



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE TECNOLOGÍA MÉDICA



TESIS PROFESIONAL

**Para optar al título profesional de Tecnólogo Médico con mención en Imagenología,
Radioterapia y Física Médica**

“Cuantificación de la carga de trabajo adicional que puede alcanzar un acelerador considerando un cálculo de blindaje que incluye la realización de Arcoterapia Volumétrica de Intensidad Modulada (VMAT) en el Instituto Nacional del Cáncer”

Naomi Scarlet Alvayay Ortiz

Daniela Zenilda Cumian Cumian

DIRECTOR DE TESIS: Camilo de la Barra, MSc.

ASESORA METODOLÓGICA: Natalia Santis, MSc.

Duración: Un semestre académico (5 meses).

Fecha tentativa de inicio y término: Primer semestre 2023

24 de julio, 2023

CONTENIDO

1. RESUMEN.....	3
2. ABSTRACT	4
3. INTRODUCCIÓN	5
4. MARCO TEÓRICO	8
4.1. Cálculo de blindaje NCRP No 151.....	8
4.1.1. Cálculo de barreras.....	9
4.2. Marco regulatorio nacional.....	14
4.2.1. Decreto Supremo N° 133 de 1984, Ministerio de Salud.	14
4.2.2. Norma de Seguridad NS-04.0: Requerimientos para la Autorización de Operación de Instalaciones de Teleterapia con Aceleradores de Partículas.....	15
4.2.3. Norma de Seguridad NS-02.0: Criterios Básicos de Protección Radiológica.	18
4.3. Arcoterapia Volumétrica de Intensidad Modulada (VMAT).....	19
5. HIPÓTESIS	21
6. OBJETIVO GENERAL	21
7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
8. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
8.1. Materiales.....	21
8.2. Metodología.....	25
8.2.1. Cuantificación de la carga de trabajo	26
8.2.2. Evaluación de blindaje	27
8.2.3. Cálculo de Blindaje	34
8.2.4. Cálculo de puerta y laberinto del bunker	36
8.2.5. Cuantificación de la carga de trabajo (<i>W</i>) adicional	38
9. RESULTADOS.....	38

9.1.1.	Cuantificación de la carga de trabajo (W).....	38
9.1.2.	Evaluación de blindaje	41
9.1.3.	Cálculo de blindaje.....	53
9.1.4.	Cuantificación de la carga de trabajo (W) adicional	61
10.	DISCUSIÓN	64
10.1.	Cuantificación de la carga de trabajo (W).....	64
10.2.	Evaluación del blindaje	65
10.2.1.	Evaluación de barrera primaria.....	65
10.2.2.	Evaluación de barrera secundaria	66
10.3.	Cálculo de blindaje.....	68
10.4.	Carga de trabajo (W) adicional	69
10.5.	Limitaciones	70
11.	CONCLUSIÓN	71
12.	BIBLIOGRAFÍA	74
13.	ANEXOS	77

1. RESUMEN

El objetivo de este estudio fue cuantificar la carga de trabajo adicional que se puede alcanzar en el acelerador Infinity del Instituto Nacional del Cáncer (INC) considerando un cálculo de blindaje adaptado de la metodología del NCRP 151 que incluyera características propias de tratamientos VMAT (*Volumetric Modulated Arc Therapy*). Para ello, se trabajó con los datos clínicos correspondientes a tratamientos VMAT y 3D del período 2022 a 2023. Los cálculos se realizaron siguiendo la metodología del NCRP 151, considerando las características de VMAT a partir de la determinación de tres variables: factor de uso (U), distancia promedio de la fuente al punto de interés (d_L) y fracción de dispersión (a). La carga de trabajo principal en el acelerador resultó en un valor de 660,97 Gy/semana, mientras que el factor VMAT y la carga de trabajo de fuga resultaron en 3,11 y 1640,52 Gy/semana, respectivamente. En la evaluación de blindaje se encontraron diferencias significativas en el factor de uso y en la fracción de dispersión para VMAT respecto de los valores del NCRP 151, no así en la distancia promedio de la fuente al punto, que no significó grandes diferencias. Aun así, se determinó que todos los puntos de barreras primarias y secundarias del bunker estaban dentro de la tolerancia de dosis y espesor de blindaje, lo que confirmó la posibilidad de aumentar la carga de trabajo en el acelerador. La cuantificación de la carga de trabajo adicional se determinó considerando el punto con menor diferencia entre lo calculado y el objetivo de diseño de blindaje (P), obteniéndose un valor de 64,5%, aun cumpliendo con estándares de seguridad respecto del blindaje de la instalación. Esto toma relevancia pues, en términos prácticos, confirma la posibilidad de poder incrementar la cantidad de pacientes tratados en una semana en una proporción equivalente a la calculada.

Palabras clave: Blindaje; Reporte No. 151 NCRP; VMAT; Carga de trabajo; Protección radiológica.

2. ABSTRACT

The objective of this study was to quantify the additional workload that can be achieved in the Infinity accelerator of the National Cancer Institute (INC) by considering a shielding calculation adapted from the NCRP 151 methodology that included VMAT characteristics (Volumetric Modulated Arc Therapy) treatments. To this end, we worked with clinical data corresponding to VMAT and 3D treatments for the period 2022 to 2023. The calculations were performed following the methodology of NCRP 151, considering the characteristics of VMAT based on the determination of three variables: use factor (U), average distance from the source to the point of interest (d_e) and scatter fraction (a). The main accelerator workload resulted in a value of 660.97 Gy/week, while the VMAT factor and the leakage workload resulted in 3.11 and 1640.52 Gy/week, respectively. In the shielding evaluation, significant differences were found in the use factor and in scatter fraction for VMAT with respect to the NCRP 151 values, not so in the average distance from the source to the point, which did not mean large differences. Even so, all primary and secondary barrier points in the bunker were found to be within the dose and shielding thickness tolerance, which confirmed the possibility of increasing the workload in the accelerator. The quantification of the additional workload was determined by considering the point with the smallest difference between the calculated and the shielding design objective (P), obtaining a value of 64.5%, even when complying with safety standards with respect to the shielding of the facility. This is relevant because, in practical terms, it confirms the possibility of being able to increase the number of patients treated in a week in a proportion equivalent to that calculated.

Keywords: Shielding; Report No. 151 NCRP; VMAT; Workload; Radiation protection.

3. INTRODUCCIÓN

La radioterapia (RT) es una de las opciones de tratamiento ampliamente utilizada en la actualidad para tratar el cáncer, empleando radiación ionizante de alta energía con el fin de generar daño en las células tumorales y así lograr control de la enfermedad. Debido a su alta eficacia en el manejo del cáncer, se ha convertido en una de las principales alternativas de tratamiento, logrando salvar y prolongar la vida de los pacientes (1,2). Sin embargo, el uso de radiaciones ionizantes conlleva inherentes riesgos para aquellos individuos susceptibles de exposición a dicha radiación sin fines terapéuticos, específicamente para los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE) y el público general (3). Por ende, si las instalaciones que trabajan con RT no cuentan con las condiciones adecuadas de protección contra la radiación en su diseño estructural, el uso de esta técnica puede ser potencialmente peligrosa para estos individuos. En vista de lo anterior, la protección radiológica es primordial en el diseño de las instalaciones que trabajan con RT, pues mediante ella, se garantiza la existencia de condiciones óptimas de operación en términos de seguridad radiológica.

En el ámbito de la protección radiológica, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) establece tres principios fundamentales: justificación, limitación de dosis y optimización (4). El principio de optimización busca mantener las dosis de radiación tan bajas como sea razonablemente alcanzable (ALARA, por sus siglas en inglés), mientras que la limitación de dosis implica que los límites de dosis establecidos por la ICRP tanto para el TOE como para el público, no deben ser superados. Ahora, en el contexto de las instalaciones de RT, el blindaje estructural tiene como objetivo limitar la exposición a la radiación a un nivel aceptable, tanto para el público como para los trabajadores (5). Para lograr este propósito, el diseño de blindaje contra la radiación debe ser planificado de forma rigurosa, considerando los principios de optimización y limitación de dosis, lo que implica la aplicación de restricciones de dosis en la planificación y cálculo de blindaje para la instalación (6).

Internacionalmente, el Consejo Nacional de Protección y Medidas Radiológicas (NCRP, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos presenta el Reporte No. 151 (2005) que funciona como una guía acerca del diseño, planificación y evaluación del blindaje para instalaciones que trabajan con RT. En Chile, el marco regulatorio nacional establece requerimientos respecto del blindaje para instalaciones de RT. Por ejemplo, el Decreto Supremo N° 133 del Ministerio de Salud (1984): "Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas,

personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines” (DS 133) plantea como requisito para la obtención de la autorización de construcción de instalaciones de RT contar con un plano y memoria de diseño de la instalación, que deberá incluir, entre otros requisitos, información detallada acerca del blindaje (7). Por otra parte, la Norma de Seguridad 4.0 (2018): “Requerimientos para la autorización de operación de instalaciones de teleterapia con aceleradores de partículas” de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) establece los requisitos de seguridad para diseño y operación segura de las instalaciones con aceleradores lineales de electrones (LINAC, por sus siglas en inglés), entre ellos, los límites de dosis de diseño para la instalación que se basan en el principio de optimización del ICRP (8). Así también, la Norma de Seguridad 2.0 (2018): Criterios Básicos de Protección Radiológica (NS 2.0) de CChEN establece los criterios básicos de protección radiológica para las instalaciones radiactivas en los procesos de licenciamiento y fiscalización. En términos de blindaje, la NS 2.0 plantea criterios para su cálculo, así como también recomienda guías internacionales de evaluación y diseño de blindaje, como las normas del NCRP (9), específicamente el Reporte No. 151.

El Reporte No. 151 del NCRP (en adelante NCRP 151) establece que los requerimientos de blindaje en las instalaciones de RT van a variar considerablemente debido a diversos factores, entre ellos, el rango de energías a utilizar, el tipo de equipo, las aplicaciones clínicas y nuevas tecnologías en el área (10). Aunque este reporte fue publicado en el 2005, en los últimos años ha existido un notable avance en nuevas técnicas de tratamiento, como la Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT, por sus siglas en inglés) y más recientemente la Arcoterapia Volumétrica de Intensidad Modulada (VMAT, por sus siglas en inglés). Esta última permite realizar tratamientos en uno o más arcos, variando de forma simultánea el ángulo de gantry, la apertura del colimador multilámina (MLC) y la tasa de dosis (11).

El cálculo de blindaje propuesto por el NCRP 151 se basa mayormente en tratamientos con irradiación de ángulo de gantry fijo, por lo que, en principio, no sería aplicable para tratamientos VMAT. Sin embargo, la metodología del NCRP implica la utilización de suposiciones conservadoras que sobreestiman el blindaje, lo que podría sobreponerse a los vacíos existentes en el protocolo para esta nueva tecnología (10).

Si bien la cantidad de estudios sobre el impacto de tratamientos VMAT en el blindaje es limitada, Saleh et al. demuestra en su estudio que, tras la implementación de VMAT junto con

otras modalidades de tratamiento, la carga de trabajo promediada en una semana aumentó en términos de dosis (cGy) y unidades monitor (UM), sin embargo, cuando se trata de número de sesiones de tratamiento por paciente, la carga de trabajo se mantuvo relativamente constante (12). Así también, se ha demostrado que los tratamientos con VMAT disminuyen el tiempo de tratamiento respecto de IMRT (12). En resumen, la implementación de técnicas como VMAT supone un aumento de carga de trabajo en parámetros individuales, sin embargo, al disminuir el tiempo de tratamiento, la carga de trabajo se mantiene prácticamente invariable en una semana, lo que abre la posibilidad de tratar a un mayor número de pacientes por día, no obstante, es fundamental tener en cuenta que esto implicaría un aumento de dosis en las barreras de blindaje (12).

En Chile, el Instituto Nacional del Cáncer (INC) cuenta con varios aceleradores lineales de electrones (LINAC, por sus siglas en inglés) para la realización de tratamientos de RT convencionales con técnica 3D, así como también técnicas de intensidad modulada como IMRT con ángulo de gantry fijo y dinámico, y, más recientemente, tratamientos de tipo VMAT. Las memorias de cálculo con las que las autoridades reguladoras autorizaron la puesta en marcha y el uso clínico de los aceleradores en el INC, así como las evaluaciones de modificaciones que se han ido realizando, se basan completamente en el NCRP 151 y sus suposiciones para conseguir resultados conservadores que sobreestiman el blindaje. Sin embargo, en los últimos años, se han realizado modificaciones importantes en el INC, específicamente, la instalación de un nuevo acelerador que tiene la capacidad de realizar tratamientos de tipo VMAT, lo que tiene repercusiones en el blindaje de la instalación. Dado lo anterior, es de interés evaluar el blindaje con métodos realistas considerando las características propias de los tratamientos VMAT y siguiendo la metodología del NCRP 151, a través de una memoria de cálculo que incluya la determinación precisa de la carga de trabajo de este acelerador. A partir de ello, se espera establecer qué rango posee el blindaje para asumir un eventual aumento en el flujo de pacientes en este equipo, manteniendo los objetivos de blindaje del NCRP 151.

Comentado [NSAO(1)]: Fuente?

Comentado [NSAO(2R1)]: Saleh et al

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Cálculo de blindaje NCRP No 151

El Reporte No. 151 del NCRP, *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*, es una guía de recomendaciones, información técnica y metodología de cálculo para el diseño de blindaje estructural para instalaciones de RT (4). En cuanto al cálculo de blindaje incluye los siguientes conceptos:

a. Objetivo diseño blindaje (P)

Niveles de dosis equivalente utilizados para diseñar los cálculos y la evaluación de barreras de blindaje. Estos valores son evaluados en un punto de referencia tras la barrera y son distintos según el tipo de área.

b. Área controlada

Área de acceso limitado en donde la exposición ocupacional del TOE se encuentra bajo supervisión. En instalaciones de RT, las áreas controladas suelen estar contiguas a las zonas donde se utiliza radiación. El valor de P para áreas controladas, según el Reporte No. 151 del NCRP, es 0.1 mSv/semana (5 mSv/año).

c. Área no controlada

Todas las áreas de la instalación que no son clasificadas como zona controlada y todos los entornos circundantes. Son aquellas zonas donde transitan pacientes, visitantes, empleados no expuestos de forma rutinaria a radiación ionizante, entre otros. Los valores de P para estas áreas son 0.02 mSv/semana (1 mSv/año).

d. Carga de trabajo (W)

Tasa de dosis absorbida en el tiempo, medida a la profundidad de la dosis absorbida máxima a un metro de la fuente. Generalmente, es especificada como la dosis absorbida de los fotones entregados hacia el isocentro durante una semana. Varía según el uso potencial que se le dará al equipo.

e. Factor de uso (U)

Fracción de carga de trabajo en cada ángulo del gantry dirigida a un punto de interés. El valor de este factor varía según el tipo de tratamiento que se realice en la instalación. Para tratamientos que implican un haz girando respecto del isocentro, normalmente se presenta

Comentado [NSAO(3): revisar

una distribución simétrica en los ángulos de gantry, donde predominan los cuatro ángulos principales (0°, 90°, 180° y 270°), por ende, se asume un valor de 0.25. Este valor es aplicable para el cálculo de barreras primarias. Para el caso de barreras secundarias, se plantea un valor de 1 como medida conservadora.

f. Factor de ocupación (T)

Fracción de tiempo promedio máximo en el que una determinada zona está ocupada mientras ocurre una irradiación.

Tabla 1. Factores de ocupación sugeridos por el NCRP 151. Traducida para este documento del NCRP Reporte No. 151, por National Council of Radiation Protection and Measurement, 2005.

Ubicación	Factor de Ocupación
Áreas de ocupación total (áreas ocupadas a tiempo completo por un individuo), por ejemplo, oficinas administrativas o de planificación de tratamientos, salas de control de tratamiento, áreas de recepción, salas de espera atendidas, espacio ocupado en edificio cercano.	1
Salas adyacentes de tratamiento, sala de examen del paciente adyacente al bunker.	1/2
Pasillos, salones para trabajadores, baños de personal.	1/5
Puerta del bunker.	1/8
Baños públicos, bodega, salas de venta, sala de espera desatendidas, áreas de al aire libre con asientos, áreas de espera de paciente, áticos, armarios de personal de limpieza.	1/20
Áreas al aire libre con solo tránsito peatonal o vehicular transitorio, estacionamientos desatendidos, áreas de entrega de vehículos desatendidas, ascensores desatendidos.	1/40

4.1.1. Cálculo de barreras

Existen barreras primarias diseñadas para atenuar la radiación proveniente del haz primario y que incide directamente en ellas, y las barreras secundarias, diseñadas para atenuar la radiación de fuga y secundaria. El método de cálculo es distinto para cada una de ellas.

a. Barreras primarias

Para el cálculo de barreras primarias se determina, en primer lugar, el factor de transmisión (B_{pri}) a partir del objetivo de diseño de blindaje (P), la carga de trabajo, y los factores de uso (U) y de ocupación (T), además de la distancia desde el blanco hasta un punto de la zona protegida (d_{pri}).

$$B_{pri} = \frac{Pd_{pri}^2}{WUT} \quad 1.1$$

Luego, se calcula el número de capas decirreductoras o *Tenth Value Layer* (TVL) necesarios (n) con la ecuación 1.21.2, y, finalmente el espesor de la barrera ($t_{barrier}$) se determina a partir de valores determinados TVL en la ecuación 1.3.

$$n = -\log(B_{pri}) \quad 1.2$$

$$t_{barrier}(n) = \begin{cases} TVL_1 + (n - 1)TVL_e, & n < TVL_1 \\ nTVL_1, & n \geq TVL_1 \end{cases} \quad 1.3$$

La ecuación 1.3 es una función definida por partes que tomará distintas expresiones según el valor del número de TVL (n). Para términos de esta ecuación, TVL_1 corresponde al primer TVL y TVL_e corresponde al TVL de equilibrio, ambos factores dan cuenta de los cambios espectrales de la radiación a medida que penetra la barrera.

b. Barreras secundarias

Para el cálculo de barreras secundarias, se determina el factor de transmisión para la radiación dispersa y radiación de fuga. Para el componente de radiación dispersa, se considera la distancia desde el blanco al paciente o superficie dispersora (d_{sca}), distancia desde la superficie dispersora hasta el punto de detección (d_{sec}), fracción de dosis absorbida del haz primario que se dispersa desde el paciente a un ángulo particular (a), el tamaño de campo a medido a un metro desde la fuente, es decir, en el isocentro (F), y una constante de normalización de la fracción de dispersión en un campo de 20x20cm.

$$B_{ps} = \frac{P}{aWT} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F} \quad 1.4$$

El factor de transmisión para radiación de fuga se calcula con los factores ya descritos, una constante que representa la radiación de fuga (B_L) y la distancia desde el isocentro a la superficie (d_L):

$$B_L = \frac{P d_L^2}{10^{-3} WT} \quad 1.5$$

Donde 10^{-3} da cuenta de la proporción del haz primario que corresponde a radiación de fuga.

c. Factor IMRT (C_i)

Relación de las UM promedio de la unidad de dosis absorbida prescrita para IMRT (UM_{IMRT}) y la unidad de control por unidad de dosis absorbida para el tratamiento convencional (UM_{conv}).

$$C_i = \frac{UM_{IMRT}}{UM_{conv}} \quad 1.6$$

Para obtener UM_{IMRT} se debe tomar una muestra de casos y luego calcular las UM promedio requeridas para administrar una dosis absorbida unitaria prescrita por fracción (D_{pre}).

$$UM_{IMRT} = \sum_i \frac{UM_i}{(D_{pre})_i} \quad 1.7$$

d. Puertas y Laberintos

Existen salas de tratamiento que en su diseño contemplan un laberinto a la entrada como barrera secundaria adicional, esto debido a las propiedades de dispersión de la radiación y por el anhelo de que la puerta de acceso al bunker sea lo más liviana posible. Aun cuando se contempla este diseño para aceleradores de baja energía (menor a 10 MV), la dosis equivalente en la puerta de la sala de tratamiento debe ser calculada. Para ello se supone un caso en que el haz apunta de forma perpendicular a la pared G (figura 1), y luego se calcula la dosis equivalente total considerando las posiciones de los haces más utilizadas.

La radiación que alcanza la puerta del bunker está dada por fotones dispersos desde el paciente y las superficies de la sala de tratamiento, así como también por la penetración directa

de la radiación de fuga proveniente desde el cabezal a través de la pared del laberinto, por lo tanto, se calculan varios componentes para finalmente cuantificar la dosis equivalente total en la puerta del bunker a partir de la contribución de cada uno de ellos.

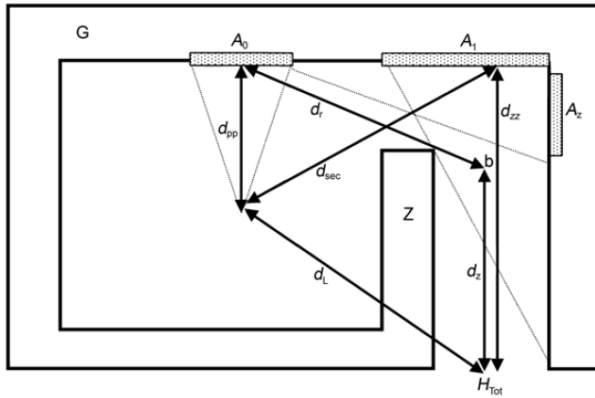


Figura 1. Plano genérico de una sala de tratamiento para definir los parámetros utilizados en el blindaje de puertas y laberintos. Extraída de NCRP Report No. 151, por National Council of Radiation Protection and Measurement, 2005.

Para calcular los componentes de radiación de fuga y radiación dispersa en la puerta del bunker se utilizan los factores presentados en la Figura 1, donde:

- d_{pp} = Distancia perpendicular desde el blanco hasta la primera superficie de reflexión (m).
- d_{sec} = Distancia desde el blanco hasta la línea central de la pared G (m).
- d_r = Distancia desde el centro del haz en la primera reflexión, pasado el borde de la pared interior del laberinto, hasta el punto B en la línea media del laberinto (m)
- d_L = Distancia desde el blanco a la puerta (m).
- d_{zz} = Distancia de línea central a través del laberinto (m).
- d_z = Distancia de la línea central a lo largo del laberinto desde el punto b hasta la puerta del laberinto (m).
- A_0 = Área del haz en la primera superficie dispersora (m^2).
- A_1 = Área de la pared G que se observa desde la puerta del laberinto (m^2).

- $A_z =$ Área de sección transversal de la entrada interior del laberinto proyectada sobre la pared del laberinto desde la perspectiva de una barrera primaria irradiada (m^2).
- a. Dosis equivalente semanal debida a la dispersión del haz primario desde las superficies del bunker (H_s).

$$H_s = \frac{W U_G \alpha_0 A_0 \alpha_z A_z}{(d_h d_r d_z)^2} \quad [Sv/semana] \quad 1.8$$

Donde W corresponde a la carga de trabajo principal, U_G es el factor de uso en la pared G (Figura 1), los factores denominados con α son coeficientes de reflexión asociados a un área (A) específica del bunker. Tanto los factores de la ecuación 1.8 relacionados a área (A) como los de distancia (d) son los representados en la Figura 1, donde d_h corresponde a ($d_{pp} + 1 m$). Esta misma lógica se repite para las ecuaciones 1.9, 1.10 y 1.11.

- b. Dosis equivalente semanal debida a fotones dispersos desde las paredes debida a la radiación de fuga (H_{LS}).

$$H_{LS} = \frac{L_f W_L U_G \alpha_1 A_1}{(d_{sec} d_{ZZ})^2} \quad [Sv/semana] \quad 1.9$$

Donde L_f es a la fracción del haz primario que corresponde a la radiación de fuga y W_L es la carga de trabajo de fuga.

- c. Dosis equivalente semanal debida a la radiación dispersa por el paciente (H_{ps}).

$$H_{ps} = \frac{\alpha(\theta) W U_G \left(\frac{F}{400}\right) \alpha_1 A_1}{(d_{sca} d_{sec} d_{ZZ})^2} \quad [Sv/semana] \quad 1.10$$

Donde F corresponde al tamaño de campo del acelerador.

- d. Dosis equivalente semanal debida a la radiación de fuga transmitida al interior del laberinto (H_{LT}).

$$H_{LT} = \frac{L_f W_L U_G B}{d_L^2} \quad [Sv/semana] \quad 1.11$$

Donde B es el factor de transmisión de la dosis transmitida debida a radiación de fuga.

Una vez calculados todos estos componentes de dosis equivalentes, se suman para dar la dosis equivalente en el punto determinado en la pared G (H_G):

$$H_G = f H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT} \quad [Sv/semana] \quad 1.12$$

Donde f representa la fracción del haz primario que se transmite a través del paciente y toma valores ~0,25 para haces desde los 6 MV a los 10 MV.

Finalmente, el valor de dosis equivalente total en la puerta del laberinto se obtiene con la ecuación 1.13, según lo propuesto por NCRP 151 (10).

$$H_{tot} = 2,64 H_G \quad [Sv/semana] \quad 1.13$$

Por último, para calcular el grosor de la barrera del laberinto en un bunker de concreto, se considera la transmisión de la radiación de fuga, con la ecuación 1.5 y, para aceleradores de alta energía, es decir, que utilizan energías mayores a 10 MV, se debe considerar también la transmisión de fotoneutrones.

4.2. Marco regulatorio nacional

4.2.1. Decreto Supremo N° 133 de 1984, Ministerio de Salud.

Reglamento que establece autorizaciones para instalaciones radiactivas y personal que opere los equipos o realice otras actividades relacionadas (7). Clasifica los centros de radioterapia como instalaciones de primera categoría. Estas requieren autorizaciones de construcción, operación y de cierre.

Para obtener la autorización de construcción se debe presentar lo siguiente:

- Plano de ubicación.

- Anteproyecto de construcción.
- Plano y memoria de diseño de instalación, que deberá incluir blindaje, manuales de equipos, de los sistemas de seguridad y control, y de los sistemas auxiliares.
- Plan de utilización, que debe contener una descripción de los equipos generadores, y la autorización estimada de los mismos.

4.2.2. Norma de Seguridad NS-04.0: Requerimientos para la Autorización de Operación de Instalaciones de Teleterapia con Aceleradores de Partículas.

Establece los requisitos de seguridad para el diseño y operación segura de las instalaciones radiactivas con aceleradores lineales de electrones para su uso en terapia.

a. Autorizaciones

Las instalaciones que operen con aceleradores lineales de electrones para terapia están sujeta al otorgamiento de la autorización de construcción, operación y cierre temporal o definitivo de la CChEN, según lo establecido en el DS N°133 del Ministerio de Salud (1984). La solicitud de estas autorizaciones debe ir acompañada de un informe de funcionamiento y seguridad radiológica, así como poseer un programa de protección radiológica efectivo.

b. Seguridad radiológica

La optimización de la protección radiológica debe considerarse en todas las etapas del proyecto, de modo que en la memoria de diseño de la instalación se deben utilizar los siguientes límites de dosis de diseño:

- a) Para trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE):
 - 5 mSv/año en cuerpo entero.
 - 100 mSv/año en piel o extremidades.
 - 5 mSv/año en cristalino.
- b) Público general:
 - 1 mSv/año en cuerpo entero.

Además, establece que la carga de trabajo total, la dosis en el isocentro, el factor de uso, el factor de ocupación, las distancias y los límites de diseño no deben exceder a los valores establecidos en la autorización de operación.

Así también, cualquier modificación a la instalación que difiera de lo especificado en la documentación técnica y en las autorizaciones vigentes requiere de una nueva autorización de la CChEN, lo que aplica especialmente a modificaciones en el sistema generador de electrones y fotones.

Los aceleradores utilizados para terapia deben contar con autorización de diseño y fabricación otorgada por la autoridad competente de país de origen. Además, deben venir con documentación que especifique las condiciones para el montaje, pruebas de aceptación, asistencia de la puesta en servicio, período de garantía, entre otros.

c. Diseño de la Instalación

Sobre las barreras de seguridad establece lo siguiente:

- Deben ser diseñadas para que en toda condición operacional y en todo escenario de exposición se mantenga la seguridad, lo que deberá considerar una evaluación de seguridad acorde al riesgo radiológico de la instalación.
- Los sistemas de seguridad deberán diseñarse para que en caso de fallo se mantenga la seguridad.
- Cualquier fallo en los componentes de seguridad deberá impedir la operación del acelerador y sistemas asociados, así como el acceso a zonas controladas.
- El diseño debe incluir barreras de seguridad para blindaje de neutrones cuando la energía máxima de los electrones supere los 10 MeV.
- El diseño debe incluir un sistema de vigilancia radiológica al exterior del bunker y en la sala de control.
- Las instalaciones radiactivas y las zonas controladas y supervisadas deben estar limitadas por barreras físicas, además de contar con señales de advertencia.

d. Evaluación radiométrica

El explotador, que es la persona responsable de la seguridad de la instalación radiactiva, así como del cumplimiento de las condiciones y exigencias establecidas en las autorizaciones, deberá realizar una evaluación radiométrica para verificar que los niveles de radiación de la instalación construida son los determinados en la memoria de cálculo de la instalación.

e. Requisitos de operación

a) Requisitos generales

- Para la operación se requieren dos personas con la Autorización Especial otorgada por la CChEN.
- Contar con procedimientos de operación y mantenimiento, además de un informe de seguridad, actualizados como mínimo cada 3 años.
- Contar con procedimientos de emergencia actualizados anualmente y un informe anual sobre el funcionamiento del equipo.
- El equipo debe operar cumpliendo las condiciones y exigencias de la autorización de operación, y de acuerdo con los procedimientos autorizados.
- Para cada equipo debe haber al menos una persona con Autorización Especial de Operador otorgada por la CChEN y una persona con Autorización de Desempeño, otorgada por el MINSAL.

b) Requisitos para la optimización de la protección

- Implementar un programa de mantenimiento, reparación y control de calidad del acelerador.
- Establecer un programa de garantía de calidad de las exposiciones, a cargo de un Físico Médico con Autorización Especial de Oficial de Protección Radiológica, que incluya:
 - o Registro de pruebas de aceptación y puesta en servicio de los equipos de RT, de todas las características y modos de operación que se utilizarán en la instalación.
 - o Registro de los controles de calidad y de la corrección de las desviaciones de los parámetros de seguridad, mecánicos y físicos del equipo.
 - o Comparación de los registros cada dos años.
- Implementar un procedimiento de investigación de incidentes y accidentes.

4.2.3. Norma de Seguridad NS-02.0: Criterios Básicos de Protección Radiológica.

Establece los requerimientos generales de Protección Radiológica que se aplicará en instalaciones nucleares o radiactivas, en la evaluación que se realiza durante los procesos de licenciamiento y fiscalización (9).

a. Criterios de protección

Los límites primarios para exposición del TOE son los siguientes:

- Dosis efectiva: 20 mSv anuales promediados en 5 años consecutivos y 50 mSv en un año cualquiera.
- Dosis equivalente en el cristalino: 20 mSv anuales promediados en 5 años consecutivos y 50 mSv en un año cualquiera.
- Dosis equivalente en extremidades o en la piel: 500 mSv anuales.

Mientras que los límites para un individuo del público son:

- Dosis efectiva: 1 mSv anuales.
- Dosis equivalente en el cristalino: 15 mSv anuales.
- Dosis equivalente en extremidades o en la piel: 50 mSv anuales.

b. Criterios de aplicación

- La protección radiológica se obtendrá principalmente de la aplicación de seguridad en el diseño de las instalaciones, asignando valor secundario a la seguridad por métodos de operación.
- La seguridad por diseño considerará la utilización de elementos físicos de control (distancia, blindaje, ventilación, etc.).
- Podrá fijarse límites operacionales en las instalaciones, tales como tasa de dosis o concentración de radionúclido en aire.
- El diseño de una instalación deberá ser tal que su contribución al impacto radiológico ambiental no exceda 1/100 de los límites primarios para trabajadores expuestos.
- En operación, la tasa de dosis no deberá superar 7,5 μ Sv/h en la frontera de las zonas controladas.

c. Cálculo de Blindaje

Establece que para el cálculo de los espesores de blindaje se podrá utilizar normas ISO, NCRP, DIN, entre otras. Además, fija disposiciones para el cálculo:

- El factor de uso (U) para barreras secundarias es 1, este valor se mantiene en las barreras primarias cuando el haz es fijo y colimado.
- El valor utilizado para el diseño de las barreras no superará $\frac{1}{4}$ del límite primario de dosis efectiva, distribuido uniformemente en 50 semanas.
- Se agregará una capa hemirreductora o *Half Value Layer (HVL)* al espesor calculado de cada muro, como medida de seguridad.
- Para las barreras primarias se usará la mayor de las áreas que resulte de: a) la proyección del haz dada al campo máximo del equipo, incrementando el radio de dicha proyección en 0,5 m, y b) la proyección correspondiente a la divergencia máxima del haz, incrementada en 10° sexagesimales.
- Los accesos a zonas de alta radiación serán idealmente de tipo laberinto.
- La CChEN puede autorizar el empleo de zonas de restricción o medidas especiales, para permitir rebajar los espesores de las barreras que resulten del cálculo.

4.3. Arcoterapia Volumétrica de Intensidad Modulada (VMAT)

La radioterapia de intensidad modulada (IMRT) emplea múltiples haces de radiación, los cuales son modulados por el MLC según la ubicación del volumen blanco y de los órganos de riesgo, con el fin de mejorar la conformación de la dosis (13). Esta modalidad permite administrar la dosis de dos formas: (a) dinámica o *sliding windows*, en la cual la irradiación es simultánea a la modulación del MLC y (b) estática o *step-and-shoot*, que consiste en detención de la irradiación mientras se modifica el MLC (14). La principal ventaja de IMRT es la mayor conformación hacia el volumen blanco y protección hacia los órganos de riesgo, sin embargo, también presenta ciertas desventajas al compararlo con la radioterapia conformacional, como el aumento en el tiempo de tratamiento debido al gran número de haces utilizados y el incremento de las unidades monitor (UM) en *Sliding Windows*, lo que implica mayor dosis bajas al resto del cuerpo (15).

Con el fin de mejorar estas limitaciones, en 1995 se propone el uso de Arcoterapia de Intensidad Modulada (IMAT) que combina la modulación espacial y temporal de los haces con

el MLC junto con la rotación del gantry, esta técnica se basa en la utilización de múltiples arcos superpuestos para completar la conformación de dosis necesaria para tratar el volumen blanco (16).

La utilización de los arcos superpuestos en conjunto con la búsqueda de la combinación ideal entre modulación y rotación del gantry, implica un aumento en el tiempo de tratamiento. Es por ello que en 2007 se propone la Arcoterapia Volumétrica de Intensidad Modulada (VMAT, por sus siglas en inglés) que consiste en la administración completa de dosis al volumen blanco en un arco único de hasta 360°. Esta tecnología se basa en la variación simultánea de: ángulo de gantry, apertura del MLC y tasa de dosis, resultando en una alternativa de IMRT que logra una gran conformación de la dosis en un menor tiempo y con menor cantidad de UM (11).

Actualmente, VMAT ha sido ampliamente implementado para tratamientos de radioterapia (15). Esta técnica, en conjunto con la IMRT, requiere valores más altos de UM en comparación con la técnica convencional 3D. Esto aumentaría la carga de trabajo, lo que podría afectar al blindaje de la instalación. Sin embargo, Saleh et al demuestra que la carga de trabajo en una semana se mantiene prácticamente invariable, aun implementando tratamientos de intensidad modulada como VMAT. De hecho, concluye de su estudio que los factores para cálculo de blindaje se mantienen dentro de lo recomendado en el NCRP 151, aun implementando IMRT y VMAT (12).

5. HIPÓTESIS

Considerar un cálculo de blindaje enfocado en las características propias de VMAT da lugar a una diferencia de blindaje que permite un aumento de la carga de trabajo en el Instituto Nacional del Cáncer.

6. OBJETIVO GENERAL

Cuantificar la carga de trabajo adicional que se puede lograr al realizar una evaluación de blindaje que incluye las características propias de VMAT en el Instituto Nacional del Cáncer, cumpliendo con los objetivos de blindaje del NCRP 151.

Comentado [NSAO(4)]: Cuantificar la carga de trabajo adicional que se podría lograr al considerar un cálculo de blindaje que considere las características de tratamientos VMAT.

7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar la carga de trabajo (W) incluyendo el uso de técnica VMAT en el acelerador Elekta Infinity del Instituto Nacional del Cáncer (INC).
- Evaluar y calcular el blindaje siguiendo la metodología del NCRP 151, adaptada para considerar las características propias de tratamientos VMAT.
- Determinar la carga de trabajo adicional a partir de la diferencia de dosis entre el cálculo propuesto y los objetivos de blindaje del NCRP 151.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1. Materiales

El Instituto Nacional del Cáncer (INC) cuenta con cinco aceleradores lineales de electrones (LINAC, por sus siglas en inglés), dentro de los cuales se encuentra el acelerador modelo Infinity de Elekta (Elekta AB, Estocolmo, Suecia), con N° de serie 156473 instalado el año 2020 en el bunker CLINAC 02. Este acelerador está provisto del cabezal Agility que contiene 160 láminas de 5 mm cada una y con una velocidad de desplazamiento de las láminas de 6,5 cm/segundo. Además, consta de un tamaño de campo máximo de 40 x 40 cm² y dispone de energías de fotones de 6 MV y de electrones de 10, 15 y 18 MeV, aunque estos últimos no son utilizados. Las modalidades de tratamiento que se pueden realizar con Infinity son de tipo 3D, IMRT, VMAT y Radiocirugía Estereotáxica encefálica o de cuerpo (SRS/SBRT), por sus siglas en inglés), sin embargo, en el INC se emplean únicamente tratamientos VMAT y 3D en este acelerador (17,18).

Comentado [NSAO(5)]: Poner nombre

El bunker CLINAC 02 se encuentra en el primer piso del INC, sus dimensiones son 8,90 m de ancho, 10,86 m de largo y 3,20 m de alto y está construido mayormente de concreto. La entrada está asociada a un laberinto que permite atenuar parte de la radiación y disminuir el espesor de la puerta del bunker. Además, esta sala de tratamiento se encuentra en relación con la sala de control del mismo acelerador, dos bodegas, tres vestidores, pasillos, y una oficina. Asimismo, es importante destacar que, en la actualidad, el bunker cuenta con una lámina blindaje adicional de acero sobre una porción del techo (Figura 3).

Para el cálculo de carga de trabajo, se utilizaron dos bases de datos, una con los controles de calidad paciente específico de tratamientos VMAT, y la otra de tratamientos 3D, que incluían fecha de ingreso o medición, número de fracciones y dosis por fracción de cada paciente, mientras que, para la evaluación y cálculo de blindaje, se utilizaron los planos del bunker CLINAC 02 (Figura 2) en un archivo denominado "201111_REVISIÓN BLINDAJE BUNKER CLINAC 02" a través del programa AutoCAD. Cabe destacar que, el plano está en la escala de 1:50 y está sujeto a un rango de incertidumbre de aproximadamente 0,05 metros (5 cm). Esta variación entre las medidas en el plano respecto de las medidas reales existente es debida a los métodos análogos de medición. Tanto en los planos horizontales como verticales del plano, se proyectaron un total de 19 puntos de medición, 6 para barreras primarias y 13 para barreras secundarias, tal y como se especifica en la Tabla 2.

Los datos obtenidos y los cálculos realizados fueron organizados y analizados en una planilla de Microsoft Excel en la cual se hicieron los cálculos respectivos. Además, cabe destacar que, dentro del cálculo de blindaje está contemplado el cálculo de fracción de radiación dispersa (a), para lo cual se programó un código con Python en la plataforma Colab de Google. Los ángulos utilizados para este cálculo fueron extraídos desde el plano del bunker en AutoCAD y los resultados de fracción de dispersión (a) fueron debidamente registrados en la planilla de Excel.

Tabla 2. Puntos considerados para el cálculo de blindaje.

Punto	Barrera	Detalle	Área controlada
A	Primaria	Oficina funcionario sin dosímetro	No
B	Primaria	Bodega funcionarios sin dosímetro	Si
C	Primaria	Techo	No
B.1	Primaria	Vestidor	No
C.A	Primaria	Segundo piso, auditorio	No
C.B	Primaria	Segundo piso	No
1	Secundaria	Pasillo	No
2	Secundaria	Oficina funcionario con dosímetro	Si
3	Secundaria	Sala de espera	No
4	Secundaria	Escalera	No
5	Secundaria	Oficina funcionarios con dosímetro	Si
6	Secundaria	Sala de comando	Si
7	Secundaria	Sala de comando	Si
8	Secundaria	Costado puerta bunker	Si
9	Secundaria	Pasillo	Si
10	Secundaria	Bodega	Si
11	Secundaria	Techo	No
12	Secundaria	Techo	No
13	Secundaria	Vestidor	No

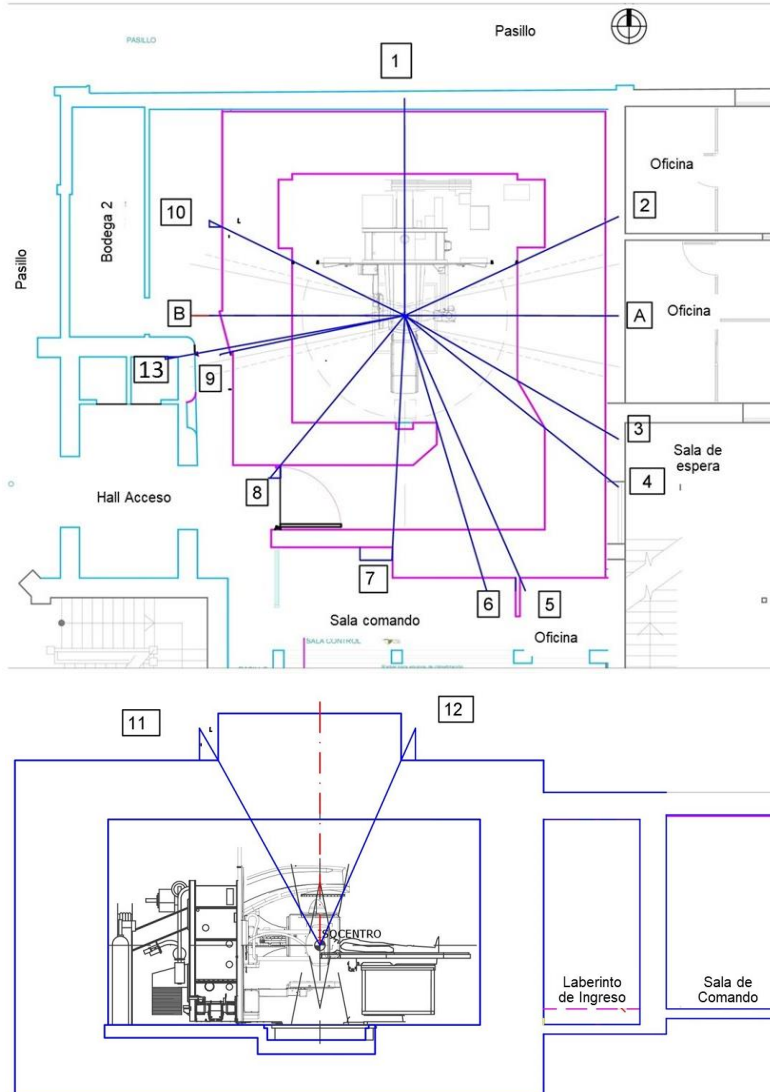


Figura 2. Planos del BUNKER CLINAC 02: (a) horizontal y (b) vertical.

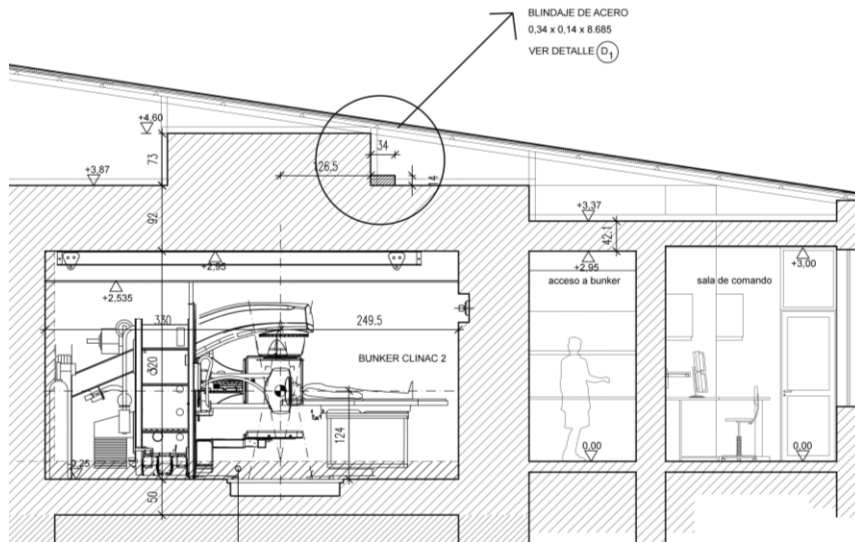


Figura 3. Lámina de acero como blindaje adicional en el techo del BUNKER CLINAC 02.

8.2. Metodología

Es un estudio descriptivo, cuantitativo transversal y retrospectivo en el cual se calculó la carga de trabajo de un año del acelerador Infinity a partir de un análisis de dos bases de datos anonimizadas, uno de los controles de calidad paciente específico para tratamientos VMAT obtenidas con el mismo acelerador, y otra de los tratamientos de técnica 3D, las cuales incluían, entre otros datos, fecha de medición, tipo de tratamiento, número de fracciones, dosis por fracción, energía y UM totales. Se consideró como fecha de inicio y fin, el primer y último día hábil del año 2022, respectivamente, considerando un total de 12 meses de tratamientos. Para este cálculo, se consideró solo la carga de trabajo clínica, ya que es la a la que se expone el profesional con mayor tiempo de exposición, como lo es el Tecnólogo Médico de Radioterapia, razón por la cual no fueron considerados los datos asociados a controles de calidad físicos y de pacientes, pues estos son realizados por la Unidad de Física Médica del INC.

De las bases de datos de tratamientos VMAT y 3D, se exportaron a una planilla de Excel solo los datos que fueran útiles para términos de este estudio, dejando en una misma planilla, aunque en hojas distintas, los datos asociados a cada tipo de tratamiento. En cada hoja, los datos fueron agrupados según modalidad de tratamiento con sus respectivos valores de dosis por fracción, número de fracciones y UM.

Dado que el estudio es de tipo retrospectivo, se utilizó una base de datos anonimizada de la cual solo se utilizó la información asociada a número de fracciones, dosis por fracción, unidades monitor, tipo de tratamiento y energía, lo que asegura que no se utilizaron datos sensibles ni sociodemográficos, asegurando la confidencialidad de identidad, así como la información personal de los individuos, siendo aprobado por el Comité de Ética e Investigación en Seres Humanos de la Universidad de Chile (Anexo 7).

8.2.1. Cuantificación de la carga de trabajo

Para instalaciones que utilizan técnicas de tratamiento adicionales a la técnica 3D, como es el caso del INC, el NCRP determina que la carga de trabajo se debe calcular por separado según el tipo de radiación y los tipos de tratamientos realizados (10). Por ende, para este estudio se calculó en primer lugar, la carga de trabajo principal o asociada a barreras primarias y, luego, la carga de trabajo asociada a la radiación de fuga. El cálculo de la carga de trabajo de radiación dispersa se vuelve prescindible pues el valor de esta coincide con la carga de trabajo principal (19).

a. Carga de trabajo principal

Actualmente, el acelerador Infinity del INC imparte dos técnicas de tratamiento, VMAT y 3D. Por ende, la carga de trabajo principal se determinó considerando la suma de la contribución individual de carga de trabajo de cada modalidad de tratamiento (ecuación 2.2). La carga de trabajo para cada modalidad se calculó considerando la sumatoria del producto entre dosis por fracción y número de fracciones, dividido en una cantidad de tiempo, según la ecuación 2.1.

$$W_x = \frac{\sum(\text{Dosis por fracción} \cdot \text{N}^\circ \text{ de fracciones})}{\text{N}^\circ \text{ de semanas de tratamiento}} \quad \left[\frac{\text{Gy}}{\text{semana}} \right] \quad 2.1$$

Donde “x” corresponde a la modalidad de tratamiento.

Luego, para calcular la carga de trabajo total (W_T) se sumaron los resultados de cada modalidad de tratamiento, en este caso de tratamientos VMAT y 3D, según:

$$W_T = W_{VMAT} + W_{3D} \quad \left[\frac{Gy}{semana} \right] \quad 2.2$$

b. Carga de trabajo para radiación de fuga

Cuando además de tratamientos 3D existen otras modalidades de tratamiento, como lo es VMAT, el valor de carga de trabajo para el componente de radiación de fuga (W_f) difiere de la carga de trabajo principal. Por lo tanto, en este estudio se determinó según el NCRP 151 (10):

$$W_f = W_{3D} + W_{VMAT} \cdot C_i \quad \left[\frac{Gy}{semana} \right] \quad 2.3$$

Donde C_i corresponde al factor IMRT (ecuación 1.6) pero con las UM propias de los tratamientos VMAT (en adelante, Factor VMAT).

8.2.2. Evaluación de blindaje

Para la evaluación de blindaje se consideraron 19 puntos de medición que se trazaron en el plano del bunker CLINAC 02. Estos puntos fueron escogidos en zonas aledañas al bunker donde podría existir transmisión de la radiación.

En primer lugar, se realizó la evaluación de blindaje siguiendo la metodología del NCRP 151, aunque con cálculos adicionales propuestos a continuación, que consideran las características propias de tratamientos VMAT. Posteriormente, se realizó el cálculo de blindaje para determinar el grosor necesario bajo estas condiciones de operación del acelerador, con el fin de comparar con el grosor existente y verificar suficiencia de blindaje.

Para términos prácticos, el método para evaluación de blindaje propuesto fue separado en dos segmentos: (a) evaluación de barrera primaria, que considera los primeros seis puntos de la Tabla 2, y (b) evaluación de barrera secundaria.

8.2.2.1. Barrera primaria

Se calculó la transmisión existente a través de la barrera primaria (B_p) a partir de la ecuación 2.4, propuesta por el NCRP 151 (10):

$$B_p(t) = \begin{cases} 10^{-\left(1 + \frac{t - TVL_1}{TVL_e}\right)}, & t > TVL_1 \\ 10^{-\left(\frac{t}{TVL_1}\right)}, & t \leq TVL_1 \end{cases} \quad 2.4$$

Comentado [NSAO(6): Esta también hay q definirla como una función por partes. Si $t \leq TVL_1$, entonces $B = 10^{-(t/TVL_1)}$. Si $t > TVL_1$, entonces es la fórmula q uds pusieron.

La ecuación 2.4 es una función definida por partes, de modo que su expresión cambiará según el valor que tome la variable independiente, en este caso, el espesor t .

Para el uso de esta ecuación, los valores de TVL_1 y TVL_e fueron extraídos de la tabla B.2 del NCRP 151 (Anexo 1).

a. Determinación del factor de uso para barrera primaria

El factor de uso (U) está definido por la carga de trabajo del haz primario que se dirige hacia una determinada barrera primaria (20). Al igual que en el cálculo de la carga de trabajo, el factor de uso difiere según la modalidad de tratamiento; para el caso de 3D, el NCRP 151 plantea que los ángulos de gantry se distribuyen de forma simétrica en cuatro ángulos principales: 0° , 90° , 180° y 270° , por ende, para cada barrera el factor de uso toma un valor de 0,25. Sin embargo, para el caso de VMAT, es importante recordar que el factor de uso es una función del ángulo de gantry, el cual, a su vez, es un parámetro que es variable en tratamientos VMAT. Ante ello, resulta conveniente determinar U para los tratamientos VMAT según lo propuesto por Kaur et al.

En la Figura 4, Kaur et al. Propone una ilustración geométrica para la obtención del factor de uso (U). Esta muestra puntos T y T' que representan las posiciones de una fuente que rota alrededor del isocentro (O) y R es la distancia entre la fuente y el isocentro. El ángulo θ representa la apertura máxima de campo propio de cada acelerador y el ángulo α se forma entre los ejes centrales de dos haces en distinta posición debido a la rotación de la fuente. El valor de α varía según la distancia hacia la barrera primaria. Además, este ángulo variará con la distancia entre puntos de interés (P_1, P_2, P_3) ubicados en la barrera y el isocentro, la cual se define como d (20).

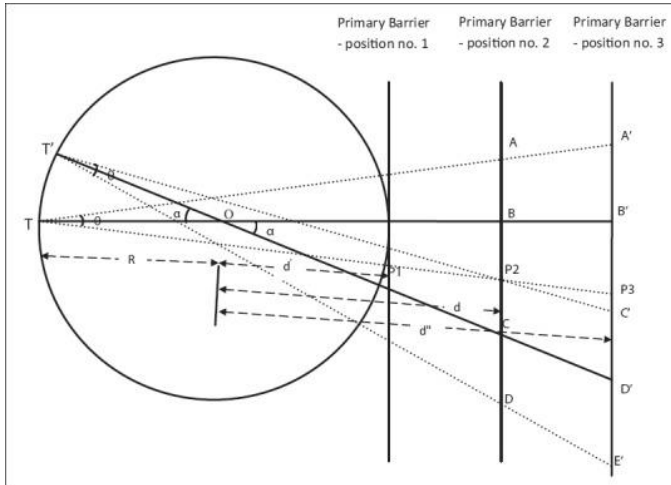


Figura 4. Ilustración geométrica para la determinación del factor de uso (U). Extraída de *Radiation Shielding for Helical Tomotherapy Vault Design*, Kaur et al (2019).

Por lo tanto, considerando que en tratamientos VMAT el ángulo de rotación de la fuente es de 360° , el factor de uso (U) se puede expresar a partir los factores ya descritos con la ecuación 2.5.

$$U = 2 * \frac{\arctan\left(1 + \left(\frac{SAD}{d_{iso}}\right) * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{360} \quad 2.5$$

Donde SAD representa la distancia desde el isocentro hasta el punto de interés y θ está descrito por $2 \tan^{-1} (50\sqrt{2})$ para el acelerador Infinity.

b. Dosis transmitida

Para cada punto se calculó la dosis transmitida a través de la barrera primaria (H_p) a partir de la siguiente ecuación 2.6:

$$H_p = BWUT(d_{pri})^{-2} \quad [Sv/semana] \quad 2.6$$

Esta ecuación se obtuvo despejando P , es decir, el componente de dosis equivalente, de la ecuación 1.1. De esta forma, la ecuación 2.6 da cuenta de la dosis equivalente transmitida a

través de la barrera en un punto determinado. Cabe destacar que los valores de d_{pri} son equivalentes a los valores de d en puntos de barreras primarias (Tabla 4).

El cálculo con la ecuación 2.6 permite obtener la dosis transmitida a través de la barrera primaria para cada modalidad de tratamiento, esto es, obtener un valor de H_p para 3D y VMAT por separado utilizando su factor de uso correspondiente.

8.2.2.2. Barrera secundaria

El cálculo de barreras secundarias fue subdividido en dos etapas, en primer lugar, el cálculo del componente de radiación de fuga y, en segundo lugar, el cálculo de la componente de radiación dispersa. Para ambos casos, se utilizaron los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 expresados en la Tabla 2.

a. Componente de radiación de fuga

En primera instancia, se determinó la transmisión de radiación de fuga (B_L) a través de las barreras secundarias a partir de la ecuación 2.4.

Luego, para calcular la dosis transmitida a través de la barrera debida a la radiación de fuga (H_f), se utilizó la ecuación 2.7 para cada punto, la cual es una adaptación de la ecuación 1.4, despejando P como el componente de dosis equivalente de la ecuación. El factor 10^{-3} da cuenta de la fracción del haz primario que representa la radiación de fuga, siendo esta un 0.1% (10). Los valores de B_L y W_f se obtuvieron en la ecuación 2.4 y 2.5, respectivamente, mientras que los valores de T son los establecidos en la Tabla 4.

$$H_f = \frac{10^{-3} B_L W_f T}{(d_L)^2} \quad [Sv/semana] \quad 2.7$$

Para el cálculo de la ecuación 2.7, el NCRP 151 propone que utilizar d_{iso} en lugar del valor de la distancia promedio desde la fuente hasta el punto de interés (d_L) resulta en una aproximación válida cuando se puede asumir que los ángulos de gantry utilizados son, en promedio, simétricos (10). Si bien en este caso era posible hacer esta suposición, para términos de este estudio resultaba conveniente calcular el valor de la media geométrica de d_L (ecuación 2.8) a partir de los propuesto por Beachler et al. (21):

$$\overline{d_L} = \sqrt[4]{((SAD)^2 + d_{iso}^2)^2 - (2d_{iso}SAD\text{sen}(\phi))^2} \quad 2.8$$

Donde ϕ es el ángulo formado por la normal del plano de giro y es equivalente a $90^\circ - \alpha$, y α representa el ángulo entre el eje central del haz y la línea que une el isocentro con el punto de interés. El valor α varía según el ángulo de gantry, sin embargo, se recomienda utilizar el menor valor como medida conservadora (10).

b. Componente de radiación dispersa

Para los puntos de barreras secundarias (Tabla 2), se calculó la componente de la radiación dispersa siguiendo la misma metodología que para el componente de radiación de fuga. Empezando por el cálculo de la transmisión de radiación dispersa a través de la barrera secundaria (B_d) con la ecuación 2.4.

Posteriormente, la dosis transmitida a través de la barrera por radiación dispersa (H_s) se calculó despejando P en la ecuación 1.4, obteniendo la ecuación 2.9:

$$H_s = \frac{aWB_dT}{(d_{iso})^2} \frac{F}{400} \left[\frac{Sv}{semana} \right] \quad 2.9$$

Donde a es la fracción de dispersión y el F representa el tamaño de campo del equipo, de modo que al ser dividido por 400 queda normalizado respecto de un campo de 20x20 cm.

Tanto para radiación de fuga como para radiación dispersa, el factor de uso (U) se asume como el valor de la unidad, puesto que ambos tipos de radiación son emitidas en todas las direcciones (22). Sin embargo, para considerar el giro de gantry en este cálculo, resulta conveniente plantear la ecuación 2.9 como una función del ángulo de gantry (θ) e integrar respecto de dicho ángulo en el intervalo de movimiento del mismo, es decir, entre 0 y 2π , según:

$$H_s = \int_0^{2\pi} \frac{aUB_dT}{(d_{iso})^2} \frac{F}{400} d\theta \quad 2.10$$

En la ecuación 2.10, solo a y U dependen del ángulo de gantry (θ), por ende:

$$H_s = \frac{WB_d T}{(d_{iso})^2} \frac{F}{400} \int_0^{2\pi} aU \, d\theta$$

Ahora, asumiendo que U es una constante:

$$\int_0^{2\pi} U \, d\theta = 1$$

$$U = \frac{1}{2\pi}$$

Entonces, la ecuación 2.9, considerando el giro de gantry (θ) queda como:

$$H_s = \frac{1}{2\pi} \frac{WB_d T}{(d_{iso})^2} \frac{F}{400} \int_0^{2\pi} a \, d\theta \quad 2.11$$

En cuanto a la fracción de dispersión a , es sabido que esta alcanza un punto de interés que depende del ángulo α entre el eje central del haz y la línea que une el isocentro y el punto de interés. Dicho de otra forma, para un sistema de coordenadas como el que se indica en la Figura 5, el ángulo α es aquel que se forma entre dos vectores: \vec{a} y \vec{d} . El vector \vec{a} de coordenadas $(-a_x, a_y, 0)$ representa el eje central del haz que varía en θ grados en sentido antihorario, donde el ángulo de gantry $\theta = 0$ corresponde al haz entrando desde anterior a posterior con el paciente en posición supina con la cabeza hacia el gantry, y en $\theta = 90^\circ$ el haz ingresa por la derecha del paciente. Por otro lado, el vector \vec{d} representa la distancia d desde el isocentro hasta un punto de interés de coordenadas x, y, z , como se muestra en el esquema de la Figura 5.

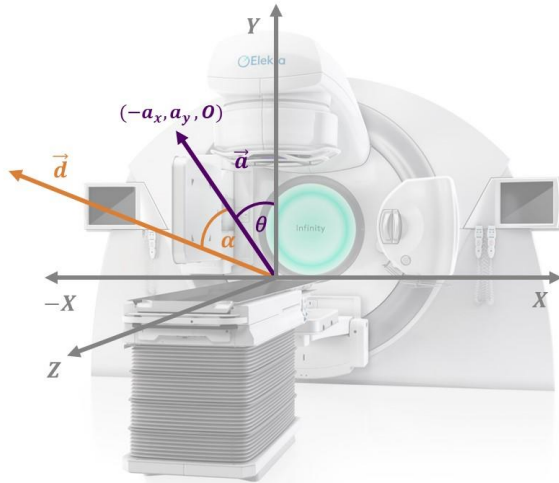


Figura 5. Acelerador Elekta InfinityTM y sistema de coordenadas con vectores \vec{a} y \vec{d} .
 Adaptada de Infinity Brochure, Elekta AB, Estocolmo, Suecia (2019).

De este modo, es posible de deducir que el ángulo α varía en función del ángulo de gantry θ a partir del producto punto entre dos vectores, según:

$$\vec{a} \cdot \vec{d} = |\vec{a}| |\vec{d}| \cos \alpha = (-a_x x + a_y y + a_z z)$$

Ahora, el módulo del vector \vec{a} representa la distancia entre la fuente y el isocentro \vec{a} , lo que corresponde a 1 m. Así también, el módulo del vector \vec{d} representa la distancia d desde el isocentro al punto. Al reescribir queda:

$$\cos \alpha = \frac{(y \cos \theta - x \sin \theta)}{d}$$

Despejando el ángulo α se obtiene una función que representa la variación de este en función del ángulo de gantry θ (ecuación 2.12).

$$\alpha(\theta) = \arccos\left(\frac{y \cos \theta - x \sin \theta}{d}\right) \quad 2.12$$

Por ende, al integrar α (ecuación 2.12) respecto de θ entre 0 y 2π , se obtiene una función (ecuación 2.13) que da como resultado la fracción de dispersión a para un punto de coordenadas x, y, z a una distancia d desde el isocentro.

$$a(\alpha) = \int_0^{2\pi} \alpha(\theta) d\theta = \int_0^{2\pi} \arccos\left(\frac{y\cos\theta - x\sin\theta}{d}\right) d\theta \quad 2.13$$

Para calcular esta integral se obtuvo, en primer lugar, las coordenadas x, y, z de cada punto en el plano del bunker CLINAC 02 a través de AutoCAD (Tabla 11). Luego, en la plataforma Colab de Google se programó un código en Python que consideraba tanto la ecuación 2.12 como la ecuación 2.13 (Figura 6). De este modo, se introdujo manualmente las coordenadas de cada punto para obtener el valor de a correspondiente.

8.2.3. Cálculo de Blindaje

Se realizó el cálculo del blindaje siguiendo el formulismo del NCRP 151 pero considerando las características propias de VMAT, a partir de los datos obtenidos en los apartados 8.2.1 y 8.2.2. Para términos prácticos, este cálculo fue clasificado como “Blindaje Necesario”, ya que da cuenta de los requisitos mínimos de blindaje para esas condiciones de operación pues toma en cuenta los valores de objetivo de diseño de blindaje (P), tanto para barreras primarias como secundarias.

Para el calcular las diferencias de blindaje, se utilizaron consecutivamente las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3 que dan cuenta, respectivamente, de la transmisión a través de la barrera primaria, el número de TVL necesarios para esa barrera y, finalmente el valor del grosor t necesario de la barrera primaria en cada punto. A partir de esto, se calculó la diferencia entre los valores de grosor existentes y los necesarios para cada punto, siendo el resultado de esta resta el grosor t que se debe agregar en caso de no cumplir con el blindaje necesario para esas condiciones de operación del equipo.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as tck
from scipy import integrate

#Cálculo de distancia (dist) del punto de interés P
def dist(x,y,z):
    return np.sqrt(x**2+y**2+z**2)

#Definición de alpha
def alpha(theta, x_cord, y_cord, z_cord):
    # alpha es el ángulo entre el haz incidente y la línea que une el
    # isocentro con el punto P de interés
    # theta es el ángulo de giro de gantry
    return np.arccos((y_cord*np.cos(theta)-
x_cord*np.sin(theta))/dist(x_cord,y_cord,z_cord))

#Interpolación de los valores del ángulo alpha
def a(alpha):
    #Ángulos de 0° a 360°
    xp=np.array([0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 135, 150, 210, 225, 270,
300, 315, 330, 340, 350, 360])
    xp=xp*np.pi/180
    #Valores de fracciones de dispersión obtenidas del NCRP
    fp=np.array([1.04E-02, 1.04E-02, 6.73E-03, 2.77E-03, 1.39E-03, 8.24E-
04, 4.26E-04, 3.00E-04, 2.87E-04, 2.87E-04, 3.00E-04, 4.26E-04,
8.24E-04, 1.39E-03, 2.77E-03, 6.73E-03, 1.04E-02, 1.04E-02])
    return np.interp(alpha, xp, fp, left=None, right=None, period=None)

#Coordenadas para cada punto de interés P
x1=
y1=
z1=

#Integración de la fracción de dispersión a
Resultado=integrate.quad(lambda theta : a(alpha(theta, x1, y1, z1)), 0,
2*np.pi)
print('Resultado 1:')
print(Resultado[0]/2/np.pi)

```

Figura 6. Código generado en Colab de Google para la ecuación 2.13.

En el caso de barreras primarias, se hicieron cálculos independientes de transmisión para tratamientos VMAT y 3D. A partir de ello, se calculó un espesor necesario para atenuar el componente de radiación de cada tipo de tratamiento y se compararon los resultados según la Regla de Dos Fuentes o *Two Source Rule*. Esta consiste en una medida conservadora la cual propone que, cuando los grosores calculados para ambos componentes (en este caso,

VMAT y 3D) son similares, se utiliza el espesor de mayor valor para la barrera secundaria, añadiendo 1 *HVL* adicional, mientras que, en el caso contrario, cuando uno de los grosores es mayor que el otro en 1 *TVL* o más, se utiliza el de mayor valor (10). Cabe destacar que este procedimiento no es el convencional; generalmente, el espesor de barrera primaria se calcula en un solo paso sin separar los componentes, sin embargo, como el factor de uso empleado para VMAT y 3D era distinto, resultó necesario hacer los cálculos de forma independiente.

En cuanto el cálculo de barreras secundarias, se siguió el mismo procedimiento ya descrito para según los componentes de radiación dispersa (ecuación 1.4) y de radiación de fuga (ecuación 1.5). Para radiación dispersa, luego del cálculo de B_s (ecuación 1.6), se calculó el número de *TVL* (ecuación 1.2) y el espesor de barrera necesario (ecuación 1.3) para la contribución de ese tipo de radiación, y se repitió el mismo procedimiento para el componente de radiación de fuga a partir de los datos de B_L (ecuación 1.4). Luego, los valores de grosor obtenidos para ambos componentes son comparados para obtener el espesor final según la *Two Source Rule*.

Posteriormente, se calcula la diferencia entre el grosor existente y el espesor final obtenido para barreras secundarias, de modo que el resultado de la resta da cuenta de el grosor en centímetros (cm) que se debiera agregar en caso de que el grosor necesario sea mayor al existente.

Para el caso de la puerta del bunker, el grosor necesario se calculó obteniendo la transmisión a través de la puerta a partir del cociente entre P y H_{tot} , y luego se calculó el número de *TVLs* (ecuación 1.2) y el espesor necesario (1.3). Ahora, para el espesor necesario del laberinto, se realiza el mismo procedimiento, pero considerando la transmisión de radiación de fuga.

8.2.4. Cálculo de puerta y laberinto del bunker

Para calcular la dosis equivalente en la puerta del bunker, se siguió en cuatro pasos el formulismo establecido por el NCRP 151, extrapolando lo propuesto en la Figura 1 al plano del bunker CLINAC 02 (Figura 2). Para términos prácticos se utilizó la misma denominación que en la Figura 1 en el plano del bunker, por ejemplo, el equivalente a la pared G del NCRP 151 se denominó G' en el plano del bunker CLINAC 02.

Comentado [NSAO(7)]: Revisar este cálculo

Comentado [NSAO(8)]: Esto no es evaluación, es cálculo?

a. Dosis equivalente semanal debida a la dispersión del haz primario desde las superficies del bunker (H_S).

Se calculó a partir de la ecuación 1.8, donde el valor de W corresponde a la carga de trabajo principal, U_G corresponde al factor de uso (U) del punto A de la pared G' , α_0 es el coeficiente de reflexión en la superficie A_0 (figura 1), que a su vez representa el área del haz en la primera superficie de dispersión.

En cuanto a los factores α_z y A_z , corresponden, respectivamente, al coeficiente de reflexión para la segunda reflexión desde A_z , mientras que A_z es el área de sección transversal del acceso interior del laberinto proyectada sobre la pared del laberinto desde la perspectiva de una barrera primaria irradiada (ver Figura 1). Por último, los valores de d_h , d_r y d_z corresponden a las dimensiones del plano que muestra la Figura 1.

b. Dosis equivalente semanal debida a la radiación de fuga en la puerta del laberinto (H_{LS}).

H_{LS} fue calculada con la ecuación 1.8, donde L_f corresponde a la razón de la radiación de fuga respecto del haz primario a 1 m desde el blanco, W_L corresponde a la carga de trabajo de radiación de fuga, α_1 es el coeficiente de reflexión para la dispersión de radiación de fuga desde la pared G' (Figura 1) y A_1 es el área de la misma pared que se puede ver desde la puerta del laberinto.

c. Dosis equivalente semanal debida a la radiación dispersa por el paciente (H_{PS}).

Se calculó a partir de la ecuación 1.10, donde $a(\theta)$ es el coeficiente de reflexión de la radiación de fuga desde la pared G' , α_2 es el coeficiente de reflexión para la pared G' debido a la radiación dispersada por el paciente y F corresponde al tamaño del campo.

d. Dosis equivalente semanal debida a la radiación de fuga transmitida al interior del laberinto (H_{LT}).

Se obtuvo a partir de la ecuación 1.11, donde B se consideró como la transmisión calculada para el punto 8 (

Tabla 8) para la pared interna del laberinto (Z').

Luego, todos estos factores calculados se sumaron para obtener H_G según la ecuación 1.12, y a partir de este valor se calculó H_{tot} según la ecuación 1.13. Finalmente, el grosor de la

puerta se calcula a partir de la transmisión, la cual es determinada dividiendo el valor de objetivo de diseño de blindaje P en H_{tot} . Luego con las ecuaciones 1.2 y 1.3 se calcula el espesor necesario de la puerta. De la misma forma se obtuvo el grosor de laberinto, pero desde la transmisión de radiación de fuga.

8.2.5. Cuantificación de la carga de trabajo (W) adicional

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos de dosis equivalente transmitida H y los valores de P del NCRP 151, ya que la primera se relaciona de forma directamente proporcional con la carga de trabajo. Por lo tanto, se determinó el porcentaje de H respecto de P , y la diferencia porcentual de este valor respecto de un total o 100% determina la proporción en la que se puede aumentar la carga de trabajo según los valores de ese punto. Para este cálculo, el total o 100% respecto del cual se hace la diferencia porcentual corresponde a los valores de objetivo de diseño de blindaje P establecidos por el NCRP 151, ya sea para áreas controladas o no controladas, según corresponda.

Ahora, la proporción de carga de trabajo W general que se puede aumentar en el bunker va a corresponder al punto con el menor valor de diferencia porcentual. De esta manera, si se aumenta la carga de trabajo en esa proporción, todos los puntos estarían dentro de los objetivos de blindaje del NCRP 151.

9. RESULTADOS

9.1.1. Cuantificación de la carga de trabajo (W)

c. Carga de trabajo principal

El número de tratamientos realizados el año 2022 en el acelerador Infinity fue 795, donde 411 corresponden a tratamientos VMAT en un intervalo de 52 semanas (12 meses) y 384 a tratamientos 3D. Cabe destacar que, en este último caso, no se consideraron 52 semanas pues, desde marzo de 2022 se implementó un nuevo software para el registro de tratamientos de pacientes, por lo que, los datos obtenidos fueron solo desde esa fecha en adelante, lo que correspondía a un aproximado de 41 semanas. En cada base de datos, los tratamientos fueron agrupados según sitio de tratamiento para ambas modalidades, siendo los más frecuentes Próstata, Mama y Pelvis para tratamientos VMAT, y Mama, Pelvis y Óseo para tratamientos 3D.

En ambas bases de datos (VMAT y 3D), cada tratamiento consta de un número de fracciones (sesiones de tratamiento) y dosis por fracción. De modo que, el producto entre ambos factores da cuenta de la dosis (Gy) total de cada tratamiento. Por ende, para el cálculo de la carga de trabajo (W) de cada modalidad de tratamiento, se consideró la sumatoria de la dosis total de todos los tratamientos, dividido en el intervalo de tiempo (ecuación 2.1). Para el cálculo de W de tratamientos VMAT se utilizó 52 semanas en tratamientos VMAT, mientras que para tratamientos 3D se consideraron 41 semanas.

Luego, sumando la carga de trabajo de ambas modalidades según la ecuación 2.1, se obtuvo que la carga de trabajo (W) asociada a tratamientos en el acelerador Infinity corresponde a un total de 660,970 Gy/semana, donde 462,185 Gy/semana corresponden a tratamientos VMAT, mientras que 198,785 Gy/semana a tratamientos 3D (Tabla 3).

Tabla 3. Carga de trabajo (W) según tipo de tratamiento para VMAT y 3D.

VMAT		3D	
Tipo de tratamiento	W [Gy/semana]	Tipo de tratamiento	W [Gy/semana]
Próstata	308,643	Mama	64,361
Pelvis	75,354	Pelvis	39,585
Mama	53,826	Óseo	31,488
Recto	7,692	Recto	15,722
Otros	6,669	Encéfalo	15,155
Cerebro	5,769	Ginecológico	2,537
Vejiga	4,231	Cabeza y Cuello	7,610
		Extremidades	4,927
		Abdomen	8,317
		Otros	9,083
Total W	462,185	Total W	198,785

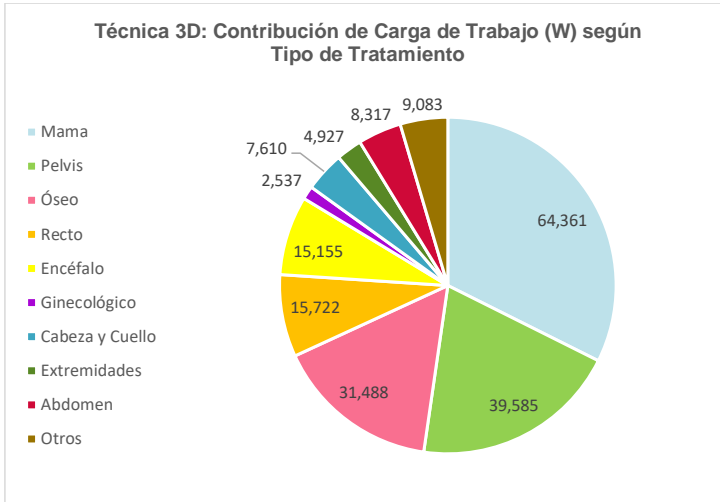


Figura 7. Contribución de carga de trabajo W en [Gy/semana] según tipo de tratamiento para técnica 3D.

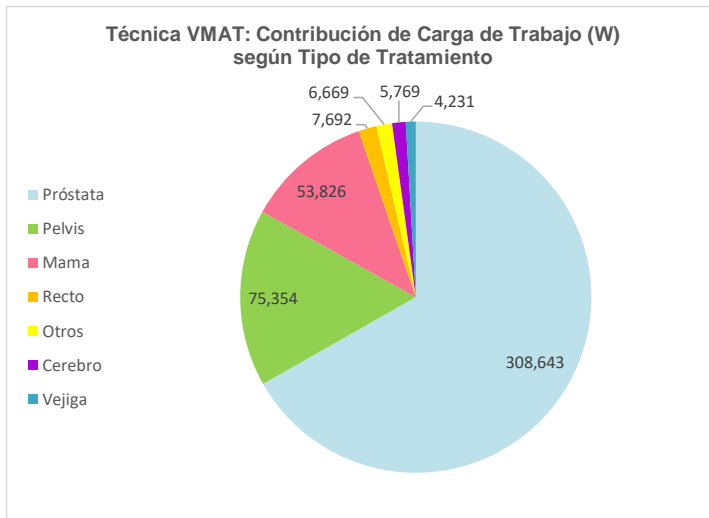


Figura 8. Contribución de carga de trabajo W en [Gy/semana] según tipo de tratamiento para técnica VMAT.

d. Carga de trabajo de fuga (W_f)

El componente de la carga de trabajo debido a radiación de fuga (W_f) se obtuvo según la ecuación 2.3, considerando los valores calculados en el apartado anterior. El factor VMAT se calculó a según de la ecuación 1.6, para ello, se determinó, en primer lugar, las UM_{VMAT} con la ecuación 1.7, donde se utilizó el promedio de la sumatoria del cociente entre las UM de cada tratamiento y la dosis por fracción (cGy). En segundo lugar, el valor de UM_{conv} se asumió como 1, considerando que el equipo está calibrado para que $100 \text{ UM} = 100 \text{ cGy}$.

Los resultados de UM_{VMAT} , factor VMAT (C_i) y carga de trabajo de fuga (W_f) se muestran a continuación:

$$UM_{VMAT} = \frac{1288,1}{411} \approx 3,11$$

$$C_i = \frac{3,11}{1} \approx 3,11$$

$$W_f = 198,785 + 3,11 \cdot 462,185$$

$$W_f = 1640,52 \quad [Gy/Semana]$$

9.1.2. Evaluación de blindaje

Para la evaluación de blindaje se utilizó un total de 19 puntos de medición, 6 para barreras primarias y 13 para barreras secundarias. Para cada uno de estos se midió, a través del programa AutoCAD, la distancia (d) desde el isocentro al punto de interés, así también, el grosor de la barrera asociado (t). Cabe destacar que, la medición de cada punto fue a 0,3 m desde la barrera, siguiendo la recomendación del NCRP 151, excepto en los puntos ubicados en el techo del bunker, donde la medición es a 0,5 m (10).

Además, cada punto fue clasificado en área controlada o no controlada (Tabla 2) y, según la utilidad que tiene el espacio donde va trazado el punto, se le asignó un valor de factor de ocupación (T), según lo establecido por el NCRP 151 (Tabla 1).

Tabla 4. Valores de d [cm], t [cm] y Factor de ocupación (T) de los puntos de medición.

Punto	d [cm]	t [cm]	Detalle	T
A	4,978	205,0	Oficina funcionario sin dosímetro	1
B	4,555	138,0	Bodega funcionarios sin dosímetro	1/20
C	4,110	165,0	Techo	1/40
B.1	6,662	138,0	Vestidor	1/20
C.A	7,301	165,0	Segundo piso, auditorio	1/40
C.B	13,195	165,0	Segundo piso	1/40
1	5,052	142,2	Pasillo	1/5
2	5,482	141,3	Oficina funcionario con dosímetro	1
3	5,750	141,3	Sala de espera	1/5
4	6,378	141,3	Escalera	1/5
5	6,996	112,2	Oficina funcionarios con dosímetro	1
6	6,685	112,2	Sala de comando	1
7	5,705	140,2	Sala de comando	1
8	4,921	99,0	Costado puerta bunker	1/8
9	4,404	138,0	Pasillo	1/20
10	5,061	131,0	Bodega	1/20
11	3,87	92,0	Techo	1/40
12	3,69	92+14*	Techo	1/40
13	5,677	138,0	Vestidor	1/20

*El punto 12 presenta un blindaje compuesto entre concreto y acero, donde los espesores son 92 cm y 14 cm, respectivamente.

Cabe destacar que, los valores sugeridos por el NCRP 151 para T (Tabla 1) no contemplan explícitamente ubicaciones como vestidores y techo, por lo que, para los puntos B.1, 13 (vestidores), 11 y 12 (techo), el valor de T fue asignado como 1/20 y 1/40, respectivamente, como medida conservadora. Ya que, si bien los vestidores son áreas donde transita gente, rara vez se trata del mismo individuo, por ende, el cálculo en función de la persona que está mayormente expuesta a la radiación, como recomienda el NCRP 151 (10), se hace despreciable, así mismo ocurre con el techo, que por su naturaleza es una zona de nulo tránsito de personas.

Es importante mencionar también, que el punto 12 de barreras secundarias presenta un blindaje compuesto entre concreto y acero, de modo que el espesor de 92 cm corresponde al blindaje de concreto y los 14 cm del blindaje de acero.

9.1.2.1. Evaluación de barrera primaria

Se determinó la transmisión a través de la barrera primaria (B_{pri}) para los puntos A, B, C, B.1, C.A, C.B según la ecuación 2.4. Para este cálculo, se utilizaron los valores sugeridos por el NCRP 151 para TVL_1 y TVL_e , siendo 37 cm y 33 cm, respectivamente. Los resultados de B_{pri} se muestran en la Tabla 5.

a. Determinación del factor de uso para barrera primaria (U)

Para tratamientos VMAT, el factor de uso se calculó según lo propuesto por Kaur et al en la ecuación 2.5. Para ello, se consideró el valor de 1 m para SAD, d corresponde a la distancia expuesta en la Tabla 4 y θ es un valor fijo para cada punto y su valor corresponde a 0,55 radianes. Por otra parte, para tratamientos 3D, se siguió la recomendación de NCRP 151, utilizando un valor de 0,25 (10). Los valores calculados de factor de uso (U) se demuestran en la Tabla 5.

b. Dosis transmitida (H_p)

La dosis transmitida H_p se calculó individualmente para 3D y VMAT a partir de la ecuación 2.6 utilizando los valores obtenidos con B_{pri} (ecuación 2.4), W (ecuación 2.2) para 3D y VMAT (Tabla 3), mientras que los valores de T y d (d_{pri}) corresponden a los expuestos en la Tabla 4 para cada punto. Los resultados obtenidos se muestran respectivamente en las Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Cálculo de la dosis transmitida a través de la barrera debida a tratamientos 3D.

Punto	B_{pri}	U	H_p3D [Sv/semana]
A	8,11E-07	2,5E-01	1,13E-06
B	8,69E-05	2,5E-01	7,00E-06
C	1,32E-05	2,5E-01	6,29E-07
B.1	8,70E-05	2,5E-01	3,68E-06
C.A	1,32E-05	2,5E-01	2,38E-07

C.B 1,32E-05 2,5E-01 8,15E-08

Tabla 6. Cálculo de la dosis transmitida a través de la barrera debida a tratamientos VMAT.

Punto	B_{pri}	U	$H_p VMAT$ [Sv/semana]
A	8,11E-07	1,04E-01	1,09E-06
B	8,69E-05	1,06E-01	6,89E-06
C	1,32E-05	1,08E-01	6,30E-07
B.1	8,70E-05	1,00E-01	3,43E-06
C.A	1,32E-05	9,90E-02	2,20E-07
C.B	1,32E-05	9,40E-02	7,13E-08

Adicionalmente, se presenta la tabla 7 que expresa la comparación entre los valores de H obtenidos con el cálculo propuesto, es decir, utilizando el factor de uso (U) calculado para VMAT, y el valor H obtenido con el método convencional del NCRP 151.

Tabla 7. Comparación de los valores de H en Sv/semana obtenida con el cálculo propuesto y con la metodología del NCRP 151.

Punto	U	U_{NCRP}	$H_p VMAT$	$H_p NCRP$
A	1,04E-01	2,5E-01	1,09E-06	3,75E-06
B	1,06E-01	2,5E-01	6,89E-06	2,33E-05
C	1,08E-01	2,5E-01	6,30E-07	2,09E-06
B.1	1,00E-01	2,5E-01	3,43E-06	1,61E-05
C.A	9,90E-01	2,5E-01	2,20E-07	8,32E-07
C.B	9,40E-01	2,5E-01	7,13E-08	2,79E-07

9.1.2.2. Evaluación de barrera secundaria

a. Componente de radiación de fuga

Se determinó la transmisión de radiación de fuga (B_L) a través de las barreras secundarias en todos los puntos a partir de la ecuación 2.4. Se utilizaron los valores de 33 y 29 cm para los TVL_1 y TVL_e , respectivamente, los cuales fueron extraídos de la tabla B.7 del NCRP 151 que da cuenta de los valores de TVL_s sugeridos para concreto (Anexo 2) (10). Cabe destacar que, para considerar la lámina de acero como blindaje complementario en el punto 12 (Figura 3),

se realizó un cálculo adicional de factor de transmisión (B) para acero. Luego, ambos factores (de concreto y de acero) fueron multiplicados para obtener el factor de transmisión total. Para el cálculo de factor de transmisión del acero se utilizó el valor de 9,6 cm tanto para TVL_1 como para TVL_e , según lo propuesto por Martin (23).

La dosis transmitida a través de la barrera debida a la radiación de fuga (H_f) se calculó a partir de la ecuación 2.7. Para este cálculo, d_L se determinó según la ecuación 2.8, donde es importante destacar que, se determinaron primeramente los valores de α para cada punto, a través de AutoCAD, considerando el ángulo de menor valor. Los valores de α se obtuvieron en radianes, y posteriormente se calcularon los valores de ϕ para cada punto, considerando $\phi = \frac{\pi}{2} - \alpha$.

Los valores de los ángulos α y ϕ , así como los resultados obtenidos para d_L , B_f y H_f se expresan en la

Tabla 8. Notar que, además del punto 12, existe un punto 12.1 que da cuenta del cálculo exclusivo para el blindaje adicional de acero sobre ese punto, mientras que el resto de los puntos son calculados exclusivamente para concreto.

Tabla 8. Valores de α , ϕ , d_L , factor de transmisión (B_f) y dosis transmitida (H_f) para cada punto de barreras secundarias.

Punto	α [Rad]	ϕ [Rad]	d_L [m]	B_f	H_f [Sv/semana]
1	1,57	0,00	5,15	1,46E-05	1,81E-07
2	0,43	1,14	5,42	2,00E-05	1,11E-06
3	0,52	1,05	5,71	2,00E-05	2,01E-07
4	0,68	0,90	6,36	2,00E-05	1,62E-07
5	1,16	0,41	7,04	2,01E-04	6,65E-06
6	1,28	0,29	6,75	2,01E-04	7,25E-06
7	1,52	0,05	5,79	2,18E-05	1,06E-06
8	0,88	0,69	4,94	5,74E-04	4,82E-06
9	0,21	1,36	4,30	2,59E-05	1,15E-07
10	0,45	1,12	5,00	4,52E-05	1,48E-07
11	0,50	1,07	3,80	1,00E-03	2,84E-06

12	0,41	1,16	3,60	1,00E-03	
12.1	-	-	-	3,48E-02	1,10E-07
13	0,18	1,39	5,59	2,59E-05	6,80E-08

En la Tabla 8 es importante destacar que la transmisión correspondiente al punto 12 está dividida en dos, una correspondiente a concreto (punto 12) y otra a acero (punto 12.1). El resultado de H_f para el punto 12 en la tabla 8 es el resultado considerando ambas transmisiones.

Adicionalmente, se presenta la Tabla 9 que expresa la comparación entre los valores de H obtenidos con el cálculo propuesto, es decir, utilizando d_L , y el valor H obtenido con el método convencional del NCRP 151, utilizando d_{iso} .

Tabla 9. Comparación entre los valores de d_L , d_{iso} , y H [Sv/semana] obtenidos con el cálculo propuesto y con la metodología convencional del NCRP 151.

Punto	d_L [m]	d_{iso} [m]	H_f	$H_f NCRP$
1	5,15	5,05	1,81E-07	1,88E-07
2	5,42	5,48	1,11E-06	1,09E-06
3	5,71	5,75	2,01E-07	1,98E-07
4	6,36	6,38	1,62E-07	1,61E-07
5	7,04	7,00	6,65E-06	6,74E-06
6	6,75	6,69	7,25E-06	7,38E-06
7	5,79	5,71	1,06E-06	1,10E-06
8	4,94	4,92	4,82E-06	4,86E-06
9	4,30	4,40	1,15E-07	1,10E-07
10	5,00	5,06	1,48E-07	1,45E-07
11	3,80	3,87	2,84E-06	2,74E-06
12	3,60	3,69	1,10E-07	1,05E-07
13	5,59	5,68	6,80E-08	6,60E-08

b. Componente de radiación dispersa

Al igual que para el componente de radiación de fuga, se comenzó calculando el factor de transmisión de radiación dispersa (B_d) a partir de la ecuación 2.4, cuyos resultados se

expresan en la Tabla 12. Cabe destacar que para radiación dispersa se utiliza la función determinada por valores de $t \leq TVL_1$. En el caso del valor de TVL , la tabla B.5a del NCRP 151 (Anexo 4) propone distintos valores según el ángulo de dispersión α (10). Como se muestra en la

Tabla 8, cada punto de barrera secundaria posee su propio valor de α y, en la mayoría de los casos, no coinciden con los propuestos por el NCRP 151. Para estimar el valor de TVL de cada ángulo, se realizó una interpolación lineal en Excel de los valores del NCRP 151 en función de los valores de α (Tabla 10). Al igual que en el apartado anterior, para calcular el factor de transmisión de radiación dispersa en el punto 12 también se consideraron dos factores que luego fueron multiplicados, uno para concreto y otro para acero. Para este último, el valor de TVL_1 se calculó interpolando los datos de la tabla propuesta por Martin para obtener el valor correspondiente a $23,7^\circ$. (23)

Tabla 10. Valores de TVL en concreto para cada punto según el ángulo de dispersión α .

Punto	α [Grados]	TVL [cm]
1	90,00	17,00
2	24,80	29,20
3	30,00	26,00
4	38,70	24,40
5	66,30	20,20
6	73,40	19,26
7	87,00	17,40
8	50,30	22,33
9	11,80	34,80
10	25,80	28,66
11	28,80	27,06
12	23,70	29,36
13	10,30	35,00

Luego, H_s se determinó utilizando la ecuación 2.9. El tamaño de campo del acelerador Infinity es de 40 x 40 cm, por ende, el valor de F utilizado para este cálculo fue 1600, el valor de W es el calculado con la ecuación 2.2 y los valores de T son los expuestos en la Tabla 4. Para

calcular el ángulo α y la fracción de dispersión (a), necesarias para determinar H_s , se utilizaron las ecuaciones 2.12 y 2.13, respectivamente. En la figura 9a y 9b, se muestra la variación el ángulo α y la fracción de dispersión (a) respecto del ángulo de gantry (θ) para cada punto, según las ecuaciones la mencionadas.

Variación del ángulo α y fracción de dispersión (a) según el ángulo de gantry (θ) para los puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

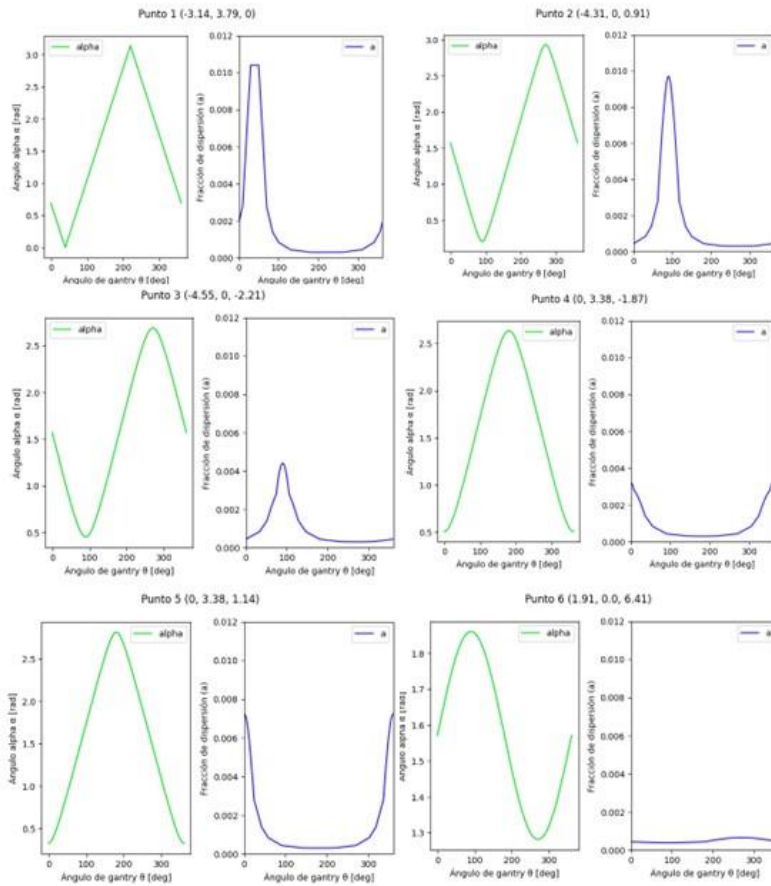


Figura 9a. Variación del ángulo α y fracción de dispersión (a) según el ángulo de gantry (θ) para los puntos los 1, 2, 3, 4, 5 y 6 de barreras secundarias, a partir de las ecuaciones 2.12 y 2.13.

Variación del ángulo α y fracción de dispersión (a) según ángulo de gantry (θ) para los puntos 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13

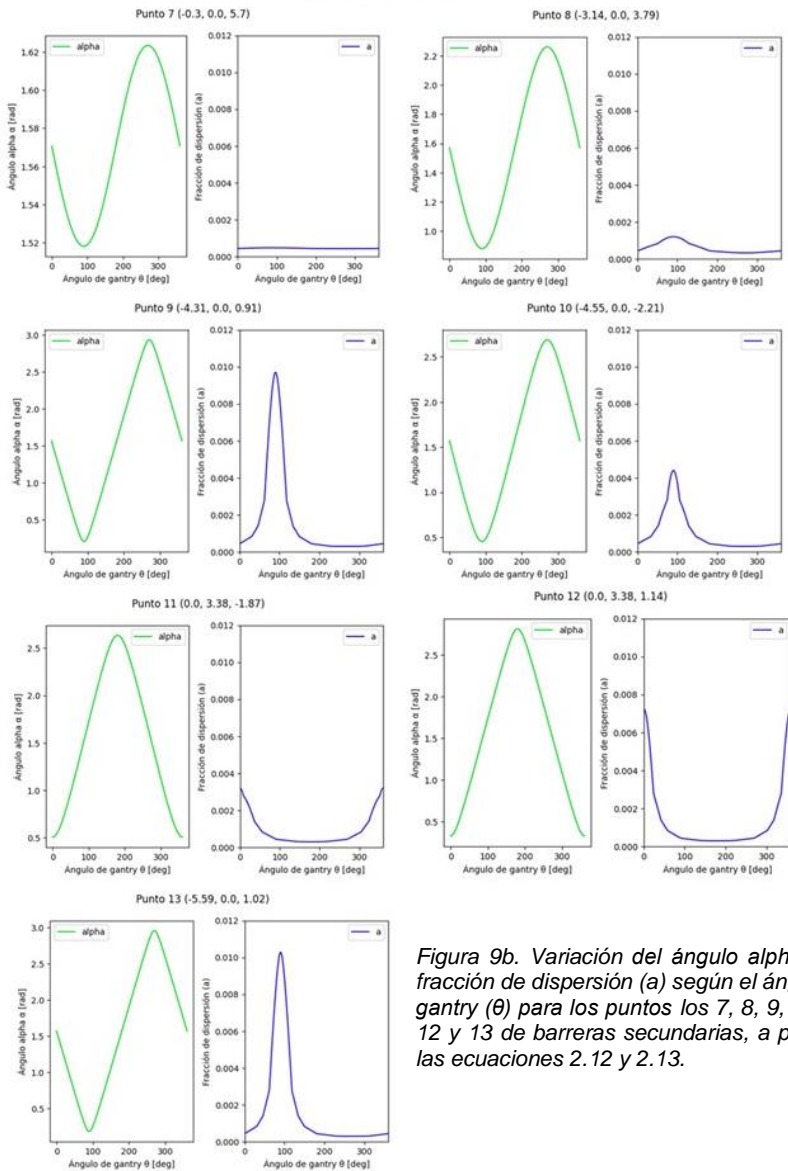


Figura 9b. Variación del ángulo α y fracción de dispersión (a) según el ángulo de gantry (θ) para los puntos los 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 de barreras secundarias, a partir de las ecuaciones 2.12 y 2.13.

Para el cálculo de fracción de dispersión (a) se obtuvieron, a través de AutoCAD, las coordenadas x, y, z para cada punto de barrera secundaria en el plano. Posteriormente, la fracción de dispersión (a) se obtuvo, evaluando las coordenadas para cada punto en el código programado en Colab de Google (Figura 6). Las coordenadas para cada punto y el valor de fracción de dispersión (a) obtenido se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Coordenadas x, y, z de los puntos a evaluar y fracción de dispersión (a).

Punto	x [m]	y [m]	z [m]	a
1	-0,01	0,00	-5,05	4,26E-04
2	-4,98	0,00	-2,30	1,04E-03
3	4,98	0,00	2,88	5,17E-04
4	4,98	0,00	3,99	5,04E-04
5	2,81	0,00	6,41	5,04E-04
6	1,91	0,00	6,41	4,81E-04
7	-0,30	0,00	5,70	4,36E-04
8	-3,14	0,00	3,79	5,87E-04
9	-4,31	0,00	0,91	1,63E-03
10	-4,55	0,00	-2,21	9,95E-04
11	0,00	3,38	-1,87	8,83E-04
12	0,00	3,38	1,14	1,33E-03
13	-5,59	0,00	1,02	1,70E-03

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el factor de transmisión (B_d) y dosis transmitida (H_d) debida a la radiación dispersa (Tabla 12).

Adicionalmente, se presenta la Tabla 13 y Tabla 14. La primera expresa la comparación entre los valores de H_s obtenidos con el cálculo propuesto, utilizando la fracción de dispersión calculada, y el valor H_s obtenido utilizando los valores del NCRP 151, mientras que la segunda expresa la comparación entre los valores de $H_{secundario}$, que corresponde a la suma de H_f y H_s , con el cálculo propuesto y con la metodología del NCRP 151.

Tabla 12. Valores de B_d y H_d [Sv/semana] para barrera secundaria.

Punto	B_d	H_d
1	2,88E-09	2,54E-11
2	1,45E-05	1,33E-06
3	3,68E-06	4,19E-08
4	1,62E-06	1,06E-08
5	2,79E-06	7,60E-08
6	1,49E-06	4,25E-08
7	8,76E-09	3,10E-10
8	3,69E-05	2,95E-07
9	1,08E-04	1,20E-06
10	2,69E-05	1,38E-07
11	3,98E-04	1,55E-06
12	7,35E-04	8,86E-08
12.1	1,87E-02	
13	1,14E-04	2,54E-11

Tabla 13. Comparación de a y H [Sv/semana] obtenidos con el cálculo propuesto y con la metodología convencional del NCRP 151.

Punto	a	a_{NCRP}	H_s	$H_s NCRP$
1	4,26E-04	4,26E-04	2,54E-11	2,54E-11
2	1,04E-03	4,83E-03	1,33E-06	6,15E-06
3	5,17E-04	2,77E-03	3,04E-08	1,63E-07
4	5,04E-04	1,97E-03	1,06E-08	4,14E-08
5	5,04E-04	7,40E-04	7,60E-08	1,12E-07
6	4,81E-04	6,46E-04	4,25E-08	5,71E-08
7	4,36E-04	4,66E-04	3,10E-10	3,32E-10
8	5,87E-04	1,19E-03	2,95E-07	5,99E-07
9	1,63E-03	9,74E-03	1,20E-06	7,19E-06
10	9,95E-04	4,43E-03	1,38E-07	6,15E-07
11	8,83E-04	3,25E-03	1,55E-06	5,72E-06
12	1,33E-03	5,26E-03	4,74E-06	1,88E-05
13	1,70E-03	1,03E-02	7,93E-07	4,81E-06

Tabla 14. Comparación de los valores de $H_{secundario}$ obtenidos con el cálculo propuesto para VMAT y con la metodología del NCRP 151 para barreras secundarias.

Punto	$H_{secundario} VMAT$	$H_{secundario} NCRP$
1	1,81E-07	1,88E-07
2	2,44E-06	7,24E-06
3	2,31E-07	3,61E-07
4	1,72E-07	2,02E-07
5	6,72E-06	6,85E-06
6	7,29E-06	7,44E-06
7	1,07E-06	1,10E-06
8	5,11E-06	5,46E-06
9	1,32E-06	7,30E-06
10	2,86E-07	7,59E-07
11	4,40E-06	8,46E-06
12	1,98E-07	4,55E-07
13	8,61E-07	4,88E-06

Comentado [NSAO(9)]: Cambiar de nombre para no confundir con cálculo de puerta

9.1.3. Cálculo de blindaje

Para obtener las diferencias de blindaje se requiere calcular el blindaje necesario para las condiciones en que opera en acelerador y comparar estos valores con el blindaje que existe actualmente. Para ello, se siguió el mismo orden que en los apartados anteriores, comenzando por barreras primarias. Se utilizaron las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3, para obtener, respectivamente la transmisión a través de la barrera, el número de TVL necesarios para esa barrera y, finalmente el valor del grosor t necesario de la barrera primaria en cada punto. Este procedimiento se realizó individualmente para la contribución de tratamientos 3D y VMAT, y a partir de los valores obtenidos (Tabla 15 y Tabla 16, respectivamente) se obtiene el espesor final necesario según la *Two Source Rule*. Posteriormente, se comparan los valores calculados con los existentes para determinar el espesor t a agregar, en caso de ser necesario. Los resultados de este cálculo se muestran en la Tabla 17.

Tabla 15. Valores necesarios barrera primaria según contribución de tratamientos 3D.

Punto	B_n	n	t_n [cm]
A	1,44E-05	4,84	164
B	1,24E-03	2,91	100
C	4,20E-04	3,38	115
B.1	4,73E-04	3,33	114
C.A	1,11E-03	2,95	102
C.B	3,24E-03	2,49	86

Tabla 16. Valores necesarios barrera primaria según contribución de tratamiento VMAT.

Punto	B_n	n	t_n [cm]
A	1,48E-05	4,83	163
B	1,26E-03	2,90	100
C	4,20E-04	3,38	115
B.1	5,08E-04	3,29	113
C.A	1,20E-03	2,92	100
C.B	3,71E-03	2,43	84

Tabla 17. Determinación de grosor necesario para barreras primarias según la Regla de Dos Fuentes o Two Source Rule.

Punto	$t_n(3D - VMAT)$ [cm]	$t_{existente}$ [cm]	t_n final [cm]	t_n agregar [cm]
A	0,45	205,0	175	0,00
B	0,24	138,0	111	0,00
C	1,29	165,0	128	0,00
B.1	1,02	138,0	125	0,00
C.A	0,43	165,0	113	0,00
C.B	1,50	165,0	97	0,00

En el caso de barreras secundarias, se obtuvo la transmisión de radiación dispersa y de fuga, respectivamente, así como también el número de *TVLs* y el espesor necesario (Tabla 18 y

Cabe destacar que, para calcular el espesor para radiación de fuga y radiación dispersa en el caso del punto 12 que cuenta un blindaje compuesto entre concreto y acero, se consideró el caso en que el componente de acero se mantiene invariable, de modo que el espesor calculado corresponde al grosor *t* necesario solamente de concreto.

Tabla 19, respectivamente) y, a partir de ello, se calculó un grosor final para barrera secundaria según la Regla de Dos Fuentes (Tabla 19).

Tabla 18. Valores necesarios para barrera secundaria según el componente de radiación dispersa.

Punto	B_n	n	t_d [cm]
1	2,26E-03	2,65	45
2	1,09E-03	2,96	87
3	2,42E-03	2,62	68
4	3,05E-03	2,52	61
5	3,67E-03	2,44	49
6	3,51E-03	2,45	47
7	2,82E-03	2,55	44
8	1,25E-02	1,90	43
9	8,99E-03	2,05	71
10	1,95E-02	1,71	49
11	5,12E-03	2,29	62
12	3,10E-03	2,51	23
13	2,88E-03	2,54	89

Cabe destacar que, para calcular el espesor para radiación de fuga y radiación dispersa en el caso del punto 12 que cuenta un blindaje compuesto entre concreto y acero, se consideró el caso en que el componente de acero se mantiene invariable, de modo que el espesor calculado corresponde al grosor t necesario solamente de concreto.

Tabla 19. Valores necesarios de barrera secundaria según componente de radiación de fuga.

Punto	B_n	n	t_f [cm]
1	1,62E-03	2,79	86
2	1,79E-03	2,75	85
3	1,99E-03	2,70	83
4	2,47E-03	2,61	81
5	3,03E-03	2,52	78
6	2,78E-03	2,56	79
7	2,04E-03	2,69	83
8	1,19E-02	1,92	61
9	2,25E-02	1,65	53
10	3,05E-02	1,52	49
11	7,04E-03	2,15	67
12	6,33E-03	2,20	26
13	7,63E-03	2,12	66

Tabla 20. Determinación de grosor necesario para barreras secundarias según la Regla de Dos Fuentes o Two Source Rule.

Punto	$t_d - t_f$ [cm]	t_{final} [cm]	$t_{existente}$ [cm]	t_a [cm]
1	41	86	145,2	0

2	2	97	141,3	0
3	15	94	141,3	0
4	19	91	141,3	0
5	29	88	112,2	0
6	32	89	112,2	0
7	39	83	140,2	0
8	18	71	99	0
9	18	81	138	0
10	0	59	131	0
11	5	78	92	0
12	3	29	92	0
13	23	99	138	0

9.1.3.1. Cálculo de puerta y laberinto del bunker

a. Dosis equivalente semanal debida a la dispersión del haz primario desde las superficies del bunker (H_S).

Este cálculo se realizó según la ecuación 1.7, para lo cual se utilizaron los valores de W_T (ecuación 2.2) y U se asumió como 0.25 según recomendación del NCRP 151 (10). Para α_0 se consideró el ángulo de reflexión de $73,9^\circ$, que corresponde al ángulo entre el isocentro, A_0 y A_z , y, en base a este valor, se obtuvo α_0 realizando una interpolación lineal en Excel con los valores de la tabla B.8a del NCRP 151 (Anexo 5) y α_z se asumió como 0,5 MeV, por recomendación del NCRP 151. Para A_0 , se consideró la proyección del haz primario hacia la barrera, tomando en cuenta la naturaleza divergente del mismo. Este último valor, junto con los factores restantes (A_z, d_h, d_r, d_z) de la ecuación 1.8 se obtuvieron directamente desde el plano del bunker en AutoCAD y se expresan en la Tabla 18.

Tabla 21. Factores para el cálculo de H_S .

α_0 [rad]	A_0 [m ²]	α_z	A_z [m ²]	d_h [m]	d_r [m]	d_z [m]
2,80E-03	2,10	7,92E-03	8,29	3,65	4,99	3,36

De esta forma, el valor obtenido de H_S fue $1,72 \cdot 10^{-5}$ Sv/semana. Por último, se sumaron todos los componentes según la ecuación 1.12 para calcular la dosis en la puerta del laberinto del

Comentado [NSAO(10)]: REVISAR: Hay que considerar un solo U 80,25 yo creo) y el W total

Comentado [NSAO(11R10)]: Cambiar n° tabla

bunker CLINAC 02. Cada componente de dosis equivalente semanas, así como el valor de dosis equivalente semanal total (H_{tot}) en la puerta del bunker se muestran a continuación en la Tabla 23.

Tabla 23.

b. Dosis equivalente semanal debida a la radiación de fuga en la puerta del laberinto (H_{LS}).

Para calcular H_{LS} (ecuación 1.9), se consideró 10^{-3} para L_f , ya que la radiación de fuga se asume como 0,1% del haz primario (10) y W_L corresponde al valor calculado en el apartado d con la ecuación 2.2. El valor de α_1 se obtuvo directamente de la tabla B.8b del NCRP 151 (Anexo 6), considerando un ángulo de incidencia de 45° en el área A_1 de la pared G y un ángulo reflexión de 0° medido desde la normal, A_1 se obtuvo desde AutoCAD junto con los valores de d_{sec} y d_{zz} (Tabla 22). Así, se obtuvo el valor aproximado de $1,89 \cdot 10^{-5}$ Sv/semana para H_{LS} (Tabla 23).

Tabla 22. Factores para el cálculo de H_{LS} .

α_1	A_1 [m ²]	d_{sec} [m]	d_{zz} [m]
6,40E-03	8,36	5,34	6,38

c. Dosis equivalente semanal debida a la radiación dispersa por el paciente (H_{PS}).

Se calculó a partir de la ecuación 1.10, donde varios factores son los mismos que en los cálculos de H_S y H_{LS} . Para obtener el valor de $\alpha(\theta)$ se consideró el ángulo $53,86^\circ$ y se realizó una interpolación lineal en Excel de la tabla B.4 del NCRP 151 (Anexo 3), obteniendo el valor de $1,06 \cdot 10^{-3}$. Por otra parte, para α_2 se consideró la energía de 0,5 MeV por recomendación del NCRP 251 y se asumió un ángulo de incidencia de la radiación en 45° y ángulo de dispersión de 0° , por ende, el valor para este factor fue obtenido directamente desde la tabla B.8b del NCRP 151 (Anexo 6). Por último, d_{sca} fue considerado como 1 m y los factores restantes fueron los mismos utilizados en los cálculos anteriores. El valor resultante de H_{PS} se muestra en la Tabla 22.

d. Dosis equivalente semanal debida a la radiación de fuga transmitida al interior del laberinto (H_{LT}).

Se obtuvo a partir de la ecuación 1.11, donde B se consideró como la transmisión calculada para el punto 8 (

Comentado [DZCC(12)]: NCRP

Comentado [NSAO(13)]: REVISAR también

Tabla 8) para la pared interna del laberinto (Z'), que toma un valor de $5,74 \cdot 10^{-4}$ y d_L corresponde a la distancia desde el isocentro hasta un punto en la puerta del bunker y se determinó como 4,86 m.

Por último, se sumaron todos los componentes según la ecuación 1.12 para calcular la dosis en la puerta del laberinto del bunker CLINAC 02. Cada componente de dosis equivalente semanas, así como el valor de dosis equivalente semanal total (H_{tot}) en la puerta del bunker se muestran a continuación en la Tabla 23.

Tabla 23. Resumen de las dosis equivalentes semanales [Sv/semana] para el cálculo de puerta y laberinto.

H_S	H_{LS}	H_{PS}	H_{LT}	H_G	H_{tot}
7,09E-06	7,86E-06	4,60E-06	4,01E-06	1,82E-05	4,82E-05

Cabe destacar que, H_G es el resultado obtenido de la suma de cada componente de dosis para la pared G' , sin embargo, para calcular el H_{tot} se utilizó la ecuación 1.13.

En cuanto a la puerta del bunker, se determinó la transmisión para el cálculo de grosor necesario (t) dividiendo el valor de P para áreas controladas en H_{tot} , y luego, con las ecuaciones 1.2 y 1.3 se calculó el espesor necesario. Cabe destacar que, la puerta es de Plomo, por ende, los TVL utilizados fueron los propuestos por Martin (23). De la misma manera, se obtuvo el espesor (t) necesario de concreto para la barrera del laberinto, pero desde la transmisión de radiación de fuga. Los resultados de este procedimiento se expresan en la Tabla 24.

Tabla 24. Espesor necesario t para puerta y laberinto.

	Puerta	Laberinto
B	0,99	1,15E-02
n	0	1,94
t [cm]	0	61,22

9.1.4. Cuantificación de la carga de trabajo (W) adicional

Para determinar la carga de trabajo W adicional que se puede alcanzar se calcularon los porcentajes de dosis equivalente transmitida para barreras primarias y secundarias, respecto de los valores de P para cada punto. Para barreras primarias, se sumó la contribución de dosis transmitida de tratamientos VMAT y 3D para obtener la dosis transmitida total ($H_p total$), y este valor fue comparado con el objetivo de diseño de blindaje (P), de modo que la razón entre ambos multiplicada por 100 entregue a qué porcentaje de P corresponde al valor calculado de dosis transmitida H (Tabla 25). Para este cálculo, P se asignó como 0,1 mSv/semana para el punto B, pues corresponde a un área controlada, mientras que, para los otros puntos de áreas no controladas, se utilizó 0,02 mSv/semana.

Tabla 25. Suma de H_p VMAT y H_p 3D en [Sv/semana] para barreras primarias y porcentaje de la dosis transmitida total respecto de P .

Punto	H_p VMAT	H_p 3D	H_p total	% respecto P
A	1,09E-06	1,13E-06	2,22E-06	11,1%
B	6,89E-06	7,00E-06	1,39E-05	13,9%
C	6,30E-07	6,29E-07	1,26E-06	6,3%
B.1	3,43E-06	3,68E-06	7,11E-06	35,5%
C.A	2,20E-07	2,38E-07	4,58E-07	2,3%
C.B	7,34E-08	8,39E-08	1,57E-07	0,8%

Para barreras secundarias, se sumó la contribución de los componentes de fuga y de radiación dispersa ($H_f + H_s$) y respecto de esta suma se calculó el porcentaje respecto de P , como se ve a continuación en la Tabla 26. Al igual que en el caso de barreras primarias, los valores de P varían para cada punto según si este corresponde a una zona controlada o no controlada (Tabla 2).

Tabla 26. Suma de H_f y H_d en [Sv/semana] para barreras secundarias y porcentaje de la dosis transmitida respecto de P .

Punto	$H_f + H_d$	% respecto a P
1	1,81E-07	0,91%
2	2,44E-06	2,44%
3	2,31E-07	1,16%
4	1,72E-07	0,86%
5	6,72E-06	6,72%
6	7,29E-06	7,29%
7	1,07E-06	1,07%
8	5,11E-06	5,11%
9	1,32E-06	1,32%
10	2,86E-07	0,29%
11	4,40E-06	21,98%
12	1,98E-07	0,99%
13	8,61E-07	4,31%

Finalmente, la carga de trabajo W adicional que puede alcanzar el acelerador Infinity manteniendo los objetivos de blindaje, se determinó a partir de valores de dosis equivalente transmitida (H) calculados en el apartado 9.1.3 (Tabla 25 y Tabla 26), pues esta última se relaciona de forma directamente proporcional con la carga de trabajo. Los valores de H se compararon con el valor de objetivo de diseño de blindaje P correspondiente, y la carga de trabajo adicional fue determinada según la diferencia porcentual con respecto a un total, donde el total o 100% corresponde a el valor de P . El resultado de esta operación da cuenta de la proporción en la que se puede aumentar la carga de trabajo (W) según cada punto. Los resultados se expresan en la Tabla 27.

Tabla 27. Porcentaje de carga de trabajo (W) en [Gy/semana] que se puede aumentar a partir de la dosis equivalente transmitida H [Sv/semana] y el objetivo de diseño de blindaje P [Sv/semana] del NCRP 151.

Punto	H	P	% H respecto de P	% ΔW
A	2,22E-06	2,0E-05	11,1%	88,9%
B	1,39E-05	1,0E-04	13,9%	86,1%
C	1,26E-06	2,0E-05	6,3%	93,7%
B.1	7,11E-06	2,0E-05	35,5%	64,5%
C.A	4,58E-07	2,0E-05	2,3%	97,7%
C.B	1,53E-07	2,0E-05	0,8%	99,2%
1	1,81E-07	2,0E-05	0,9%	99,1%
2	3,47E-06	1,0E-04	3,5%	96,5%
3	3,10E-07	2,0E-05	1,5%	98,5%
4	2,01E-07	2,0E-05	1,0%	99,0%
5	6,93E-06	1,0E-04	6,9%	93,1%
6	7,41E-06	1,0E-04	7,4%	92,6%
7	1,07E-06	1,0E-04	1,1%	99,0%
8	5,75E-06	1,0E-04	5,7%	94,3%
9	1,48E-06	1,0E-04	1,5%	98,5%
10	4,05E-07	1,0E-04	0,4%	99,6%
11	2,26E-06	2,0E-05	11,3%	88,7%
12	8,76E-08	2,0E-05	0,4%	99,6%
13	9,34E-07	2,0E-05	4,7%	95,3%

10. DISCUSIÓN

10.1. Cuantificación de la carga de trabajo (W)

La carga de trabajo en el acelerador Infinity fue determinada a partir de datos clínicos de los tratamientos realizados en el mismo. Para un año de tratamiento en el acelerador se registró una carga de trabajo total de 660,970 Gy/semana, donde aproximadamente el 70% de este valor corresponde a los tratamientos VMAT, mientras que el 30% restante es debido a tratamiento 3D. El valor obtenido fue menor a la carga de trabajo W con la que se autorizó la instalación del equipo, que corresponde a 994 Gy/semana, no obstante, es importante considerar varios aspectos previo a comparar estos valores. En primer lugar, el valor de W para autorización de instalación del equipo consideró técnicas de tratamiento VMAT y SRS/SBRT, así también, en el cálculo fue incluida la carga de trabajo asociada a los controles de calidad paciente específico. En cambio, la W calculada en el presente estudio solo consideró la carga de trabajo clínica, es decir, la asociada a administración de tratamiento a pacientes, y se consideraron dos modalidades de tratamiento: VMAT y 3D, que son las que actualmente se están implementando en el acelerador Infinity. En segundo lugar, el cálculo de W para instalación, además de ser realizado de forma prospectiva, se realizó con una metodología conservadora, siguiendo los parámetros de seguridad del NCRP 151, no así en el presente estudio, donde se buscó cuantificar la carga de trabajo (W) principal de una forma realista y acorde a los datos que demuestran la operación actual del acelerador, lo cual explica el menor valor en comparación con la W autorizada (24).

Por otra parte, Mechalakos et al demuestra en su estudio que la carga de trabajo típica para un acelerador de 6 MV es de 450 Gy/semana, lo que difiere del resultado obtenido para el acelerador Infinity, siendo este último mayor (25). Sin embargo, en estudios más recientes donde se estudia la carga de trabajo para aceleradores que realizan exclusivamente tratamientos VMAT se consiguen resultados similares e incluso mayores a los recabados en este estudio (22). Por ende, la diferencia entre el valor típico determinado por Mechalakos et al (25) y la calculada en el presente estudio podría explicarse por el aumento de técnicas de intensidad modulada, tanto IMRT como VMAT.

Luego, la carga de trabajo de fuga (W_f) resultó en un valor de 1640,52 Gy/semana, considerado un factor VMAT (C_i) de 3,11 calculado a partir del promedio entre las unidades

monitor (UM) y la dosis por fracción para cada tratamiento. El valor de factor VMAT obtenido en este estudio es menor al resultado de Saleh et al (4,7), sin embargo, es similar a los valores obtenidos por Dieguez, quien calculó un factor VMAT de 3,32 (12)(22). Además, es importante mencionar, que el valor calculado en este estudio se encuentra entre 2 y 10, que es el rango de valores que debe adoptar el factor de modulación según recomendación del NCRP 151 (10).

Sumado a lo anterior, cabe destacar que los valores resultantes en este estudio de W_f y factor VMAT fueron significativamente menores a los utilizados en la memoria de cálculo para autorización de instalación del equipo (4971 Gy/semana y 5,0, respectivamente). Esta diferencia se debe fundamentalmente a la utilización de datos clínicos reales acerca del funcionamiento del equipo, no así en el caso de la memoria de cálculo para la autorización, donde primó un cálculo conservador con base en la sobreestimación de valores, ciñéndose a las medidas de seguridad del NCRP 151.

10.2. Evaluación del blindaje

10.2.1. Evaluación de barrera primaria

Para la evaluación de barreras primarias se calculó la dosis equivalente transmitida (H), que da cuenta de la radiación que atraviesa la barrera de blindaje. Este valor fue calculado por separado entre tratamientos VMAT y 3D debido al cálculo propuesto en base a la literatura para determinar el factor de uso (U) para tratamientos VMAT. Los valores de factor de uso (U) considerando el giro de gantry fueron significativamente menores que el valor recomendado por el NCRP 151, como se muestra en la Tabla 7. Aún con esta diferencia, los valores de dosis equivalente transmitida (H) en cada punto de barrera primaria fue más bien similar entre los dos tipos de tratamiento, probablemente debido a que la proporción de tratamientos VMAT era significativamente mayor que los 3D, lo que genera que la contribución de dosis debida a tratamientos VMAT sea una gran cifra, aun cuando el factor de uso utilizado es significativamente menor al de tratamientos 3D.

Ahora bien, si para calcular H debida a tratamientos VMAT se siguiera la recomendación del NCRP 151 de utilizar un factor de uso de 0,25, como lo que se hizo en tratamientos 3D, la dosis equivalente transmitida aumentaría, por ende, aplicar esa recomendación resulta en una sobreestimación de los cálculos para VMAT, lo que se aprecia en la Tabla 7.

Luego, los resultados adquiridos de H son comparados con los valores de objetivo de diseño de blindaje (P), con el fin de verificar que la dosis según las condiciones de operación no supere los límites de dosis establecidos. En ambos casos, VMAT y 3D, las dosis equivalentes calculadas para cada punto resultaron en valores menores que P , lo que asegura que estos se encuentran dentro de los valores recomendados.

10.2.2. Evaluación de barrera secundaria

En cuanto a la evaluación de barreras secundarias, se realizó separando el componente de radiación de fuga y radiación dispersa a través de cálculos independientes. Para radiación de fuga, la diferencia con la metodología del NCRP 151 fue determinar d_L según lo propuesto por Baechler et al (21) y utilizarlo para el cálculo en lugar de d_{iso} . Sobre esto último, cabe recalcar que los valores de d_L calculados para cada punto no mostraron grandes diferencias respecto de d_{iso} , por ende, utilizar d_L en lugar de d_{iso} no tiene mayor implicancia en el resultado final dosis equivalente transmitida debida a radiación de fuga. La comparación entre ambos valores se puede apreciar en la Figura 9.

Por otra parte, para el caso de radiación dispersa se propuso calcular la fracción de dispersión (a) mediante la ecuación 2.13. En general, se observó una disminución de la fracción de dispersión para todos los ángulos, en comparación con los valores del NCRP 151, a excepción del punto 1 que presenta un ángulo de dispersión de 90° que resultó el mismo valor para ambos casos, con una cifra de $4,26 \cdot 10^{-4}$.

La comparación entre las fracciones de dispersión calculadas y las del NCRP 151 se pueden observar en la Figura 10. Ante esto, cabe destacar que se observa una tendencia en la cual los valores calculados de fracción de dispersión presentan mayores valores en los menores ángulos de dispersión, lo que es concordante con los valores del NCRP 151 y de la literatura (5).

Debido a estas diferencias, es posible notar que el cálculo de la fracción de dispersión tiene un gran impacto en los resultados de la dosis equivalente transmitida, de modo que los cálculos de esta con la fracción de dispersión calculada presentan valores inferiores a las que se calculan con las fracciones de dispersión del NCRP 151, excepto en el punto 1 donde las cifras son equivalentes.

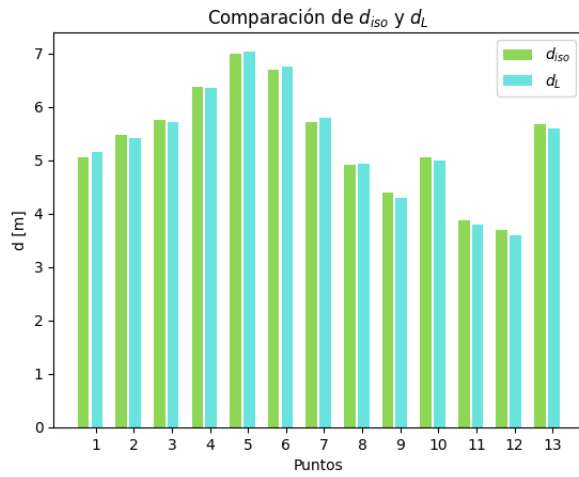


Figura 9. Comparación de las distancias d_{iso} (NCRP) y d_L (Baechler et al.).

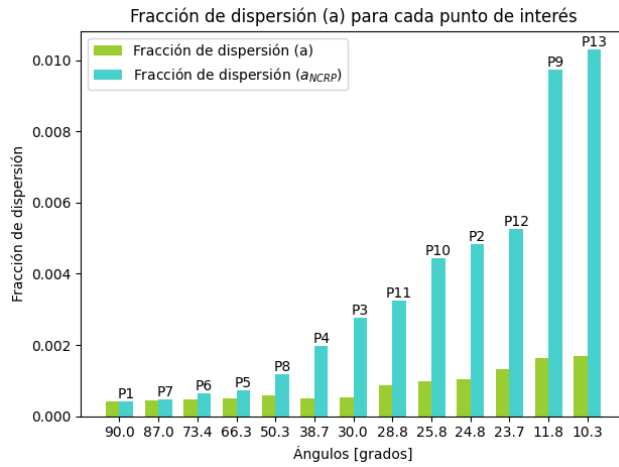


Figura 10. Comparación de fracciones de radiación dispersa calculada (a) y propuesta por el NCRP 151 $a(NCRP)$.

Ahora bien, al comparar los valores de dosis equivalente transmitida total para barreras secundarias (es decir, la suma entre H_f y H_s), se obtiene que, en todos los puntos, la dosis equivalente transmitida utilizando los factores calculados d_L y a es menor que los resultados empleando la metodología del NCRP 151, como se expresa en la Tabla 14. Esta diferencia se debe en gran medida al cálculo de fracción de dispersión, no así a la utilización de d_L .

Por lo tanto, seguir las recomendaciones del reporte No. 151 para realizar la evaluación de barreras secundarias de tratamientos VMAT sigue siendo una medida conservadora. No obstante, si se quisiera hacer cálculos más realistas, calcular la fracción de dispersión para el componente de radiación dispersa resulta útil para una estimación más precisa de la dosis.

Comentado [NSAO(14): Amé esto

10.3. Cálculo de blindaje

El cálculo del grosor necesario para barreras primarias se realizó de forma separada para tratamientos 3D y VMAT y se obtuvo el grosor final utilizando la Regla de Dos Fuentes, debido a la utilización de un factor de uso distinto para el componente VMAT. Sobre esto último, cabe mencionar que el valor de U calculado según lo propuesto por Kaur et al (20) es significativamente menor al que recomienda el NCRP 151 (Tabla 7), por ende, los valores de grosor para VMAT dieron similares a 3D, aun cuando la proporción de tratamientos VMAT era significativamente mayor. No obstante, al determinar el espesor final necesario para cada punto de barrera primaria, se obtuvo que el valor necesario fue inferior al existente, lo que indica que las barreras primarias actuales son suficientes para la utilización de técnicas VMAT, sin necesidad de agregar medidas adicionales de blindaje.

Para barreras secundarias el cálculo de blindaje se realizó siguiendo la metodología del NCRP 151 adaptada a las características VMAT utilizando el valor de d_L calculado para el componente de radiación de fuga, y el valor de fracción de dispersión a para radiación dispersa. Para calcular el espesor final de la barrera, primero se calculó el grosor necesario según cada componente, de esta operación se obtuvo que en la mayoría de los casos el espesor necesario era mayor para el componente de radiación de fuga, lo que se debe al aumento de la carga de trabajo de fuga (W) en técnicas VMAT en comparación con técnicas convencionales 3D (15). El espesor final se calculó a partir de la Regla de las Dos Fuentes, y se obtuvieron los valores finales expuestos en la

Tabla 20. Sobre ello, es importante destacar dos aspectos sobre el punto 12, en primer lugar, se calculó solamente el espesor necesario de concreto, de modo que este fuera comparable con el resto de los puntos y, en segundo lugar, grosor necesario de concreto calculado para el punto 12 es significativamente menor al del resto de los puntos, lo que se explica por el blindaje de acero adicional con el que cuenta este punto sobre la barrera existente de concreto.

Ahora bien, al comparar los espesores necesarios con los existentes, es posible evidenciar que el espesor existente en las barreras secundarias es mayor al calculado. Es decir, el blindaje actual en las barreras secundarias del bunker es suficiente para la realización de tratamientos VMAT y, por lo tanto, no es necesario agregar espesor adicional de concreto.

En cuanto a los resultados obtenidos para la puerta y el laberinto del bunker, se realizó con los pasos sugeridos por el NCRP 151, donde la única diferencia fue la utilización el factor de uso calculado para VMAT. Como resultado se obtuvo que el grosor necesario en la puerta y laberinto para las condiciones en las que opera el equipo actualmente es menor al que existe actualmente, por ende, no es necesario agregar espesor en ese componente de barreras secundarias para seguir operando de forma segura en términos de protección radiológica.

En resumen, los resultados recabados en el cálculo de blindaje, tanto para barreras primarias como secundarias, son concordantes con la evaluación realizada en la sección anterior. En consecuencia, ambos resultados dan cuenta de una suficiencia de blindaje en el bunker respecto de las condiciones de operación del acelerador Infinity, lo que confirma la posibilidad de aumentar la carga de trabajo en este equipo, aun manteniendo los objetivos de blindaje del NCRP 151.

10.4. Carga de trabajo (W) adicional

El porcentaje de H respecto de P da cuenta del cumplimiento de tolerancia de los límites de diseño establecidos si la cifra resultante es menor o igual a 100%. En el presente estudio, todos los puntos, tanto de barreras primarias y secundarias, resultaron dentro de la tolerancia, confirmando la posibilidad de aumentar la carga de trabajo para este acelerador al considerar de forma realista la realización de tratamientos VMAT, lo que es concordante con lo establecido en estudios previos (12). De esta forma, la proporción en la que se puede aumentar la carga de trabajo fue descrita por la diferencia porcentual del porcentaje entre H y P con

respecto al total, donde el total o 100% corresponde al valor de objetivo de diseño de blindaje P .

No obstante, cada punto de interés presenta una diferencia porcentual distinta, por ende, el punto con menor diferencia entre el H calculado y P indicaría la proporción equivalente hasta la cual se podría aumentar la carga de trabajo, pues, de esta forma, todos los puntos evaluados cumplirían con el objetivo de diseño de blindaje correspondiente. El punto B.1 de barrera primaria fue aquel con valor de diferencia porcentual, correspondiente a 64,5%. Dicho de otra forma, la carga de trabajo (W) en este acelerador se podría aumentar en una proporción igual o menor a dicho valor para que los niveles de dosis se mantengan dentro de los objetivos de blindaje establecidos por el NCRP 151 en el bunker CLINAC 02.

10.5. Limitaciones

Una de las principales limitaciones de este estudio radica en no haber realizado un levantamiento radiométrico en el bunker, con el fin de evaluar las condiciones del servicio en términos exposición ocupacional y del público, y así verificar que las condiciones se encuentren dentro de los objetivos del NCRP 151 y del marco regulatorio nacional. Las mediciones contempladas en el levantamiento radiométrico servirían como complemento a los cálculos realizados y debieran incluir no solo las mediciones convencionales aplicables para tratamientos 3D, es decir, en los cuatro ángulos (0° , 90° , 180° , 270°), sino además agregar mediciones que incorporen el giro de gantry, abarcando así la contribución debida a tratamientos VMAT, donde el ángulo de gantry varía continuamente. Al no haber incluido el levantamiento radiométrico en la metodología del estudio, se reconoce que este queda, en principio, incompleto. Por lo tanto, se recomienda que para estudios futuros de similar índole se considere la realización de un levantamiento radiométrico para complementar los cálculos realizados, garantizando así un análisis más preciso de las condiciones de operación del servicio.

Otra de las limitaciones fue no contar con los datos clínicos de un año completo de los tratamientos convencionales con técnica 3D. Para términos de este estudio, se consideró un año como 52 semanas, sin embargo, la información de la base de datos de tratamientos 3D solo contemplaba 41 semanas, de modo que los cálculos fueron realizados en base a ese valor. Dado que la carga de trabajo se determinó dividiendo la sumatoria de dosis en el número

de semanas, el resultado seguía siendo válido contemplando 41 semanas, sin embargo, se sugiere para estudios posteriores extrapolar los datos hasta el tiempo predeterminado, en caso de no contar con los datos suficientes.

Otra limitante se dio en los factores calculados para dar cuenta de las características propias de VMAT, específicamente en el factor de uso (U) y en la distancia promedio desde la fuente al punto de interés (d_L). En el primer caso, se utilizó lo propuesto por Kaur et al., lo que está descrito para un acelerador de Tomoterapia Helicoidal de 6 MV (20). Esta técnica implica que la fuente de radiación gire continuamente alrededor del paciente, acompañada del movimiento de la camilla, lo que, en principio, no es homologable a un acelerador en arco C, como el acelerador Infinity. Sin embargo, ambas técnicas presentan similitudes, por ejemplo, que el gantry tenga la capacidad de girar en 360° alrededor del paciente (11), lo que hace que la expresión propuesta por Kaur et al. sea aplicable en este caso.

Además, es importante mencionar que, debido al cálculo de este factor, fue necesario separar los tratamientos 3D y VMAT en la evaluación y cálculo de barreras primarias, aplicando el cálculo de U exclusivamente a los tratamientos VMAT. No obstante, en estudios de similar índole al presente, pero que consideren aceleradores cuyos tratamientos sean 100% con técnica VMAT, no sería necesario hacer esta diferencia e incluso, se podría determinar el factor de uso a partir la carga de trabajo entregada en intervalos angulares que describen el movimiento de gantry, como lo propuesto por Dieguez en su estudio (22).

Ahora, respecto de la distancia promedio desde la fuente al punto de interés (d_L). Esta se calculó a partir de lo propuesto por Baechler et al. (21). Esta ecuación permite calcular la distancia promedio entre la fuente que gira en 360° y el punto de interés, y fue diseñada para la corrección de la distancia en equipos de Tomoterapia. Sin embargo, la aplicación de esta ecuación se puede extender a equipos que realicen tratamientos VMAT, dado que, al igual que en el caso anterior, se comparte la característica de administrar el tratamiento con un giro de gantry de 360° .

11. CONCLUSIÓN

La carga de trabajo para un equipo de radioterapia corresponde a la dosis que es entregada al isocentro en un período de tiempo, generalmente una semana. Es estimada a partir de la

cantidad de dosis absorbida por paciente y del número de tratamientos realizados en una semana (10) (12).

El presente estudio pretendía demostrar que al realizar una evaluación y cálculo de blindaje que incluyera las características propias de tratamientos VMAT, los resultados darían origen a un aumento de la carga de trabajo en el acelerador Infinity del Instituto Nacional del Cáncer. Las consideraciones de VMAT incluidas en este estudio fueron calcular el factor de uso (U) para una fuente que gira alrededor de paciente para barreras primarias, considerar la distancia promedio desde la fuente hacia el punto de interés (d_L) en lugar de d_{iso} y calcular la fracción de dispersión (α) para barreras secundarias. Sobre esto es importante destacar que, si bien en este estudio los cálculos fueron realizados para un acelerador Infinity de Elekta, estos son aplicables para cualquier acelerador que realice tratamientos VMAT.

De los tres factores considerados, tanto el factor de uso como la fracción de dispersión demostraron un gran impacto en los cálculos, disminuyendo la dosis transmitida y los espesores de barreras respecto de lo que se obtiene siguiendo estrictamente la metodología del NCRP 151, por lo que debieran ser considerados al momento de realizar evaluación y cálculo de blindaje para instalaciones que realicen tratamientos VMAT. No fue así en el caso de la distancia promedio desde la fuente al punto de interés (d_L), donde su consideración es más bien opcional, pues no influye significativamente en los resultados

Sumado a lo anterior, se obtuvo que todos los puntos evaluados del bunker CLINAC 02 cumplen con la tolerancia en términos de dosis y espesor de blindaje. En consecuencia, se consiguieron resultados favorables respecto de la carga de trabajo, pudiendo aumentarse en una proporción hasta 64,5%, aun cumpliendo con estándares de seguridad del blindaje de la instalación. Esto toma relevancia pues, en términos prácticos, confirma la posibilidad de poder incrementar la cantidad de pacientes tratados en una semana en una proporción equivalente a la calculada en el acelerador Infinity del Instituto Nacional del Cáncer, aun manteniendo los objetivos de blindaje establecidos por el NCRP 151.

En conclusión, la distinción de este estudio fue considerar características propias de tratamientos VMAT en el cálculo de blindaje, donde se obtuvo que tanto el factor de uso (U) como la fracción de dispersión (α) tienen una influencia importante en los cálculos. Esta metodología permitió obtener resultados más precisos en cuanto a utilización de técnica



VMAT, lo que permite establecer un aumento en la carga de trabajo a partir de las diferencias entre lo calculado y los objetivos establecidos por el NCRP 151. En consecuencia, el producto del presente estudio resulta en un gran aporte no solo para el Instituto Nacional del Cáncer, sino también para todos los centros donde se realicen tratamientos VMAT y se quiere llevar a cabo una evaluación de blindaje, pues la metodología propuesta es aplicable para cualquier acelerador que emplee esta modalidad y supone resultados similares a los obtenidos en este estudio.

12. BIBLIOGRAFÍA

1. Gianfaldoni S, Gianfaldoni R, Wollina U, Lotti J, Tchernev G, Lotti T. An overview on radiotherapy: from its history to its current applications in dermatology. *Open Access Maced J Med Sci.* 2017;5(4):521.
2. Malicki J, Przybylska K, Godet JL, Valéro M, Prieto C, Delgado JM, et al. Radiation Protection N ° 181 General guidelines on risk management in external beam radiotherapy. En 2015.
3. National Council on Radiation Protection and Measurements. Report No 144: Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities. 144. Oxford University Press; 2003.
4. International Commission on Radiological (ICRP). Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. ICRP. 2007;37(6):1–64.
5. Institute of Physics and Engineering in Medicine. Design and Shielding of Radiotherapy Treatment Facilities IPEM Report 75, 2nd Edition. 2017.
6. International Atomic Energy Agency. Safety Reports Series No.47: Report Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities [Internet]. Safety Reports Series. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; 2006. Disponible en: <https://www.iaea.org/publications/7197/radiation-protection-in-the-design-of-radiotherapy-facilities>
7. Ministerio de Salud. Decreto Supremo 133: Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines. Chile: BCN Ley Chile; ago 23, 1984.
8. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Ministerio de Energía. Norma de Seguridad 04.0: Requerimientos para la Autorización de Operación de Instalaciones de Teleterapia con Aceleradores de Partículas. NS 04.0 Chile: Ministerio de Energía; may, 2018.

9. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Norma de Seguridad 02.0: Criterios Básicos de Protección Radiológica. 2.0 Chile; may, 2018.
10. National Council on Radiation Protection & Measurements (NCRP). Report No 151: Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities. 31 de diciembre de 2005;
11. Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med Phys* [Internet]. 1 de enero de 2008;35(1):310–7. Disponible en: <https://doi.org/10.1118/1.2818738>
12. Saleh ZH, Jeong J, Quinn B, Mechalakos J, St. Germain J, Dauer LT. Results of a 10-year survey of workload for 10 treatment vaults at a high-throughput comprehensive cancer center. *J Appl Clin Med Phys* [Internet]. 1 de mayo de 2017;18(3):207–14. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/acm2.12076>
13. Cho B. Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective. *Radiat Oncol J* [Internet]. 2018;36(1):1–10. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3857/roj.2018.00122>
14. Herman TDLF, Schnell E, Young J, Hildebrand K, Algan O, Syzek E, et al. Dosimetric comparison between IMRT delivery modes: Step-and-shoot, sliding window, and volumetric modulated arc therapy - for whole pelvis radiation therapy of intermediate-to-high risk prostate adenocarcinoma. *J Med Phys* [Internet]. 2013;38(4):165–72. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4103/0971-6203.121193>
15. Teoh M, Clark CH, Wood K, Whitaker S, Nisbet A. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice. *Br J Radiol* [Internet]. 1 de noviembre de 2011;84(1007):967–96. Disponible en: <https://doi.org/10.1259/bjr/22373346>
16. C X Yu. Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative to tomotherapy. *Phys Med Biol* [Internet]. 1995;40(9):1435. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/40/9/004>

17. Elekta AB. Elekta Infinity TM Brochure. Stockholm; 2019.
18. Radiology Oncology Systems. Elekta Linear Accelerators* Comparison Chart [Internet]. 2021 [citado 7 de junio de 2023]. Disponible en: <https://www.oncologysystems.com/resources/linear-accelerator-guides/elekta-linear-accelerators-comparison-chart>
19. Rodgers JE. Radiation therapy vault shielding calculational methods when IMRT and TBI procedures contribute. J Appl Clin Med Phys [Internet]. 2001;2(3):157–64. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11602012>
20. Kaur A, Pawaskar PN, Sahani G. Radiation Shielding for Helical Tomotherapy Vault Design. J Med Phys [Internet]. 2019;44(1):57–64. Disponible en: http://dx.doi.org/10.4103/jmp.JMP_93_18
21. Baechler S, Bochud FO, Verellen D, Moeckli R. Shielding requirements in helical tomotherapy. Phys Med Biol [Internet]. 2007;52(16):5057–67. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/52/16/023>
22. Dieguez AL. Structural Shielding Considerations for VMAT. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College ; 2021.
23. Martin M. Shielding Design Methods for Linear Accelerators [Internet]. 51. California; 2009 [citado 8 de junio de 2023]. Disponible en: <https://www.aapm.org/meetings/amos2/pdf/42-11997-3239-469.pdf>
24. Mancilla C, Floriano A, Castro H, Salgado A, Ayala F, Ferreira A. Revisión de Blindaje Existente de BUNKER CLINAC 02. Santiago, Chile: Instituto Nacional del Cáncer; 2020.
25. Mechalakos JG, Germain J St., Burman CM. Results of a one year survey of output for linear accelerators using IMRT and non-IMRT techniques. J Appl Clin Med Phys [Internet]. 1 de diciembre de 2004;5(1):64–72. Disponible en: <https://doi.org/10.1120/jacmp.v5i1.1960>

13. ANEXOS

Anexo 1. Tabla B.2 del NCRP 151: TVL de Barrera Primaria para concreto ordinario, acero y plomo (valores sugeridos en centímetro).

TABLE B.2—Primary-barrier TVLs for ordinary concrete (2.35 g cm^{-3}), steel (7.87 g cm^{-3}), and lead (11.35 g cm^{-3}) (suggested values in centimeters).^a

Endpoint Energy (MV) ^b	Material	TVL ₁ (cm)	TVL ₀ (cm)
4	Concrete	35	30
	Steel	9.9	9.9
	Lead	5.7	5.7
6	Concrete	37	33
	Steel	10	10
	Lead	5.7	5.7
10	Concrete	41	37
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
15	Concrete	44	41
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
18	Concrete	45	43
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
20	Concrete	46	44
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
25	Concrete	49	46
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
30	Concrete	51	49
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
Co-60	Concrete	21	21
	Steel	7.0	7.0
	Lead	4.0	4.0

^aConcrete values are based on a conservatively safe adaptation from Nelson and LaRiviere (1984) with extrapolation to 4 MV, and use of Kirn and Kennedy (1954) for 30 MV. Lead and steel TVLs are conservatively safe values adapted from NCRP Report No. 49 (NCRP, 1976) and Wachsmann and Drexler (1975).

^bEndpoint energy based on values from Cohen (1972).

Anexo 2. Tabla B.7 del NCRP 151: TVLs para radiación de fuga en concreto ordinario (valores sugeridos en centímetros).

TABLE B.7—TVLs for leakage radiation in ordinary concrete (suggested values in centimeters).^a

Endpoint Energy (MV) ^b	TVL ₁ (cm)	TVL _e (cm)
4	33	28
6	34	29
10	35	31
15	36	33
18	36	34
20	36	34
25	37	35
30	37	36
Co-60	21	21

^aData for TVL₁ and TVL₂ are based on a conservatively safe adaptation of the 90 degrees (80 to 100 degrees) values of Nelson and LaRiviere (1984) and graphical extrapolations to 4 MV and 30 MV. NCRP Report No. 49 (NCRP, 1976) values used for ⁶⁰Co.

^bEndpoint energy based on values from Cohen (1972).

Anexo 3. Tabla B.4 del NCRP 151: Fracción de dispersión (a) a 1 [m] desde un fantoma de tamaño humano, distancia blanco – fantoma de 1 [m] y tamaño de campo de 400 cm².

TABLE B.4—Scatter fractions (a) at 1 m from a human-size phantom, target-to-phantom distance of 1 m, and field size of 400 cm² (McGinley, 2002; Taylor et al., 1999).

Angle (degrees)	Scatter Fraction (a)			
	6 MV	10 MV	18 MV	24 MV
10	1.04×10^{-2}	1.66×10^{-2}	1.42×10^{-2}	1.78×10^{-2}
20	6.73×10^{-3}	5.79×10^{-3}	5.39×10^{-3}	6.32×10^{-3}
30	2.77×10^{-3}	3.18×10^{-3}	2.53×10^{-3}	2.74×10^{-3}
45	1.39×10^{-3}	1.35×10^{-3}	8.64×10^{-4}	8.30×10^{-4}
60	8.24×10^{-4}	7.46×10^{-4}	4.24×10^{-4}	3.86×10^{-4}
90	4.26×10^{-4}	3.81×10^{-4}	1.89×10^{-4}	1.74×10^{-4}
135	3.00×10^{-4}	3.02×10^{-4}	1.24×10^{-4}	1.20×10^{-4}
150	2.87×10^{-4}	2.74×10^{-4}	1.20×10^{-4}	1.13×10^{-4}

Anexo 4. Tabla B.5a del NCRP 151: TVLs en concreto para radiación dispersa desde el paciente para varios ángulos de dispersión.

TABLE B.5a—TVLs in concrete (centimeters) for patient-scattered radiation at various scatter angles, based on Figures 10 and 15 in NCRP Report No. 49 (NCRP, 1976). Values are valid for shielding design purposes and are conservatively safe in nature.^a

Scatter Angle (degrees)	TVL (cm)							
	Co-60	4 MV	6 MV	10 MV	15 MV	18 MV	20 MV	24 MV
15	22	30	34	39	42	44	46	49
30	21	25	26	28	31	32	33	36
45	20	22	23	25	26	27	27	29
60	19	21	21	22	23	23	24	24
90	15	17	17	18	18	19	19	19
135	13	14	15	15	15	15	15	16

^aValues derived from NCRP (1976) for ⁶⁰Co and 6 MV, and from Abrath et al. (1983) for 18 MV. Extrapolation to 24 MV was accomplished by comparison to primary TVLs.

Anexo 5. Tabla B.8a del NCRP 151: Coeficiente de reflexión en concreto en 0° respecto a la normal.

TABLE B.8a—Differential dose albedo (wall-reflection coefficient). Multiply each table entry by 10^{-3} (e.g., the entry 3.4 means 3.4×10^{-3}). Normal incidence on ordinary concrete, for bremsstrahlung and monoenergetic photons.^a

0 Degree Incidence	Angle of Reflection or Scatter (degrees) from Concrete (measured from the normal)				
	Source	0	30	45	60
30 MV	3.0	2.7	2.6	2.2	1.5
24 MV	3.2	3.2	2.8	2.3	1.5
18 MV	3.4	3.4	3.0	2.5	1.6
10 MV	4.3	4.1	3.8	3.1	2.1
6 MV	5.3	5.2	4.7	4.0	2.7
4 MV	6.7	6.4	5.8	4.9	3.1
Co-60	7.0	6.5	6.0	5.5	3.8
0.5 MeV	19.0	17.0	15.0	13.0	8.0
0.25 MeV	32.0	28.0	25.0	22.0	13.0

^aTable values are based on evaluation of the data from the following sources: Figures 49 and 50b in IAEA (1979), Lo (1992), and Figure 4.14(b) in NCRP (2003). The available data in the references noted were put on a common graph and conservatively safe values were selected. However, there are large uncertainties (on the order of $\pm 50\%$) in albedo values due to both the calculations and the interpolations.

Anexo 6. Tabla B.8b del NCRP 151: Coeficiente de reflexión en concreto en 45° respecto a la normal.

TABLE B.8b—Differential dose albedo (wall reflection coefficient). Multiply each table entry by 10^{-3} (e.g., the entry 4.8 means 4.8×10^{-3}). 45 degree angle of incidence, ordinary concrete, for bremsstrahlung and monoenergetic photons.^a

45 Degree Incidence	Angle of Reflection or Scatter (degrees) from Concrete (measured from the normal)				
	0	30	45	60	75
Source					
30 MV	4.8	5.0	4.9	4.0	3.0
24 MV	3.7	3.9	3.9	3.7	3.4
18 MV	4.5	4.6	4.6	4.3	4.0
10 MV	5.1	5.7	5.8	6.0	6.0
6 MV	6.4	7.1	7.3	7.7	8.0
4 MV	7.6	8.5	9.0	9.2	9.5
Co-60	9.0	10.2	11.0	11.5	12.0
0.5 MeV	22.0	22.5	22.0	20.0	18.0
0.25 MeV	36.0	34.5	31.0	25.0	18.0

^aTable values are based on evaluation of the data from the following sources: Figures 49 and 50b in IAEA (1979) and Figure 4.14(b) in NCRP (2003). The available data in the references noted were put on a common graph and conservatively safe values were selected. However, there are large uncertainties (on the order of $\pm 50\%$) in albedo values due to both the calculations and the interpolations.

Anexo 7. Carta de aprobación Comité de Ética de la Universidad de Chile



UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS

ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTO

(Documento en versión 3.1 corregida 17.11.2020)

Con fecha 23 de mayo de 2023, el Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina, Universidad de Chile, integrado por los siguientes miembros:

Dra. Lucía Cifuentes O., Médico Genetista, Profesor Titular, Presidenta
Dra. María Angela Delucchi B., Médico Pediatra Nefrólogo, Profesor Titular
Sra. Claudia Marshall F., Educadora, Representante de la comunidad
Dra. Grisel Orellana V., Médico Neuropsiquiatra, Profesor Asociado
Prof. Julieta González B., Bióloga Celular, Profesor Asociado
Dra. María Luz Bascuñán R., Psicóloga PhD, Profesor Asociado
Sra. Karima Yarmuch G., Abogada, Dirección Jurídica, Facultad de Medicina
Srta. Javiera Cobo R., Nutricionista, Secretaria Ejecutiva
Prof. Verónica Aliaga C., Kinesióloga, Magister en Bioética, Profesor Asociado
Dr. Dante Cáceres L., Médico Veterinario, Doctor en Salud Pública, Profesor Asociado
Dra. Yalda Lucero, Médico Pediatra, Doctorada en Ciencias Médicas, Profesor Ayudante

Ha revisado el Proyecto de Investigación titulado: **"CUANTIFICACIÓN DE LA CARGA DE TRABAJO ADICIONAL QUE PUEDE ALCANZAR UN ACELERADOR CONSIDERANDO UN CÁLCULO DE BLINDAJE QUE INCLUYE LA REALIZACIÓN DE ARCOTERAPIA VOLUMÉTRICA DE INTENSIDAD MODULADA (VMAT) EN EL INSTITUTO NACIONAL DEL CÁNCER"**. Cuyo investigador Responsable es el Sr. Camilo de la Barra, quién desarrolla labores en el Instituto Nacional del Cáncer.

El Comité revisó los siguientes documentos del estudio:

- Proyecto pregrado de la carrera Tecnología Médica
- Curriculum Vitae de los investigadores
- Carta Compromiso del investigador
- Carta de recepción del Proyecto por el Centro de Responsabilidad de Investigación del Instituto Nacional del Cáncer.

El proyecto y los documentos señalados en el párrafo precedente han sido analizados a la luz de los postulados de la Declaración de Helsinki, de las Pautas Éticas Internacionales para la Investigación Biomédica en Seres Humanos CIOMS 2016, y de las Guías de Buena Práctica Clínica de ICH 1996.

23|MAY|2023



Teléfono: 29789536 - Email: ceish.med@uchile.cl



**UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS**

Sobre la base de esta información el Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile se ha pronunciado de la siguiente manera sobre los aspectos del proyecto que a continuación se señalan:

- a) Carácter de la población a estudiar: Se trata de nuevos cálculos de carga de trabajo (tiempo total que irradia un acelerador medido en UM) medida en valores de Gy/semana con la implementación de VMAT. No implica nueva población. Usará estadística de exámenes realizados el último año y recalculará la carga de trabajo. Población cautiva.
- b) Utilidad del proyecto: Es útil porque recalcula la carga de trabajo con la implementación VMAT.
- c) Riesgos y beneficios: El beneficio es el nuevo cálculo de carga de trabajo y cálculo del blindaje.
- d) Protección de los participantes (asegurada por el consentimiento informado): Se dispensa el uso de consentimiento informado, dado que se analizará una base de datos que incluye información de tipo de tratamiento, prescripción de dosis, sitios de tratamiento, número de arcos y UM requeridas para cada tratamiento, además los datos obtenidos de los controles de la calidad. No se utilizarán datos sensibles ni sociodemográficos de los individuos, lo que asegurará la confidencialidad de los mismos.
- e) Notificación oportuna de reacciones adversas: No aplica.
- f) Compromiso del investigador responsable en la notificación de los resultados del estudio al finalizar el proyecto: Asegurada por el Tutor de Tesis.
- g) Requiere seguimiento o visita en terreno: Si ___ No X
N.º de vistas: _____

Por lo tanto, el comité estima que el estudio propuesto está bien justificado y que no significa para los sujetos involucrados riesgos físicos, psíquicos o sociales mayores que mínimos.

Sin perjuicio de lo anterior, según lo establecido en el artículo 10 bis del D.S N° 114 de 2011, del Ministerio de Salud que aprueba el reglamento de la ley N° 20.120; es preciso recordar que toda investigación científica en seres humanos deberá contar con la autorización expresa del o de los directores de los establecimientos dentro de los cuales se efectúe, la que deberá ser evacuada dentro del plazo de 20 días hábiles contados desde la evaluación conforme del CEISH, siendo de responsabilidad del investigador enviar a este Comité una copia de la misma dentro del plazo señalado.

23|MAY|2023



Teléfono: 29789536 - Email: ceish.med@uchile.cl



**UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS**

En virtud de las consideraciones anteriores el Comité otorga la aprobación ética para la realización del estudio propuesto, dentro de las especificaciones del protocolo.

Se extiende este documento por el periodo de **01 año** a contar desde la fecha de aprobación prorrogable según informe de avance y seguimiento bioético.

Lugar de realización del estudio:

- Instituto Nacional del Cáncer.

JAVIERA DE LOS
ANDES COBO RIVEROS

Nta. Javiera Cobo Riveros
Secretaria Ejecutiva CEISH

Santiago, 23 de mayo 2023

Proyecto: N° 024-2023
Archivo acta: N° 015

23|MAY|2023

