

# Evaluación de la Fluencia de Fotones y Dosis Absorbida en una Simulación de Tumor Cerebral Utilizando el Código MCNP5

Evaluation of the Photon Fluence and Absorbed Dose in a Brain Tumor Simulation Using the Code MCNP5

Alberto Gonzáles & José Vega

---

**GONZÁLES, A. & VEGA, J.** Evaluación de la fluencia de fotones y dosis absorbida en una simulación de tumor cerebral utilizando el código MCNP5. *J. health med. sci.*, 4(2):71-76, 2018.

**RESUMEN:** El objetivo fue estudiar, a través del método Monte Carlo código MCNP5, la fluencia de fotones y la dosis absorbida en una simulación de tumor cerebral en modelos de cabezas esférica y elipsoide. La simulación del tratamiento del tumor se realizó en un cuarto de irradiación de 150 cm de radio. En el origen del cuarto se situó una fuente monoenergética de fotones de 6, 8, 10 y 15 MeV. Posteriormente, a 5, 10, 15 y 20,5 cm de distancia de la fuente se colocaron detectores esféricos de 0,5 cm de radio y a 20,5 cm y 21,95 cm se ubicaron los modelos de cabeza esférico y elipsoide, respectivamente, con sus correspondientes materiales equivalentes. Para las distintas unidades de energía, se registró la fluencia total de los fotones y la dosis absorbida en los tejidos de la cabeza. Los cálculos se llevaron a cabo utilizando el código MCNP5. Los resultados mostraron que la fluencia en el tumor es distinta debido a la diferencia de profundidad entre ambos modelos de cabeza. La dosis absorbida en los tejidos equivalentes fue mayor en el modelo esférico, debido a que la distancia entre la fuente y la superficie de la cabeza es menor. La dosis en el tumor, para ambos modelos de cabeza, fue la misma, debido a que está más cerca al equilibrio electrónico. Concluimos que el uso del código MCNP5 permitió evaluar diversas condiciones de irradiación y la distribución de las dosis en los dos modelos de cabeza, con sus correspondientes materiales equivalentes. Lo anterior, nos sugiere que la utilización de este método permite optimizar los diseños de tratamientos con radiaciones ionizantes, en términos de dar la máxima dosis posible al tejido tumoral, minimizando la dosis a los órganos que se encuentran en torno al mismo.

**PALABRAS CLAVE:** fluencia, dosis absorbida, cabeza, Monte Carlo, fotón.

---

## INTRODUCCIÓN

El cáncer es una patología de gran relevancia a nivel epidemiológico, debido a que cada año en el mundo se detectan 14,1 millones de casos nuevos (WHO, 2012). En Perú, la realidad también es preocupante, alcanzando más de 45 000 nuevos casos de cáncer anualmente, según datos de 2012, con una proyección que muestra una tendencia al incremento. Adicionalmente, se sabe que en Perú el mayor porcentaje de los diagnósticos de cáncer se realiza cuando la enfermedad se encuentra en etapa avanzada, alcanzando el 75 % de los casos diagnosticados, de modo que la detección temprana del cáncer es fundamental, ya que repercute en una menor mortalidad y costo de tratamientos, así como en una mayor probabilidad de curación y mejor calidad de vida (INEN, 2012; Salazar *et al.*, 2013).

Tanto la cirugía, como la quimioterapia y la radioterapia, solos o combinados, se utilizan en el tratamiento de tumores. La radioterapia con fotones de mega voltaje se utiliza cuando la lesión está profundamente asentada y/o no puede ser tratada por cirugía (Villá *et al.*, 2014), como es el caso de los tumores en el cerebro. Cuando éste es irradiado, tanto los tejidos sanos como los tumorales absorben cierta cantidad de energía, con el objetivo de controlar la enfermedad (Pérez-López & Garnica-Garza, 2011).

Para conocer las interacciones de la radiación con el cuerpo del paciente se debe estudiar el efecto de la concentración de la radiación en tejidos sanos y tumorales, se ha utilizado el método de Monte Carlo, en base a diferentes códigos, los cuales proporcionan

una distribución detallada de la dosis administrada (Chin & Spyrou, 2009). También, se ha señalado que a pesar del tiempo de cálculo requerido, el sistema de planificación del tratamiento basado en Monte Carlo es más exacto que los métodos analíticos para realizar la estimación de la dosis absorbida (Isambert *et al.*, 2010).

El MCNP es un código que permite modelar y simular el transporte de fotones, electrones y neutrones. Este código ha sido desarrollado y utilizado en el Laboratorio Nacional Los Álamos de los Estados Unidos y probado exitosamente en diversas aplicaciones. El transporte se puede hacer para partículas de un solo tipo, esto es fotones, electrones o neutrones o bien en forma acoplada fotón/electrón, neutrón/fotón, o neutrón/fotón/electrón. Para el caso de fotones y electrones el MCNP incluye fotones cuyas energías varían de  $10^{-3}$  hasta  $10^3$  MeV (X-5 Monte Carlo Team, 2008).

Para aumentar la precisión en los cálculos de Monte Carlo para la dosimetría de radiación, se han desarrollado maniqués. El primer modelo antropomórfico heterogéneo utilizado para la dosimetría fue el de Fisher-Snyder (Snyder *et al.*, 1969), ideado en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, ubicado en Oak Ridge, Tennessee, EE.UU.

El objetivo de este trabajo fue estudiar, a través del método Monte Carlo y código MCNP5, la fluencia de fotones y la dosis absorbida en una simulación de tumor cerebral en modelos de cabezas esférica y elipsoide.

## MATERIAL Y MÉTODO

La simulación del tratamiento de un paciente sometido a radioterapia se realizó en un cuarto de irradiación de 150 cm de radio que fue llenado de aire. En el origen del cuarto de irradiación se situó una fuente monoenergética de fotones de 6, 8, 10 y 15 MeV (Podgorsak, 2005). Posteriormente, a 5, 10, 15 y 20,5 cm de distancia se ubicaron detectores de 0,5 cm de radio. Luego, se colocaron modelos de cabezas esférica o elipsoide, con sus correspondientes materiales equivalentes (cuero cabelludo, cráneo, cerebro y tumor), a diferentes distancias de la fuente, ubicando detectores en el medio de cada material (Tabla I). Para la construcción de los modelos de cabezas se consideraron los componentes elementales señalados en la publicación n°46 de la Comisión Internacional de Unidades Radiológicas y Medidas (White *et al.*, 1992) (Tabla II). Las dimensiones de ambos modelos se presentan en la Tabla I y las geometrías en la Figura 1.

Para las diferentes unidades de energía (MeV), se registró la fluencia total de los fotones y la dosis absorbida en los tejidos de la cabeza. Los cálculos se llevaron a cabo utilizando el método Monte Carlo código MCNP5. Para poder comparar los resultados, se utilizó en ambos modelos de cabeza una técnica isocéntrica que considera al tumor en el centro del cerebro. En los cálculos se utilizó un haz de tratamiento unidireccional colimado al área de la sección transversal del tumor. Con el fin de alcanzar una incertidumbre del 5 %, se utilizaron  $1,5 \times 10^7$  historias primarias.

Tabla I. Dimensiones del modelo esférico y elipsoide y distancias de sus materiales equivalentes a la fuente.

Tejidos	Modelo Esférico		Radio menor (cm)	Modelo Elipsoide	
	Radio (cm)	Distancia de la fuente al tejido (cm)		Radio mayor (cm)	Distancia de la fuente al tejido (cm)
Cuero cabelludo	8,5	20,5	7,05	9,98	21,95
Cráneo	8,0	21,0	6,75	9,98	22,50
Cerebro	7,0	22,0	5,75	8,58	23,50
Tumor	1,0	28,0	1,0	1,0	28,00

Tabla II. Composición elemental de los modelos de cabeza.

Tejido	Composición elemental (porcentaje por masa)					d [g/cm <sup>3</sup> ]
	H	C	N	O	Otros	
Cuero cabelludo	10	20,4	4,2	64,5	0,2 Na; 0,1 P; 0,2 S; 0,3 Cl; 0,1 K	1,09
Cráneo	5	21,2	4,0	43,5	0,1 Na; 8,1 P; 0,3 S; 17,6 Ca; 0,2 Mg	1,61
Cerebro	10,7	14,5	2,2	71,2	0,2 Na; 0,4 P; 0,2 S; 0,3 Cl; 0,3 K	1,03
Tumor	10,7	14,5	2,2	71,2	0,2 Na; 0,4 P; 0,2 S; 0,3 Cl; 0,3 K	1,04
aire	--	0,012	75,5	23,18	1,28 He	0,0013

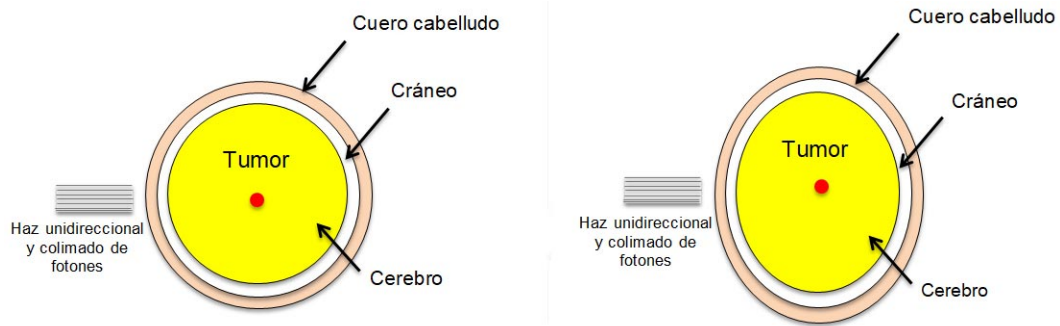


Fig. 1. Esquema del modelo de cabeza esférico y elipsoide con sus correspondientes materiales equivalentes (cuero cabelludo, cráneo, cerebro y tumor).

## RESULTADOS

Los resultados muestran que la fluencia relativa de fotones en función de la distancia de la fuente, para todas las unidades de energía, tienen procesos similares tanto en el modelo de cabeza esférico (Fig. 2 A) como en el modelo elipsoide (Fig. 2 B).

Con el fin de comparar los resultados de los dos modelos de cabeza, se cotejaron las fluencias relativas para las diferentes energías (Figs. 3 A-D). En el modelo elipsoide, para 6 MeV, se pudo observar un aumento de la fluencia en el tumor de 1,3 %.

En la Figura 4 A se muestra las gráficas de la dosis absorbida durante la irradiación del modelo de cabeza esférica con las diferentes unidades de energías. Así mismo, en la Figura 4 B se muestra la dosis absorbida para el modelo elipsoidal, pudiendo observarse el mismo comportamiento que en el modelo esférico.

Las comparaciones entre los modelos de cabeza esférica y elipsoide con las distintas unidades de energía se muestran en las Figuras 5 A-D.

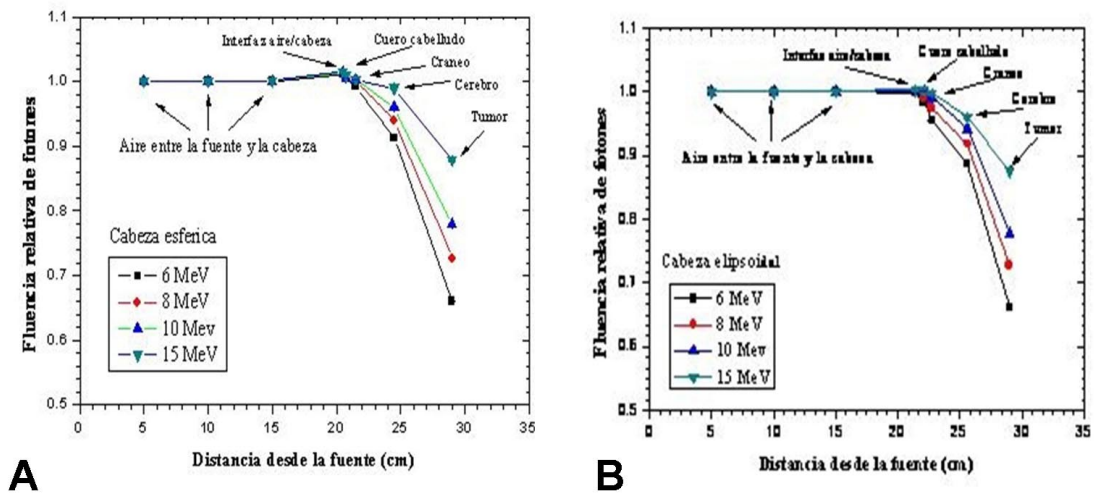


Fig. 2. Fluencia de fotones en aire y dentro de la cabeza, en el modelo de cabeza esférico (A) y elipsoide (B).

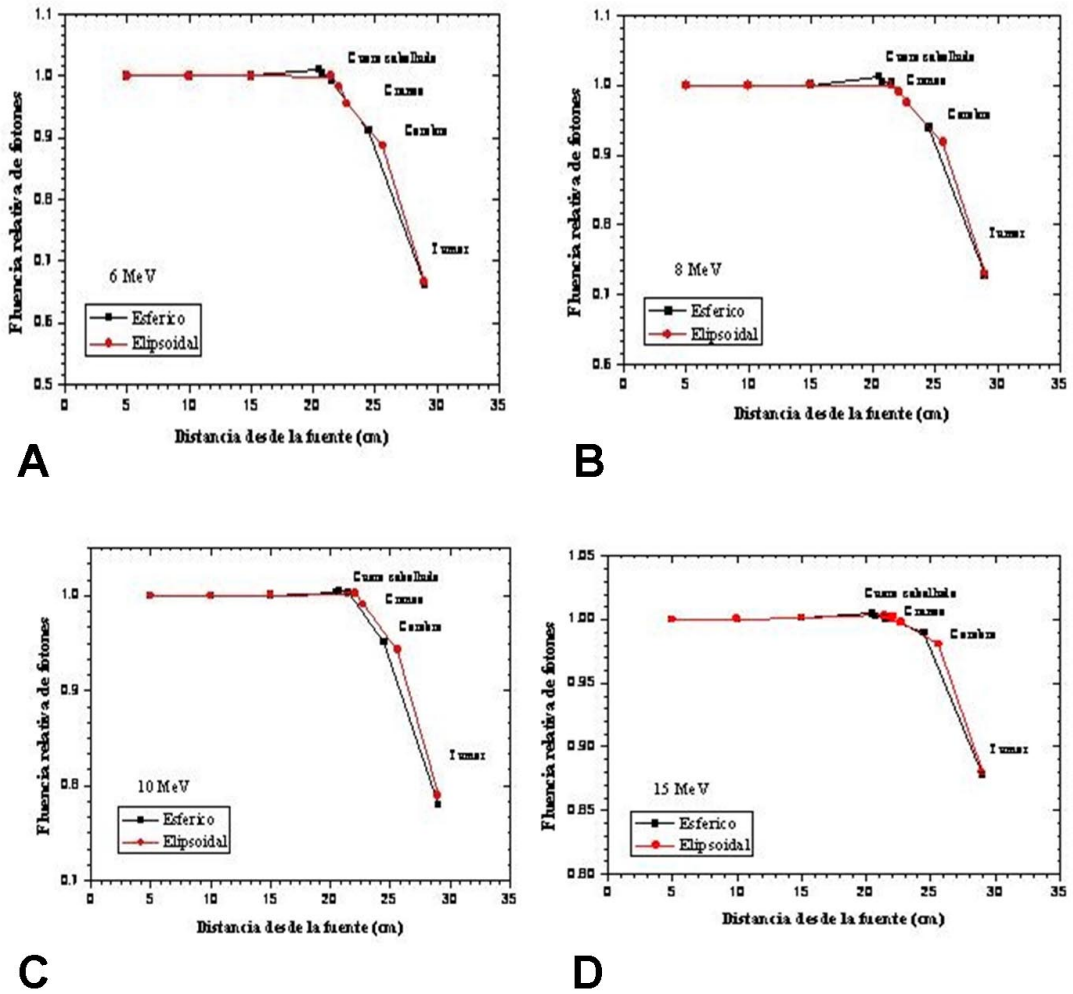


Fig. 3. Fluencia relativa de fotones en ambos modelos de cabeza a 6 MeV (A), 8 MeV (B), 10 MeV (C) y 15 MeV (D).

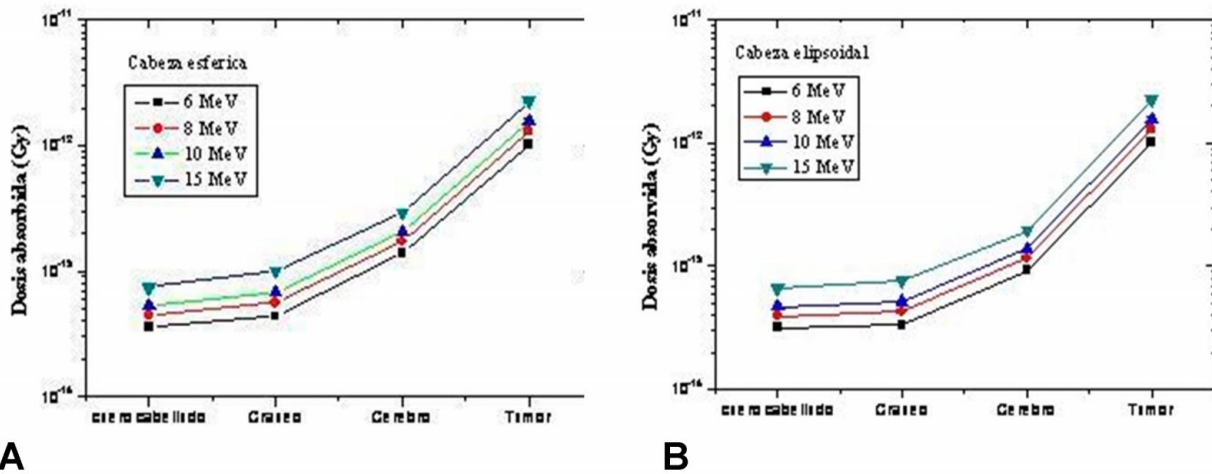


Fig. 4. Dosis absorbida por el modelo esférico de cabeza (A) y el modelo elipsoide (B).

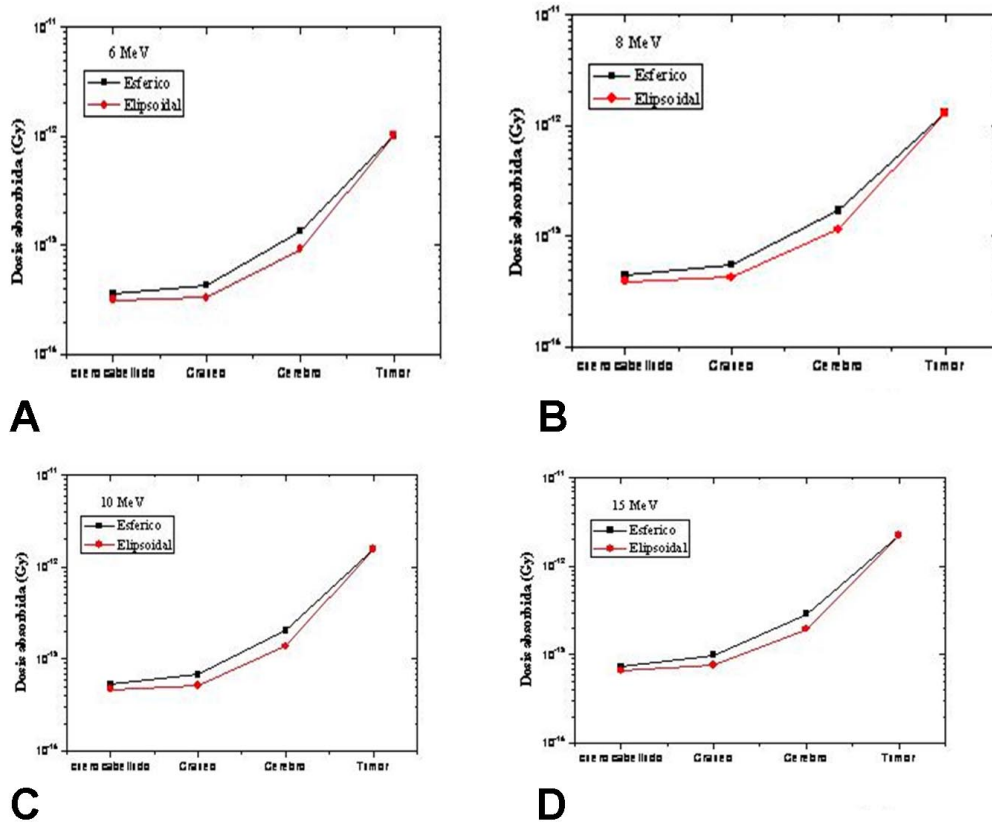


Fig. 5. Dosis absorbida en ambos modelos de cabeza a 6 MeV (A), 8 MeV (B), 10 MeV (C) y 15 MeV (D).

## DISCUSIÓN

Los resultados del estudio mostraron que la fluencia relativa de fotones no cambia en el aire, debido a que los haces monoenergéticos son de alta energía y no interactúan con el aire por el bajo número atómico de este. También se observó que hay un aumento de fluencia relativa entre la interface del aire y cuero cabelludo a 20,5 cm de distancia de la fuente. Esto se podría deber a la atenuación de la radiación primaria que ingresa a la cabeza produciendo electrones que a la vez generan una radiación secundaria aumentando la fluencia.

Cuando los fotones ingresan a la cabeza hay una disminución de la fluencia con relación a las diferentes energías, mientras más baja sea la energía, la fluencia decrece, debido a que los fotones son más atenuados.

Respecto al aumento de la fluencia (1,3 %) en el tumor para el modelo de cabeza elipsoidal a 6 MeV, creemos que se debe a la profundidad cuero cabelludo-tumor, la que fue de 7,05 cm para este modelo y 8,5 cm para el modelo esférico. Esta diferencia de grosor hace

que los fotones que llegan al tumor resulten menos atenuados en el modelo elipsoidal. El mismo comportamiento se visualizó al comparar la fluencia relativa entre los modelos esféricos y elipsoidal a 8 MeV. Además, se observó mayor fluencia en el cerebro para el modelo esférico, posiblemente debido a una menor atenuación, ya que se encuentra a una profundidad de 1,5 cm menos que en el modelo elipsoidal.

En cuanto a la comparación de todos los haces de tratamiento, la fluencia relativa tuvo el mismo comportamiento en los dos modelos de cabeza. Para el haz que deposita la mayor dosis en el tumor (15 MeV) se observó que aproximadamente el 88 % de los fotones fue capaz de alcanzar el tumor.

En relación con la dosis absorbida en el modelo de cabeza esférica, cuando los fotones de alta energía interactúan con los tejidos, ceden parte de su energía a los electrones del medio, poniéndolos en movimiento y causando dosis en los tejidos equivalentes de la cabeza. Debido a las altas energías de los fotones, la dosis aumenta con la profundidad, ya que aún no existe equilibrio electrónico en estas condiciones. La deposición

de dosis en los tejidos equivalentes de la cabeza está en la región de buildup (Podgorsak), para todas las energías y modelos de cabeza.

Por otra parte, pudimos observar en todas las unidades de energía (6-15 MeV) la deposición de dosis en el tumor se aproximó para los dos modelos de cabeza, dado que la profundidad del tumor está más cerca al equilibrio electrónico. Las altas energía de los fotones, recorren una mayor profundidad depositando, por tanto, mayor dosis en tejidos más profundos, en este caso el tumor.

Finalmente, podemos concluir que el uso del código MCNP5 permitió evaluar diversas condiciones de irradiación y la distribución de las dosis en los dos modelos de cabeza, con sus correspondientes materiales equivalentes. Lo anterior, nos sugiere que la utilización del método Monte Carlo y el código MCNP permite optimizar los diseños de tratamientos con radiaciones ionizantes, en términos de dar la máxima dosis posible al tejido tumoral, minimizando la dosis a los órganos que se encuentra en torno al mismo.

---

**GONZALES, A. & VEGA, J.** Evaluation of the photon fluence and absorbed dose in a brain tumor simulation using the code MCNP5. *J. health med. sci.*, 4(2):71-76, 2018.

**ABSTRACT:** The objective was to study, through the Monte Carlo method MCNP5 code, the fluence of photons and the absorbed dose in a brain tumor simulation in spherical and ellipsoid head models. Treatment simulation of the tumor was performed in an irradiation room of 150 cm radius. A monoenergetic source of photons of 6, 8, 10 and 15 MeV was placed at the center of the room. Subsequently, at 5, 10, 15 and 20.5 cm distance from the source, spherical detectors of 0.5 cm radius were placed, and at 20.5 cm and 21.95 cm the spherical and ellipsoid head models were placed respectively, with corresponding equivalent materials. For the different energy units, total fluence of the photons and dose absorbed in head tissues were recorded. Estimates were carried out using MCNP5 code. The results showed that fluence in the tumor is different, due to the differences in depth between the two head models. The dose absorbed in the same tissues was higher in the spherical model, because the distance between the source and head surface is smaller. Dose in the tumor for both head models was the same, because it is closer to the electronic balance. We conclude that the use of the MCNP5 code allowed the evaluation of different irradiation conditions and distribution of the doses in both head models, with the use of equivalent materials. The above suggests that the use of this method optimizes the treatment designs with ionizing radiation, in terms of applying the maximum possible dose in tumor tissue, thus minimizing the dose to the surrounding organs.

**KEYWORDS:** fluence, absorbed dose, head; Monte Carlo, photon.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chamberlain, M.; Kormanik, P. Practical guidelines for the treatment of malignant gliomas. *West. J. Med.*, 168(2):114-120, 1998.
- Chin, M. & Spyrou, N. A detailed Monte Carlo accounting of radiation transport in the brain during BNCT. *Appl. Radiat. Isot.*, 67:S164-7, 2009.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), World Health Organization (WHO). GLOBOCAN 2012: Estimated cancer incidence, mortality and prevalence worldwide in 2012. World Health Organization, 2012. Available in: <http://globocan.iarc.fr/Default.aspx>.
- Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN). Resumen de indicadores de salud 2012. Lima, Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas, 2012. Available in: [http://www.inen.sld.pe/portal/documentos/pdf/estadistica/datos\\_estadisticos/06032013\\_RESUMEN\\_INDICADORES\\_INTRANET.pdf](http://www.inen.sld.pe/portal/documentos/pdf/estadistica/datos_estadisticos/06032013_RESUMEN_INDICADORES_INTRANET.pdf).
- Isambert, A.; Brualla, L.; Benkebil, M & Lefkopoulos, D. Determination of the optimal statistical uncertainty to perform electron-beam Monte Carlo absorbed dose estimation in the target volume. *Cancer Radiother.*, 14(2):89-5, 2010.
- Pérez-López, C. E.; Garnica-Garza, H. M. Monte Carlo modeling and optimization of contrast-enhanced radiotherapy of brain tumors. *Phys. Med. Biol.*, 56(13):4059-72, 2011.
- Podgorsak E.B. *Radiation Oncology Physics. A Handbook for Teachers and Students*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2005.
- Salazar, M. R.; Regalado-Rafael, R.; Navarro, J. M.; Montanez, D. M.; Abugattas, J. E.; Vidaurre, T. El instituto nacional de enfermedades neoplásicas en el control del cáncer en el Perú. *Rev. Perú Med. Exp. Salud Pública*, 30(1):105-12, 2013
- Snyder, W.S.; Ford, M.; Waner, G & Fisher, H. Estimates of Absorbed Fractions for Monoenergetic photon sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. *J. Nucl. Med., Suppl.* 3:7-52, 1969.
- Villà, S.; Balañà, C. & Comas, S. Radiation and concomitant chemotherapy for patients with glioblastoma multiforme. *Chin. J. Cancer.*, 33(1):25-31, 2014.
- White, D. R.; Griffith, R. V & Wilson, I. J. Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues, Report 46. *J. Int. Comm. Radiat. Units Meas.*, 24(1), 1992.
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP - A general Monte Carlo N-Particle transport code, Version 5, Volume I: Overview and Theory. Tech. Rep. LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, US. 2003 Revised 2/1/2008. Available in: [https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-03-1987.pdf](https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf).

Dirección para correspondencia:

Bach. Alberto Gonzáles  
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa,  
Arequipa  
PERÚ

E-mail: betoagc@hotmail.com

Recibido : 29-01-2018

Aceptado: 02-03-2018