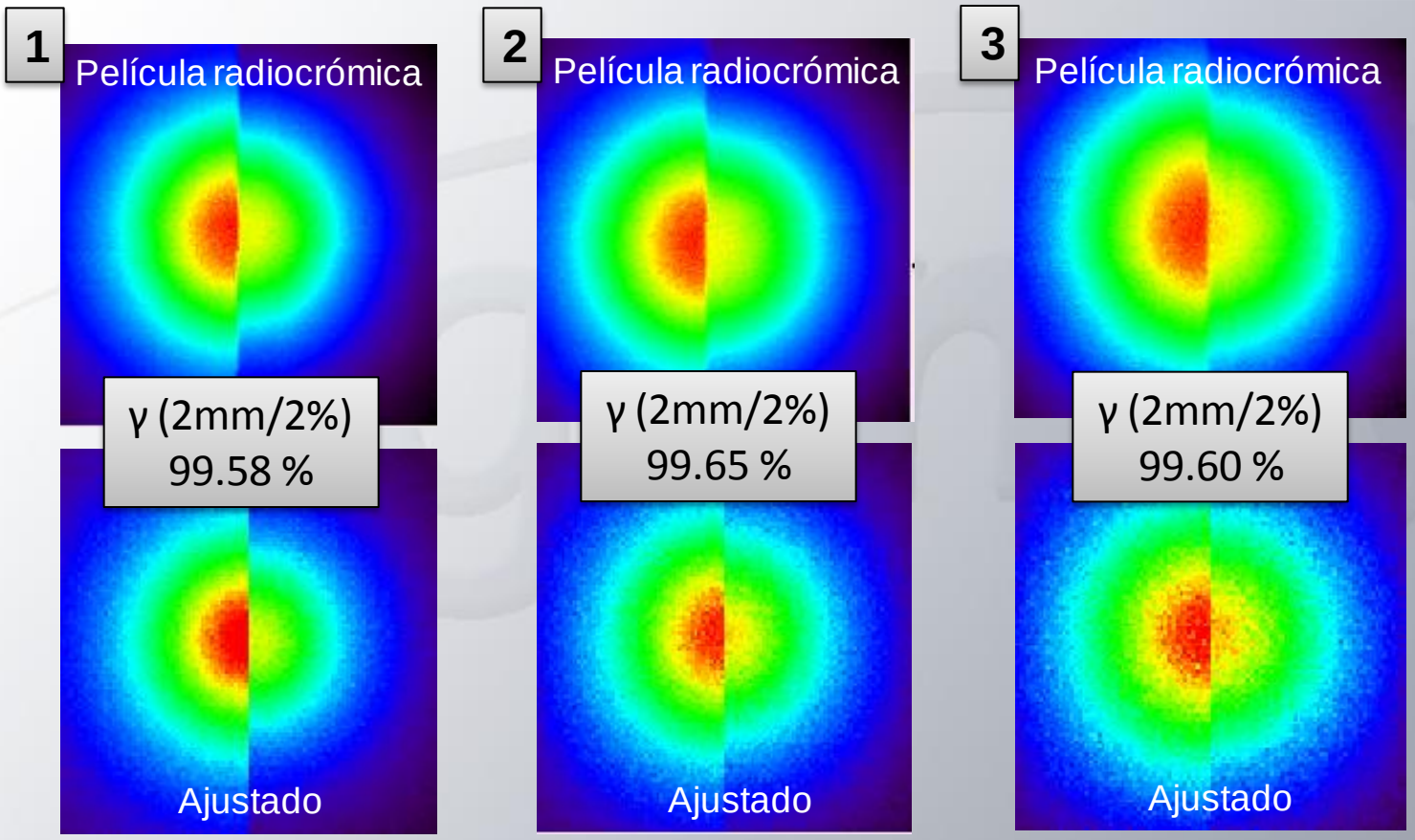
Applicator radius [cm]	Needle	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
water / bone	99,5	96,1	96,6	97,5	97,9	97,5	98,8	98,6	98,4
lung / bone	97,2	96,8	97,2	96,6	97,9	95,3	98,2	98,6	98,3
water / bone / lung	99,5	96,1	96,6	96,9	97,9	97,5	98,8	98,6	98,4

Validación del procedimiento de ajuste

Maniquíes heterogéneos. Medidas experimentales

- Aplicador esférico de D=40 mm en un escalón

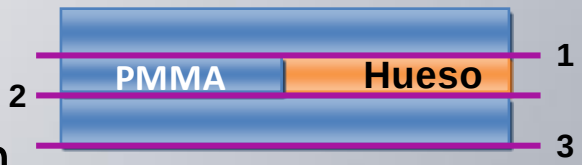




Validación del procedimiento de ajuste

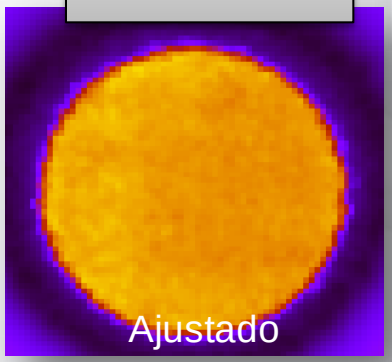
Maniquíes heterogéneos:

Escalón de hueso con un aplicador plano de 3 cm

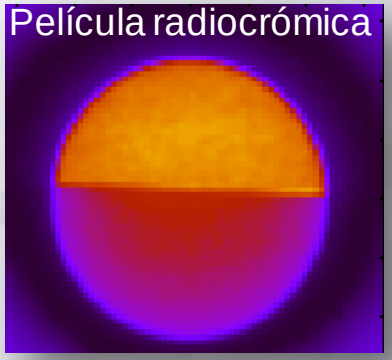


1

γ (1mm/3%)
93%

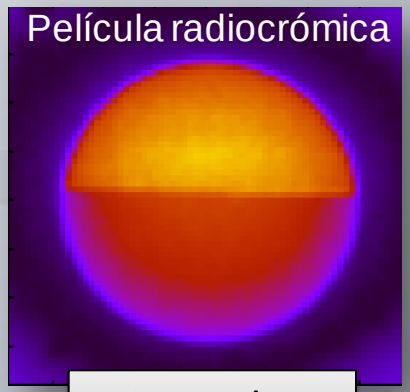


2

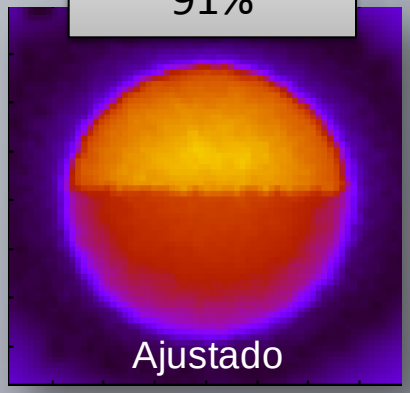


γ (1mm/3%)
95%

3



γ (1mm/3%)
91%



Conclusión y Perspectivas

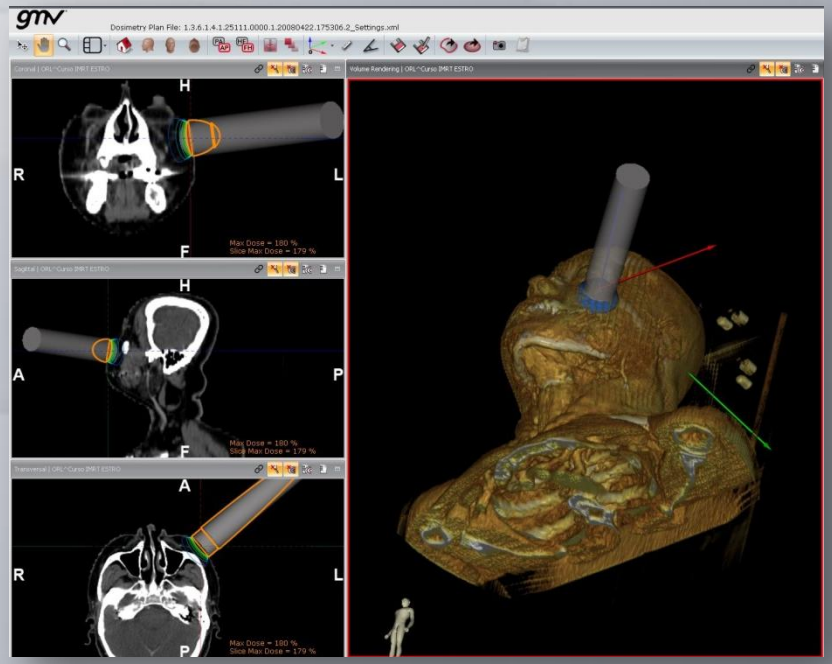
✓ El método de optimización propuesto para determinar PHSP a partir de PDD experimentales en agua reproduce la distribución de dosis medida para diferentes aplicadores (superficie, planos y esféricos), con precisión suficiente para una planificación de XIORT.

✓El método es flexible y rápido, obteniendo un PHSP a partir de la base de datos precalculada en minutos.

✓El algoritmo genético y el mezclador de PHSP se han incorporado en Radiance ® [7], un planificador para radioterapia intraoperatoria desarrollado por la compañía GMV.

✓ Perspectiva:

- ✓ Modelar aplicador ginecológico.



Radiance® (GMV)

[7] J. Pascau, et al. 2012. IJROBP. 83(2), 287-295.

Agradecimientos

- Comunidad de Madrid (S2013/MIT-3024 TOPUS-CM)

- Ministerio de Ciencia e Innovación (Spanish Government)

  ENTEPRASE

  PRECISION

  XIORT (IPT-2012-0401-300000)

  Particle Physics National Program (FPA2010-17142)

- CPAN, Centro de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear (CSD-2007-00042@Ingenio2010)

- Moncloa Campus of International Excellence.