

EVALUACIÓN DOSIMÉTRICA DEBIDO AL CAMBIO DE ENERGÍA EN FANTOMAS HETEROGÉNEOS.

DOSIMETRIC EVALUATION DUE TO ENERGY CHANGE IN HETEROGENEOUS PHANTOMS.

Luis E. Emiliani ¹.

¹Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología, Escuela de Física. Panamá

Correo: luisemiliani02@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4876-1592>.

Recepción

Aprobación

24-08-2022

17-11-2022

Resumen

Se evaluó la dependencia dosimétrica de las heterogeneidades del hueso y pulmón con la dosis en agua utilizando dos energías de haces de fotones (300 kVp y 225 kVp) y dos tamaños de campo para el irradiador preclínico X-RAD 320 mediante simulaciones Monte Carlo utilizando el código DOSXYZnrc a partir de una fuente puntual de radiación isotrópica que emite espectros de energía generados con el programa SpekCalc. Esto se llevó a cabo en dos fantasmas de agua al cual se le introdujeron heterogeneidades de hueso y pulmón respectivamente y para un fantoma de ratón computacional generado a partir de simulaciones con el programa MOBY. Se encontró un aumento significativo de la dosis en hueso cuando se utilizaron haces de fotones de 300 y 225 kVp, este efecto es mayor a medida que la energía disminuye. Este efecto dosimétrico, debido a la presencia de la heterogeneidad de hueso fue más significativo en comparación con la heterogeneidad de pulmón. Por lo tanto, para las energías de fotones kV del rango utilizado en la irradiación de animales pequeños, el aumento de la dosis en hueso debido al efecto fotoeléctrico podría ser una preocupación dosimétrica.

Palabras Clave: Física Médica, irradiación de animales pequeños, método de Monte Carlo, dosimetría de kilovoltaje.

Abstract

The dosimetric dependence of the bone and lung heterogeneities with the dose in water was evaluated using two photon beam energies (300 kVp and 225 kVp) and two field sizes for the X-RAD 320 preclinical irradiator by Monte Carlo simulations using the code DOSXYZnrc from a point source of isotropic radiation that emits energy spectra generated with the SpekCalc program. This was carried out in two water phantoms to which bone and lung heterogeneities were introduced respectively and for a computational mouse phantom generated from simulations with the MOBY program. A significant increase in the dose in bone was found when photon beams of 300 and 225 kVp were used, this effect is greater as the energy decreases. This dosimetric effect, due to the presence of bone heterogeneity, was more significant compared to lung heterogeneity. Therefore, for kV photon energies in the range used in irradiating small animals, increasing the dose to bone due to the photoelectric effect could be a dosimetric concern.

Keywords: Medical Physics, small animal irradiation, Monte Carlo method, kilovoltage dosimetry.

Introducción

Los estudios de radioterapia (RT) preclínica con animales pequeños son un paso indispensable en el camino desde los experimentos in vitro hasta la implementación clínica. A medida que las técnicas de RT avanzan en la clínica, es importante que los estudios preclínicos tengan acceso a niveles tecnológicos similares de forma que sus resultados sean trasladables a la clínica. El uso de tumores ortotópicos, el desarrollo de fantasmas computacionales de ratones con información de los diferentes tejidos y la reciente introducción de plataformas de investigación para la irradiación de animales pequeños guiadas por imágenes, han permitido que se administren tratamientos de precisión similares a los clínicos en el laboratorio.

Sin embargo, estos avances tecnológicos se ven obstaculizados por la falta de los correspondientes estándares en dosimetría y los informes deficientes de metodologías. Sin procesos sólidos y bien documentados de garantía de calidad de la RT preclínica, no es posible garantizar la precisión y repetibilidad de las mediciones de dosis entre laboratorios. Como consecuencia, los modelos preclínicos basados en técnicas de radioterapias actuales corren el riesgo de volverse irrelevantes (Biglin et al., 2019).

Para irradiar a un animal pequeño según el plan de tratamiento, se utilizan haces de fotones de kilovoltaje (kV) para reemplazar los haces de megavoltaje (MV) (4-18 MV) para igualar el tamaño del animal pequeño (es decir, el ratón) en comparación con el humano. Aunque los haces de fotones kV tienen las ventajas dosimétricas de atenuación del haz, dosis de profundidad y penumbra que coinciden con la escala de un ratón, el uso de haces de fotones kV produce una dosis extra de hueso. Esta mejora no deseada de la dosis ósea en la irradiación de animales pequeños no está presente en la radioterapia clínica que utiliza los haces de fotones MV y puede dar lugar a incertidumbres en el modelo preclínico (Chow et al., 2010).

El objetivo principal de este estudio trabajo es evaluar la dependencia dosimétrica de las heterogeneidades del hueso y pulmón con la dosis en agua utilizando dos energías de haces de fotones (300 kVp y 225 kVp) y dos tamaños de

campo mediante simulaciones Monte Carlo en dos fantasmas de agua al cual se le introdujeron heterogeneidades de hueso y pulmón respectivamente y para un fantoma de ratón computacional generado a partir de simulaciones con el programa MOBY.

Materiales y métodos

1. Simulaciones Monte Carlo (MC)

La versión 3 del código DOSXYZnrc fue utilizada para las simulaciones Monte Carlo (Walters et al., 2005). Se utilizó una fuente puntual de radiación isotrópica y se utilizaron los mismos parámetros de simulación MC que se muestran en Emiliani (2021).

El tamaño de campo se define a una distancia fuente-isocentro (SAD, por su siglas en inglés) de 50 cm, por lo tanto, como se utilizó una SSD = 50 cm para todas las simulaciones, el tamaño de campo queda definido en superficie. Las calidades de haz utilizadas para este estudio se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Espectros de energía simulados para diferentes calidades de haz.

kVp	Filtración	Energía promedio (keV)	HVL ₁	HC
300	1,5 mm Al + 0,25 mm Cu + 0,75 mm Sn	152	3,56 mm Cu	0,841
225	2,0 mm Al	71,9	0,373 mm Cu	0,334

2. Simulaciones MC en medios heterogéneos

2.1. Evaluación de la dosis en fantasmas de agua con heterogeneidades de hueso y pulmón

Las dosis para condiciones heterogéneas fueron calculadas sobre fantasmas virtuales voxelizados de agua de dimensiones 21 x 21 x 21 cm³ con un tamaño de vóxel de 0,2 x 0,2 x 0,2 cm³ en los cuales se introdujeron heterogeneidades de hueso y pulmón de 21 x 21 x 0,2 y 21 x 21 x 1,0 cm³ (ancho x largo x espesor)

respectivamente a una profundidad de 0,8 cm. Para el hueso se utilizó una densidad de $1,2 \text{ g/cm}^3$ y para el pulmón una densidad de $0,26 \text{ g/cm}^3$. El grosor de la rodaja de las heterogeneidades fue escogido de acuerdo con los tamaños que dichos tejidos u órganos tienen en un ratón.

Las dosis en profundidad se extrajeron del eje central de radiación que corresponde a la posición $(x,y) = (0,0)$. Los fantasmas con heterogeneidades de hueso y pulmón se simularon calidades de haz 300 y 225 kVp para tamaños de campo de $0,5 \times 0,5$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Se utilizan estos tamaños de campo debido a que serán los tamaños de campo de irradiación en un fantoma de ratón y por ello se quiere estimar cuales serían las diferencias en la dosis antes, en, después y lejos de una heterogeneidad en comparación con las simulaciones realizadas en condiciones homogéneas, las cuales fueron tomadas de Emiliani (2021).

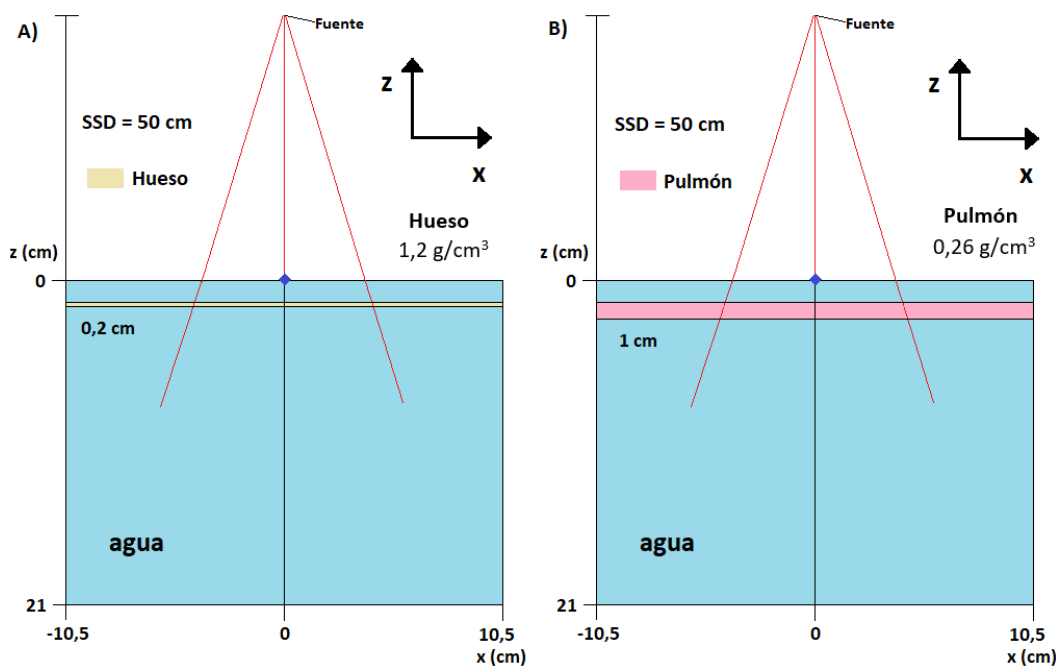


Figura 1. Geometría de los fantasmas de agua con la heterogeneidad de A) hueso; B) pulmón.

2.2. Evaluación de la dosis en un fantoma de ratón (MOBY)

Las dosis en el fantoma de ratón fueron calculadas sobre fantasmas virtuales voxelizados de ratón. Los fantasmas de ratón utilizados para este estudio fueron generados a partir de un programa llamado MOBY versión 2.0 distribuido por Duke

Licensing & Ventures, el cual permite la creación de fantasmas voxelizados para un ratón. El programa incluye modelos parametrizados en modalidad de tomografía computarizada (CT) para el latido del corazón y los movimientos respiratorios, así como numerosos parámetros para crear variaciones anatómicas y de movimiento normales y anormales. MOBY fue desarrollado principalmente para la investigación preclínica en animales pequeños (imágenes médicas y radioterapia). En nuestro caso el fantoma generado corresponde a una imagen 3D del ratón acostado.

Los fantasmas voxelizados que genera MOBY se guardan como imágenes binarias sin encabezado, dichas imágenes es una matriz 3D de coeficientes de atenuación lineal en unidades de 1/píxel, que posteriormente se convirtieron en unidades de 1/cm. El programa cuenta con la opción de definir el grosor de los cortes, así como también la resolución espacial de la imagen (tamaño de píxel), entre otros parámetros. En la figura 2 se muestra la visualización del fantoma generado por MOBY para este trabajo (Emiliani, 2021).

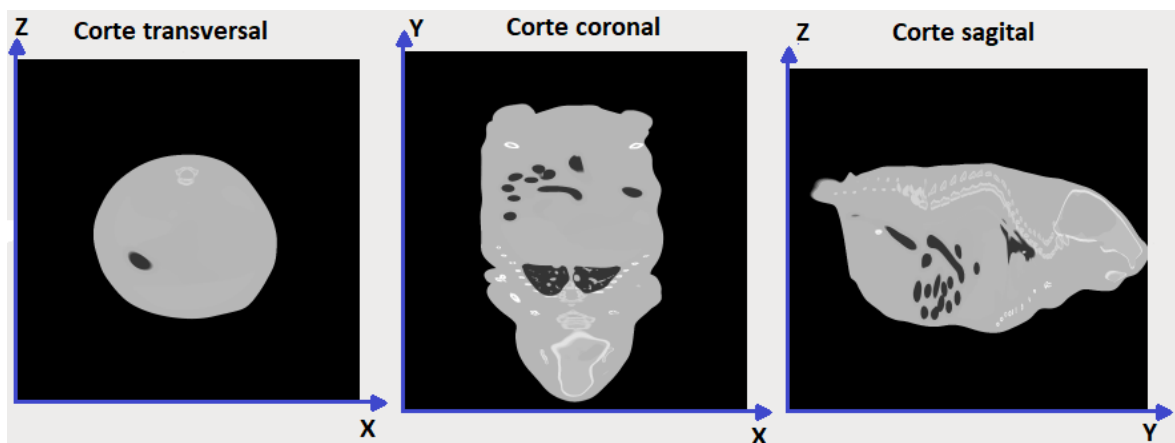


Figura 2. Visualización del fantoma de ratón generado por MOBY.

El fantoma de ratón tiene un tamaño de vóxel de $0,02 \times 0,04 \times 0,02 \text{ cm}^3$, con un total de $(268 \times 268 \times 132)$ vóxeles.

Se generaron dos fantomas con MOBY con diferentes coordenadas, como se muestran en la figura 3. El fantoma MOBY1 corresponde a la figura 3A donde el eje central del haz se encuentra en el centro geométrico del ratón, mientras que el fantoma MOBY2 corresponde a la figura 3B en donde el eje central del haz se colocó para irradiar el pulmón izquierdo. Se tuvo que utilizar dos fantomas de ratón con diferentes coordenadas para realizar las simulaciones debido a que la fuente 3 toma como eje central del haz la posición $(x,y) = (0,0)$, debido a que en el fantoma MOBY2 se quiso irradiar el pulmón izquierdo.

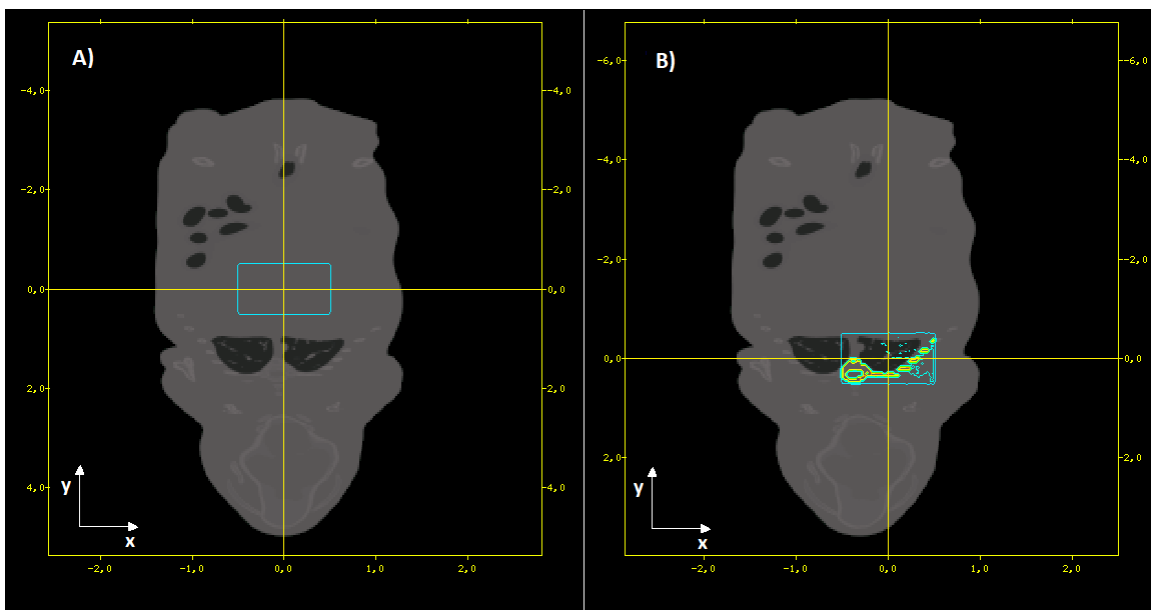


Figura 3. Fantoma de ratón A) MOBY1; B) MOBY2, a una profundidad de 1 cm y para un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

Adicionalmente se generó un ratón con densidad interior homogénea equivalente a agua (con densidad de 1 g/cm^3) como se muestra en la figura 4.

Para los fantomas de ratón heterogéneos MOBY1 y MOBY2 y los fantomas de ratón homogéneos MOBY1 y MOBY2 se simuló calidades de haz 300 y 225 kVp para tamaños de campo de $0,5 \times 0,5$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$. El objetivo de irradiar con estas

condiciones se debe a que se quiere comparar si los resultados obtenidos en fantasmas de agua con heterogeneidades de hueso y pulmón son compatibles con los resultados evaluados con un fantoma de ratón y se busca estimar cuales serían las diferencias en la dosis antes, en, después y lejos de una heterogeneidad en comparación con las simulaciones realizadas en condiciones homogéneas y en el fantoma de ratón homogéneo.

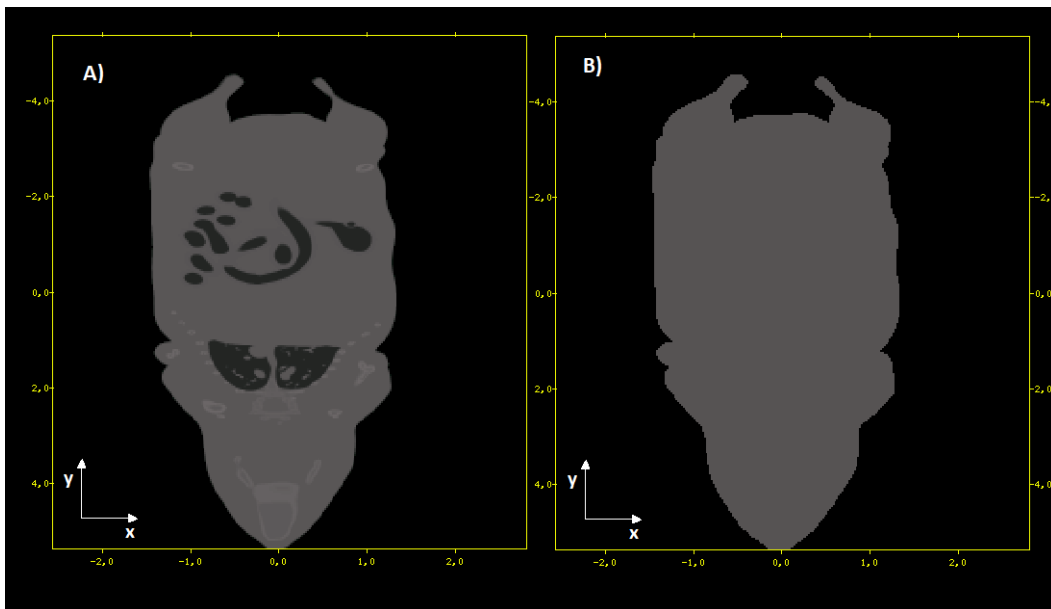


Figura 4. Fantasmas de ratón voxelizados (vista coronal) A) original (fantoma de ratón heterogéneo); B) sobrescrito con agua (fantoma de ratón homogéneo).

Las curvas de dosis en profundidad para el fantoma de ratón MOBY1 fueron extraídas en la posición $(x,y) = (0,01;0,02)$, mientras que en fantoma de ratón MOBY2 las curvas de dosis en profundidad se extrajeron en la posición $(x,y) = (-0,01;-0,06)$. El SSD utilizado para el fantoma MOBY1 fue de 50 cm, mientras que el utilizado para el fantoma MOBY2 fue de 50,12 cm, debido a que los primeros 6 puntos en la curva de dosis en profundidad fueron dosis en aire. Los resultados que se obtendrán con respecto a la curva de dosis en profundidad no deben ser tan distintos si se hubiese utilizado una SSD de 50 cm. En la figura 5 se muestra el posicionamiento del ratón en el eje del haz.

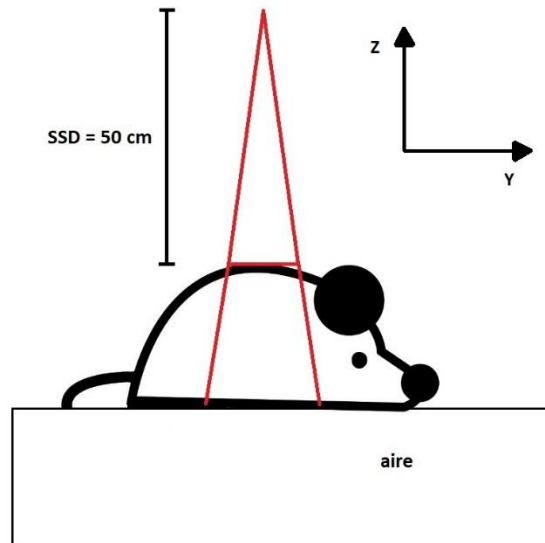


Figura 5. Diagrama del fantoma de ratón en el eje del haz.

Resultados

1. Condiciones Heterogéneas

1.1 Fantoma de agua con heterogeneidad de hueso

En la figura 6 se muestran los gráficos comparativos para la dosis relativa en profundidad para un fantoma de agua con una heterogeneidad de hueso (con un tamaño de $21 \times 21 \times 0,2 \text{ cm}^3$) situado a una profundidad de 0,8 cm, para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

Las diferencias porcentuales entre la dosis en el fantoma de agua con la heterogeneidad de hueso y la dosis en agua se muestran en la tabla. 2 para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y tamaños de campo de $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$, dichas diferencias se muestran en diferentes posiciones relativas a la heterogeneidad.

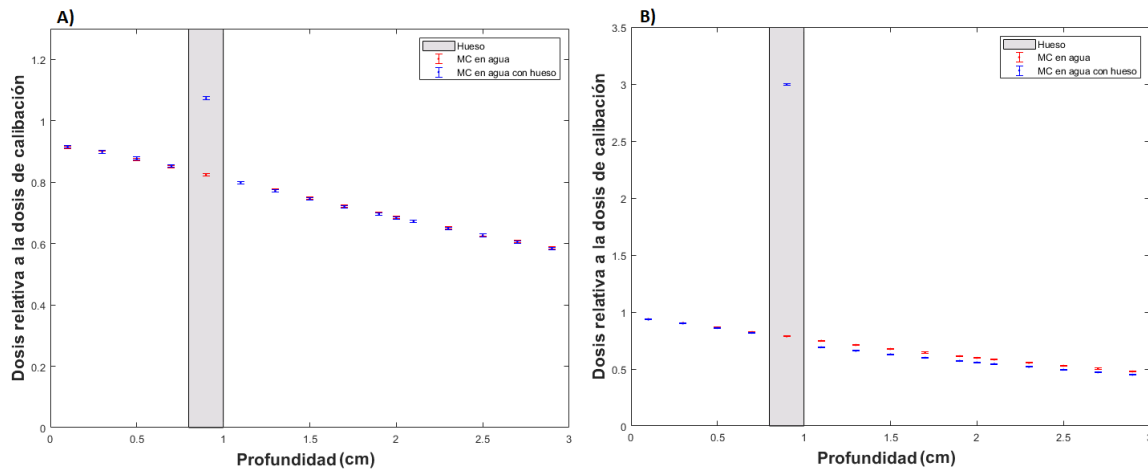


Figura 6. Dosis relativa en profundidad para una calidad de haz de A) 300 kVp; B) 225 kVp, con un tamaño de campo de 1 x 1 cm², en agua (puntos rojos) y en el fantoma de agua con una heterogeneidad de hueso (puntos azules) simulados en este trabajo.

Tabla 2. Diferencias relativas porcentuales entre la dosis en el fantoma de agua con la heterogeneidad de hueso y la dosis en agua para calidades de haz de 300 y 225 kVp y tamaños de campo de 0,5 x 0,5 cm² y 1 x 1 cm².

Posición z (cm)	300 kVp	225 kVp			
		0,5 x 0,5 cm ²	1 x 1 cm ²	0,5 x 0,5 cm ²	1 x 1 cm ²
antes	0,7	0,1 %	0,4 %	-0,2 %	-0,7 %
hueso	0,9	27,8 %	30,2 %	280,0 %	281,0 %
después	1,1	-0,4 %	0,0 %	-7,3 %	-7,6 %
lejos	1,9	-0,6 %	-0,2 %	-6,5 %	-6,8 %

De la figura 6 no se aprecian variaciones significativas antes de la heterogeneidad de hueso. Para una calidad de haz de 300 kVp la dosis en el hueso aumenta hasta 27,8 % y 30,2 % en comparación con la dosis en agua para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² respectivamente, mientras que para una calidad de haz de 225 kVp la dosis en el hueso aumenta hasta 280 % y 281 % en comparación de la dosis en agua para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² respectivamente.

La disminución de la dosis después de 1 cm de la heterogeneidad de hueso no es tan notoria para la calidad de haz de 300 kVp, con disminuciones de dosis de

0,6 % y 0,2 % para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² respectivamente, mientras que para una calidad de haz 225 kVp tiene disminuciones de dosis de 6,5 % y 6,8 % para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² respectivamente.

1.2. Fantoma de agua con heterogeneidad de pulmón

En la figura 7 se muestran los gráficos comparativos para la dosis relativa en profundidad para un fantoma de agua con una heterogeneidad de pulmón (con un tamaño de 21 x 21 x 1 cm³) situado a una profundidad de 0,8 cm, para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y un tamaño de campo de 1 x 1 cm².

Las diferencias porcentuales entre la dosis en el fantoma de agua con la heterogeneidad de pulmón y la dosis en agua se muestran en la tabla 3 para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y tamaños de campo de 0,5 x 0,5 cm² y 1 x 1 cm², dichas diferencias se muestran en diferentes posiciones relativas a la heterogeneidad.

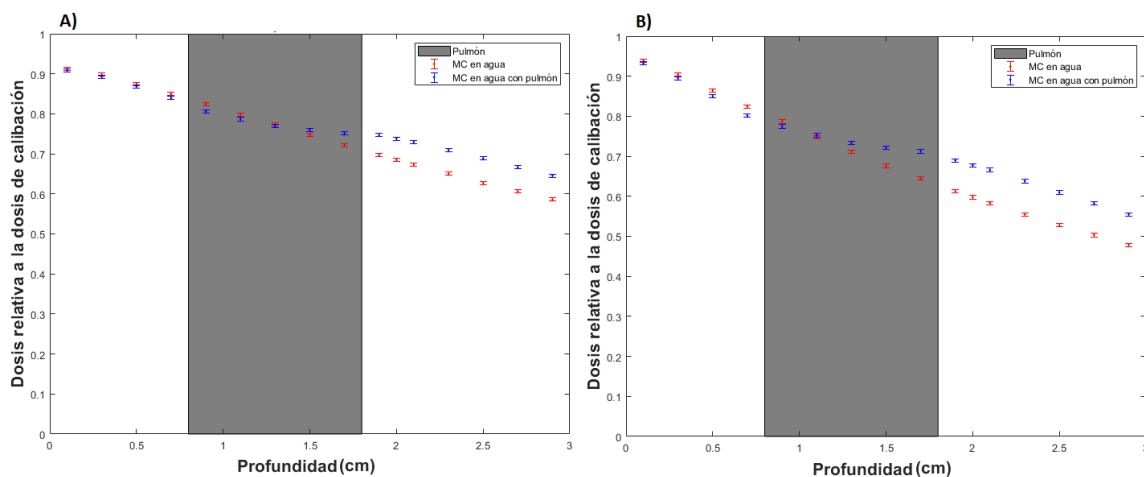


Figura 7. Dosis relativa en profundidad para una calidad de haz de A) 300 kVp; B) 225 kVp, con un tamaño de campo de 1 x 1 cm², en agua (puntos rojos) y en el fantoma de agua con una heterogeneidad de pulmón (puntos azules) simulados en este trabajo.

Tabla 3. Diferencias relativas porcentuales entre la dosis en el fantoma de agua con la heterogeneidad de pulmón y la dosis en agua para calidades de haz de 300 y 225 kVp y tamaños de campo de 0,5 x 0,5 cm² y 1 x 1 cm².

Posición	z (cm)	300 kVp		225 kVp	
		0,5 x 0,5 cm ²	1 x 1 cm ²	0,5 x 0,5 cm ²	1 x 1 cm ²

antes	0,7	-0,6 %	-1,2 %	-1,4 %	-2,8 %
Pulmón	0,9	-1,4 %	-2,2 %	0,6 %	-1,6 %
	1,1	-0,2 %	-1,5 %	3,1 %	0,7 %
	1,3	1,7 %	-0,5 %	6,0 %	3,1 %
	1,5	3,8 %	1,7 %	9,8 %	6,6 %
	1,7	6,2 %	4,1 %	14,2 %	10,5 %
después	1,9	9,2 %	7,1 %	15,5 %	12,5 %
lejos	2,7	11,0 %	9,9 %	17,0 %	15,7 %

En la figura 7 se muestra una disminución en la dosis en el fantoma con una heterogeneidad de pulmón en comparación con la dosis en agua, luego se muestra un incremento en la dosis en el pulmón. Después de 1 cm de la heterogeneidad de pulmón a una profundidad de 2,7 cm para la calidad de haz de 300 kVp presenta aumentos en la dosis de 11,0 % y 9,9 % para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² respectivamente, mientras que para la calidad de haz de 225 kVp muestra aumentos en la dosis de 17,0 % y 15,7 % para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² respectivamente.

1.3 Fantoma de ratón MOBY1

En las figuras 8 y 9 se muestran los gráficos comparativos para la dosis relativa en profundidad para el fantoma de ratón heterogéneo, el fantoma de ratón homogéneo y el fantoma homogéneo de agua, para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y un tamaño de campo de 1 x 1 cm².

Las diferencias porcentuales relativas entre dosis en el fantoma de ratón heterogéneo (FR) en comparación con la dosis en el fantoma homogéneo de agua (FA) y con la dosis en el fantoma de ratón homogéneo (FRH) se muestran en la tablas 4 y 5 para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y para tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm² en diferentes posiciones relativas a las heterogeneidades.

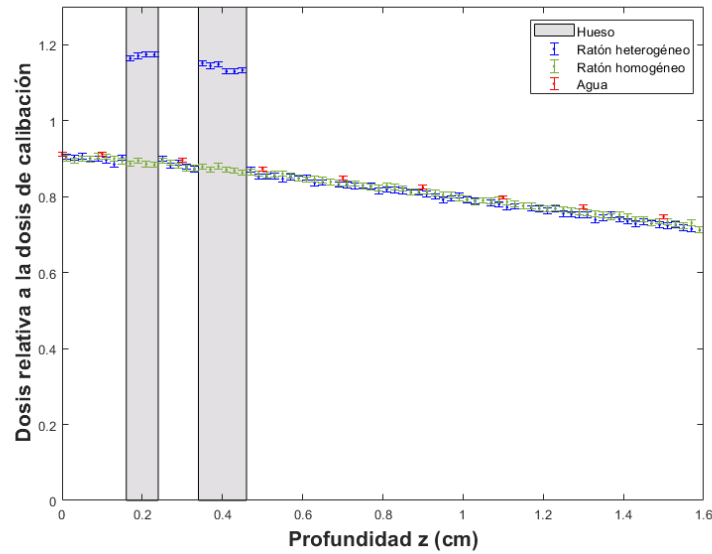


Figura 8. Dosis relativa en profundidad para una calidad de haz de 300 kVp y un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, en el fantoma de ratón heterogéneo (puntos azules), en el fantoma de ratón homogéneo (puntos verdes) y en agua (puntos rojos) simulados en este trabajo.

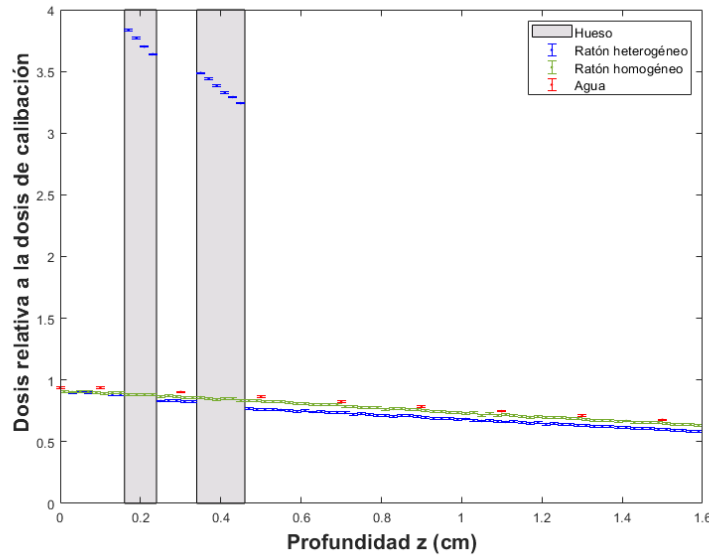


Figura 9. Dosis relativa en profundidad para una calidad de haz de 225 kVp y un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, en el fantoma de ratón heterogéneo (puntos azules), en el fantoma de ratón homogéneo (puntos verdes) y en agua (puntos rojos) simulados en este trabajo.

Tabla 4. Diferencias porcentuales relativas entre la dosis en el fantoma de ratón (FR) en comparación con la dosis en el fantoma homogéneo de agua (FA) y con la dosis en el fantoma de ratón homogéneo (FRH) para una calidad de haz de 300 kVp y tamaños de campo de $0,5 \times 0,5$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

Posición	z (cm)	300 kVp			
		$0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$		$1 \times 1 \text{ cm}^2$	
		FR y FA	FR y FRH	FR y FA	FR y FRH
antes	0,15	-0,9 %	-0,3 %	-0,6 %	1,0 %
hueso	0,17	27,4 %	28,3 %	28,4 %	31,2 %
	0,21	29,1 %	30,5 %	30,0 %	32,6 %
	después	0,25	-0,3 %	0,6 %	-0,1 %
hueso	0,35	27,3 %	29,6 %	29,3 %	31,1 %
	0,39	28,5 %	30,1 %	29,6 %	30,5 %
	0,43	27,9 %	28,8 %	28,1 %	30,1 %
después	0,47	0,1 %	1,5 %	-0,7 %	0,8 %
lejos	1,45	-2,3 %	-1,6 %	-2,6 %	-0,9 %

Tabla 5. Diferencias porcentuales relativas entre la dosis en el fantoma de ratón (FR) en comparación con la dosis en el fantoma homogéneo de agua (FA) y con la

dosis en el fantoma de ratón homogéneo (FRH) para una calidad de haz de 225 kVp y tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm².

Posición	z (cm)	225 kVp			
		0,5 x 0,5 cm ²		1 x 1 cm ²	
		FR y FA	FR y FRH	FR y FA	FR y FRH
antes	0,15	-4,3 %	-0,5 %	-5,0 %	-1,4 %
hueso	0,17	314,1 %	333,8 %	314,4 %	335,3 %
	0,21	299,9 %	316,4 %	302,8 %	320,0 %
después	0,25	-8,2 %	-4,1 %	-9,0 %	-4,2 %
hueso	0,35	288,4 %	308,2 %	290,1 %	305,3 %
	0,39	279,2 %	297,4 %	281,9 %	301,5 %
	0,43	271,0 %	288,0 %	274,8 %	287,9 %
después	0,47	-11,9 %	-7,9 %	-11,8 %	-7,6 %
lejos	1,45	-10,9 %	-7,1 %	-11,6 %	-7,3 %

En las figuras 8 y 9 se muestra un aumento en la dosis en hueso en el fantoma del ratón heterogéneo, con respecto a la dosis en un fantoma de ratón homogéneo y un fantoma de agua homogéneo. Para las dos calidades de haz simuladas existe una disminución de la dosis después del hueso con respecto a la dosis en el fantoma de ratón homogéneo y la dosis en agua.

En las figuras 10 y 11 se muestran las isodosis en la vista transversal y sagital para el fantoma de ratón heterogéneo (MOBY1) utilizando el visualizador DOSXYZnrc, para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y un tamaño de campo de 1 x 1 cm². Los datos están normalizada a la dosis máxima en el fantoma de ratón.

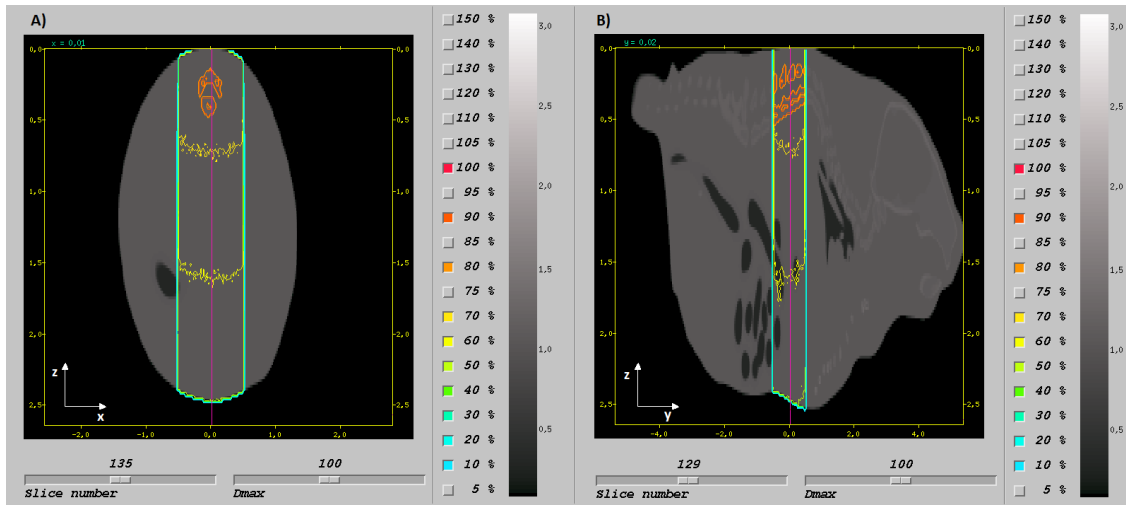


Figura 10. Isodosis en el fantoma de ratón MOBY1 en A) vista transversal; B) vista sagital, utilizando dosxyz_show, para una calidad de haz de 300 kVp y un tamaño de campo de 1 x 1 cm².

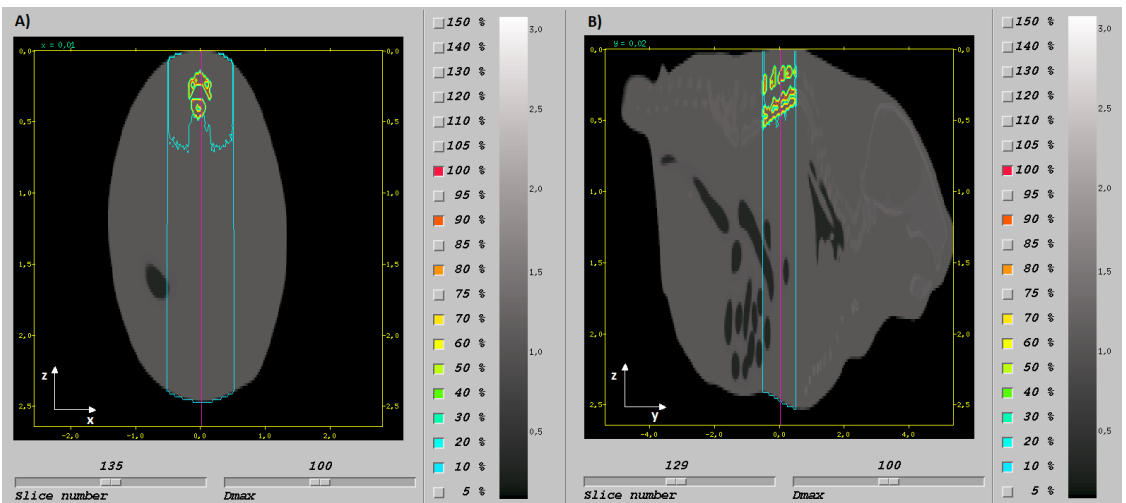


Figura 11. Isodosis en el fantoma de ratón MOBY1 en A) vista transversal; B) vista sagital, utilizando dosxyz_show, para una calidad de haz de 225 kVp y un tamaño de campo de 1 x 1 cm².

1.4 Fantoma de ratón MOBY2

En las figuras 12 y 13 se muestran los gráficos comparativos para la dosis relativa en profundidad para el fantoma de ratón heterogéneo, el fantoma de ratón

homogéneo y el fantoma homogéneo de agua, para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

Las diferencias porcentuales relativas entre dosis en el fantoma de ratón heterogéneo (FR) en comparación con la dosis en el fantoma homogéneo de agua (FA) y con la dosis en el fantoma de ratón homogéneo (FRH) se muestran en la tablas 6 y 7 para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y para tamaños de campo de $0,5 \times 0,5$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$ en diferentes posiciones relativas a las heterogeneidades.

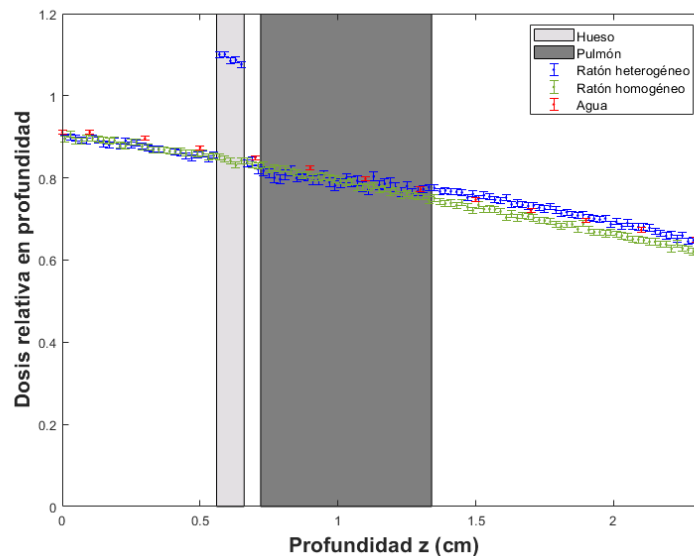


Figura 12. Dosis relativa en profundidad para una calidad de haz de 300 kVp y un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, en el fantoma de ratón heterogéneo (puntos azules), en el fantoma de ratón homogéneo (puntos verdes) y en agua (puntos rojos) simulados en este trabajo.

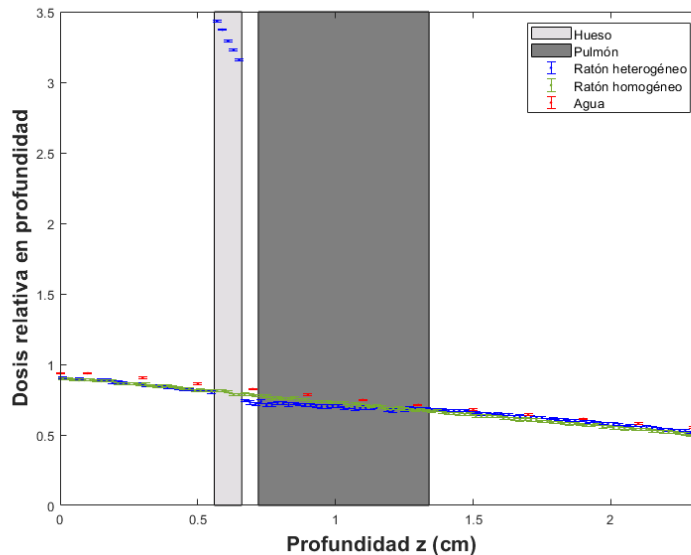


Figura 13. Dosis relativa en profundidad para una calidad de haz de 225 kVp y un tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$, en el fantoma de ratón heterogéneo (puntos azules), en el fantoma de ratón homogéneo (puntos verdes) y en agua (puntos rojos) simulados en este trabajo.

Tabla 6. Diferencias porcentuales relativas entre la dosis en el fantoma de ratón (FR) en comparación con la dosis en el fantoma homogéneo de agua (FA) y con la dosis en el fantoma de ratón homogéneo (FRH) para una calidad de haz de 300 kVp y tamaños de campo de $0,5 \times 0,5$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

Posición	z (cm)	300 kVp			
		$0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$		$1 \times 1 \text{ cm}^2$	
		FR y FA	FR y FRH	FR y FA	FR y FRH
antes	0,55	-1,6 %	-0,1 %	-1,4 %	0,2 %
hueso	0,57	25,6 %	27,8 %	27,2 %	29,1 %
	0,61	26,1 %	28,2 %	26,1 %	28,9 %
	0,65	26,0 %	27,8 %	25,9 %	27,8 %
después	0,67	-1,7 %	0,4 %	-2,1 %	-0,7 %
pulmón	0,73	-2,5 %	-1,1 %	-3,4 %	-1,9 %
	1,03	-1,9 %	-0,5 %	-1,0 %	1,2 %
	1,35	1,8 %	4,0 %	1,2 %	3,3 %
después	1,37	2,1 %	3,8 %	0,4 %	3,2 %
lejos	2,01	2,8 %	6,0 %	1,4 %	4,6 %

Tabla 7. Diferencias porcentuales relativas entre la dosis en el fantoma de ratón (FR) en comparación con la dosis en el fantoma homogéneo de agua (FA) y con la

dosis en el fantoma de ratón homogéneo (FRH) para una calidad de haz de 225 kVp y tamaños de campo de 0,5 x 0,5 y 1 x 1 cm².

Posición	z (cm)	225 kVp			
		0,5 x 0,5 cm ²		1 x 1 cm ²	
		FR y FA	FR y FRH	FR y FA	FR y FRH
antes	0,55	-5,1 %	-0,7 %	-6,1 %	-1,0 %
hueso	0,57	301,4 %	320,3 %	303,6 %	323,6 %
	0,61	289,0 %	309,8 %	290,5 %	309,7 %
	0,65	276,2 %	293,8 %	278,0 %	301,8 %
después	0,67	-10,2 %	-6,1 %	-10,6 %	-5,8 %
pulmón	0,73	-9,8 %	-5,2 %	-10,1 %	-5,7 %
	1,03	-7,1 %	-3,1 %	-9,2 %	-5,0 %
	1,35	-1,9 %	2,2 %	-3,7 %	2,1 %
después	1,37	-1,3 %	3,2 %	-2,9 %	1,5 %
lejos	2,01	-0,9 %	4,1 %	-3,3 %	4,9 %

En las figuras 12 y 13 se muestra que la dosis en el fantoma MOBY2 aumenta en el hueso, mientras que disminuye después del mismo en comparación con la dosis en agua, luego las diferencias entre la dosis en el pulmón en comparación con la dosis en agua disminuyen. Para una calidad de haz de 300 kVp la dosis en MOBY2 aumenta después del pulmón en comparación con la dosis en agua, mientras que para la calidad de haz de 225 kVp la dosis en MOBY2 disminuye después del pulmón en comparación con la dosis en agua.

Se aprecia que no existen diferencias significativas en la dosis en MOBY2 antes del hueso en comparación con MOBY2 homogéneo para una calidad de haz de 300 kVp, mientras que existe una disminución en la dosis en MOBY2 en comparación con MOBY2 homogéneo para la calidad de haz de 225 kVp. La dosis en hueso en MOBY2 aumenta en comparación con MOBY2 homogéneo, después del mismo la dosis disminuye. Luego en el pulmón la curva de dosis en profundidad en MOBY2 se coloca por encima de MOBY2 homogéneo y después del pulmón se obtuvieron aumentos en la dosis en MOBY2 en comparación con MOBY2 homogéneo.

En las figuras 14 y 15 se muestran las isodosis en la vista transversal y sagital para el fantoma de ratón heterogéneo (MOBY2) utilizando el visualizador

DOSXYZnrc, para calidades de haz de 300 y 225 kVp, y un tamaño de campo de 1 x 1 cm². Los datos están normalizada a la dosis máxima en el fantoma de ratón.

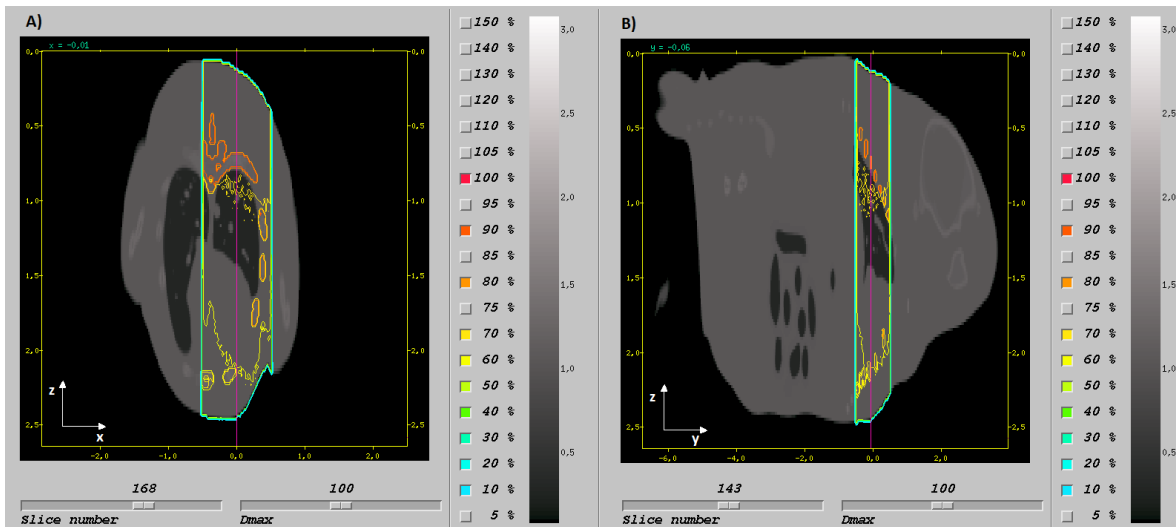


Figura 14. Isodosis en el fantoma de ratón MOBY2 en A) vista transversal; B) vista sagital, utilizando dosxyz_show, para una calidad de haz de 300 kVp y un tamaño de campo de 1 x 1 cm².

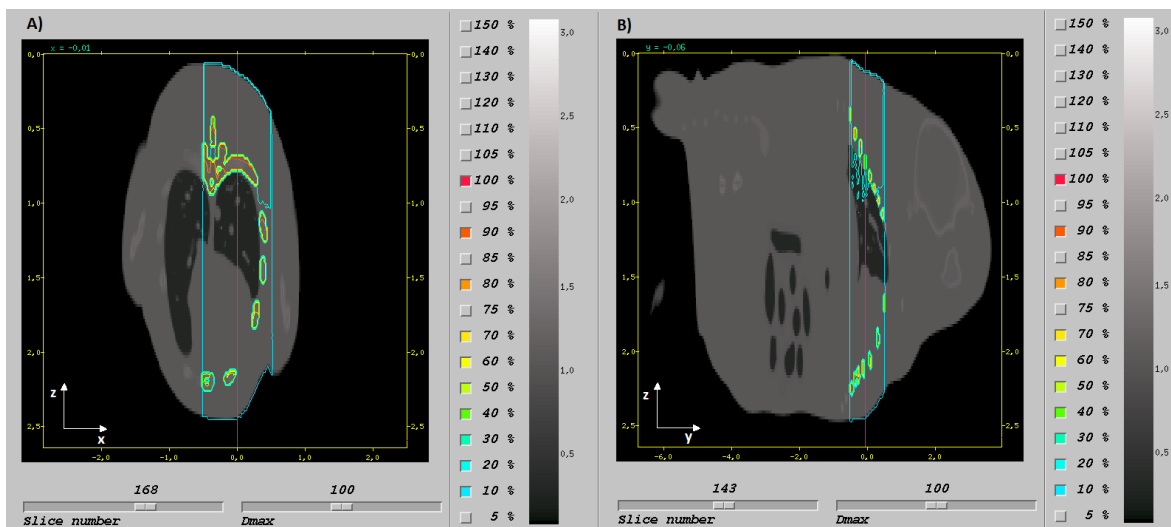


Figura 15. Isodosis en el fantoma de ratón MOBY2 en A) vista transversal; B) vista sagital, utilizando dosxyz_show, para una calidad de haz de 225 kVp y un tamaño de campo de 1 x 1 cm².

Discusión

1. Condiciones heterogéneas

1.1 Fantoma de agua con heterogeneidades de hueso

En las dos calidades de haz simuladas se observa que hay mayor deposición de dosis en el hueso que en agua. Para la calidad de haz de 300 kVp, no hay diferencia a la dosis después de la heterogeneidad. Para la otra calidad de haz (225 kVp, menos penetrante) la dosis después del hueso es ligeramente superior en agua.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el fantoma con la heterogeneidad de hueso puede apreciar un incremento de la dosis en hueso a medida que se incrementa el tamaño de campo, mientras que existe un aumento de la dosis en hueso a medida que la calidad de haz disminuye, una posible causa de esto se debe a que para calidades de haz más bajas el efecto fotoeléctrico se vuelve más relevante, aumentando la dosis en aquellos materiales con mayor Z_{eff} (número atómico efectivo) como el hueso, al tener más probabilidad de interacción, esto también explicaría la mayor disminución de la dosis después del hueso para la energía de 225 kVp en comparación con la energía de 300 kVp, debido a que para

la energía de 225 kVp habrá mayor probabilidad de interacción en el hueso, por lo tanto, habrán menos fotones que interactúen en el agua después del hueso lo que conllevaría a una mayor disminución de la dosis en comparación con la energía de 300 kVp para un tamaño de campo fijo.

1.2 Fantoma de agua con heterogeneidades de pulmón

La menor dosis antes del pulmón se debe a la menor contribución por fotones retrodispersados en el tejido con menor densidad. Este comportamiento se invierte dentro del pulmón y la curva de dosis en profundidad correspondiente a la simulación con la heterogeneidad de pulmón queda por encima de la curva de dosis en profundidad en agua debido a que el haz en el fantoma homogéneo de agua se ha atenuado más de forma relativa. Este efecto es mayor a medida que aumenta la calidad de haz y mayor a medida que disminuye el tamaño de campo.

1.3 Fantoma de ratón MOBY1

Los incrementos en la dosis corresponden a posiciones donde el haz interactúa con las estructuras de hueso (lo que concuerda con lo visto en el fantoma rectangular de agua con una lámina de material con densidad hueso). Es notable el aumento de dosis relativa en hueso para la calidad de 225 kVp en comparación con la energía de 300 kVp, esto se debe a que a medida que se baja la energía el efecto fotoeléctrico empieza a ser más relevante y la deposición de la dosis depende del Z_{eff} , por lo tanto, existe más probabilidad de interacción a menores energías, lo que explica el aumento de la dosis en la energía de 225 kVp en comparación con la de 300 kVp.

Lo antes descrito explicaría la mayor disminución en la dosis calculada en el fantoma de ratón MOBY1 después de la heterogeneidad de hueso en comparación con la dosis en agua, para una calidad de haz de 225 kVp en comparación con el haz de 300 kVp, también la disminución de la dosis después del hueso aumenta levemente con el tamaño de campo, aunque este efecto es mínimo en comparación con el efecto de la energía, esos comportamientos concuerdan con lo que se observó en el fantoma rectangular de agua con la heterogeneidad de hueso, para las calidades de haz y tamaños de campo simulados.

1.4 Fantoma de ratón MOBY2

Se encontraron incrementos en la dosis en hueso para el fantoma MOBY2 en comparación con la dosis en agua, el incremento es mayor para la calidad de haz de 225 kVp que para la calidad de haz de 300 kVp, lo que concuerda con lo encontrado en el ratón MOBY1 y el fantoma de agua con la heterogeneidad de hueso. Luego del hueso se observó una mayor disminución de la dosis en MOBY2 en comparación con la dosis en agua para una calidad de haz de 225 kVp en comparación con el haz de 300 kVp, dicho aumento se incrementa con el tamaño de campo.

Luego dentro de la heterogeneidad de pulmón la dosis en MOBY2 aumenta en comparación con la dosis en agua, para ambas calidades de haz. El aumento de la dosis después de una heterogeneidad de pulmón aumenta mientras que el haz sea más penetrante, mientras que ese aumento se incrementa con la disminución del tamaño de campo, por eso la dosis después de la heterogeneidad de pulmón fueron mayores a la dosis en agua para una calidad de haz de 300 kVp, y dicho aumento fue mayor para el tamaño de campo de $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$, mientras que el efecto del aumento de la dosis en MOBY2 para una calidad de haz de 225 kVp fue menor por lo antes descrito, por lo tanto, para este haz el efecto de la disminución en la dosis después del hueso fue mayor que el efecto en el aumento de la dosis después de la heterogeneidad de pulmón, y se presentaron diferencias mayores para el tamaño de campo de $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos para el fantoma de agua con la heterogeneidad de pulmón.

Conclusiones

Se evaluaron las diferencias entre la dosis en condiciones heterogéneas (en un fantoma de agua con heterogeneidades de hueso y pulmón), y la dosis en condiciones homogéneas (en agua). La dosis en hueso aumenta en comparación con la dosis en agua, este efecto es mayor a medida que la calidad de haz disminuye (mayor dosis en hueso en un haz de 225 kVp, que en uno de 300 kVp) y esto se debe para energías más bajas existe una mayor probabilidad de interacción debido

a que efecto fotoeléctrico se vuelve más relevante, y la dosis aumenta en aquellos materiales con mayor Z_{eff} (número atómico efectivo) como el hueso. Después de una heterogeneidad de hueso la dosis disminuye y esta disminución aumenta a medida que la calidad de haz disminuye, debido a que como el haz se atenúa más para una calidad de haz de 225 kVp que en una de 300 kVp.

Antes de una heterogeneidad de pulmón la dosis disminuye en comparación con la dosis en agua y esto se debe a que como el pulmón tiene menor densidad que el agua, se tendrá una menor contribución de la retrodispersión. Luego, en el pulmón ocurre lo contrario donde la dosis en profundidad en un fantoma de agua con una heterogeneidad de pulmón aumenta en comparación con la dosis en agua y esto se debe a que como el pulmón presenta una menor densidad que el agua el haz se atenúa menos de forma relativa que en agua, por ello se tienen aumentos en la dosis después de una heterogeneidad de pulmón, en donde este aumento en la dosis es mayor a medida que aumenta la calidad del haz y a medida que disminuye el tamaño de campo.

En las condiciones de irradiación real (en el fantoma MOBY1 y MOBY2) los resultados obtenidos concuerdan con las conclusiones obtenidas a partir de las comparaciones de las condiciones heterogéneas y homogéneas, lo que se podría añadir es que en MOBY2 se obtuvo una curva de dosis en profundidad para las cuales se tenía una heterogeneidad de hueso y pocos mm después una heterogeneidad de pulmón, para una calidad de haz de 300 kVp el efecto del aumento de la dosis después de la heterogeneidad de pulmón es mayor al efecto de la disminución de la dosis después de la heterogeneidad de hueso, por ello se obtuvo un aumento en la dosis después de la heterogeneidad de pulmón, este efecto fue mayor para el tamaño de campo de $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$. Mientras que para una calidad de haz de 225 kVp, el efecto de la disminución de la dosis después de la heterogeneidad de hueso es mayor que el efecto del aumento de la dosis después de la heterogeneidad de pulmón, por ello se obtuvo disminuciones en la dosis de 0,9 % y 3,3 % en la dosis en MOBY2 en comparación con la dosis en agua para tamaños de campo de $0,5 \times 0,5$ y $1 \times 1 \text{ cm}^2$ respectivamente.

Los efectos antes descritos van a depender del tamaño y tipo de la heterogeneidad, calidad de haz y tamaño de campo.

Agradecimiento

Se agradece el apoyo de Fondecyt Regular N°1181133 y Fondecip EQM108105.

Referencias

- Biglin, E. R., Price, G. J., Chadwick, A. L., Aitkenhead, A. H., Williams, K. J., & Kirkby, K. J. (2019). Preclinical dosimetry: Exploring the use of small animal phantoms. *Radiation Oncology*, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s13014-019-1343-8>
- Chow, J. C. L., Leung, M. K. K., Lindsay, P. E., & Jaffray, D. A. (2010). Dosimetric variation due to the photon beam energy in the small-animal irradiation: A monte carlo study. *Medical Physics*, 37(10), 5322–5329. <https://doi.org/10.1118/1.3488979>
- Emiliani, L. E. (2021). *Caracterización dosimétrica del irradiador preclínico X-RAD 320 e implementación en una herramienta de cálculo de dosis* [Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/62478>
- Walters, B., Kawrakow, I., & Rogers, D. W. O. (2005). DOSXYZnrc Users Manual. *Source*, 1–132.