



Bellavista, 10 de junio, 2022

Señor(a):

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 067-2022-D-FCNM.** - Bellavista, 10 de junio, 2022.- EL DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

Visto el Oficio N°30-2022-UI-FCNM, con fecha Bellavista, 03 de junio del 2022, por medio del cual el estudiante de FÍSICA, SAENZ SOTELO, Shamuel Rhabi, solicita designar el Jurado Evaluador de tesis para titulación profesional con el fin de titularse por la modalidad de tesis sin ciclo de tesis.

**CONSIDERANDO:**

Que, mediante Resolución del Consejo Universitario N° 245-2018-CU de fecha 30 de octubre del año 2018, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de Pregrado de la Universidad Nacional del Callao;

Que, en el Art. 73° del precitado Reglamento, establece los requisitos y procedimientos para solicitar aprobación del Proyecto de tesis, sin Ciclo de Tesis, designación de Jurado Evaluador y del Profesor Asesor;

Que, mediante los Artículos 24°, 25° y 26° del Capítulo I JURADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER, TÍTULO PROFESIONAL, TÍTULO DE SEGUNDA PROFESIÓN O TÍTULO DE SEGUNDA ESPECIALIDAD PROFESIONAL del acotado Reglamento, establecen que el Jurado Evaluador es propuesto por el Comité Directivo de la Unidad de Investigación de la Facultad, los docentes miembros deben ser nombrados o contratados a TC o DE y debe estar integrado por tres (03) docentes titulares y un (01) docente suplente; el presidente, es el docente ordinario de mayor categoría y antigüedad entre los miembros propuestos; el secretario y vocal son designados en orden de prelación decreciente; el profesor asesor elegido por el bachiller en este caso es el profesor Dr. Juan Abraham Mendez Velasquez, y como asesor externo al MSc. Walter Vilca Vega

Que, estando vigente el Estado de Emergencia Nacional y de Aislamiento Social Obligatorio establecido en el marco del Decreto de Urgencia N° 026-2020 por las graves circunstancias que afectan la vida de la Nación a consecuencia del brote del COVID-19. Se ha emitido la Resolución de Consejo Universitario N° 068-2020-CU, de fecha 25 de marzo de 2020, mediante la cual se resuelve “autorizar con eficacia anticipada, del 16 de marzo de 2020, y hasta que concluya el estado de emergencia nacional, la modificación del lugar de la prestación de servicios docentes y administrativos;

Que, en efecto, corrido el trámite de la solicitud del recurrente, el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, mediante Oficio N° 30-2022-UI-FCNM recibido en forma virtual el 03 de junio de 2022, comunica que el Proyecto de Investigación del estudiante ha sido evaluado por el Comité Directivo de la Unidad de Investigación, consecuentemente se encuentra óptimo en cuanto a los requisitos señalados por las directivas vigentes proponiendo, al mismo tiempo, el Jurado Evaluador del Proyecto de Investigación titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FANTOMA PARA DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS Y CÁMARA DE IONIZACIÓN EN TRATAMIENTO DE RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA”**

Estando al documento del visto y lo glosado, con cargo a dar cuenta al Consejo de Facultad; y, en uso de las atribuciones le confiere el Artículo 187° y 189° del Estatuto de la Universidad Nacional del Callao y al numeral; 70.2 del Art. 70° de la Ley Universitaria, Ley N° 30220;

**RESUELVE:**

1° **DESIGNAR**, Jurado Evaluador de Proyecto de Tesis, para obtener el título profesional de Licenciado en Física, por la modalidad de tesis sin ciclo de tesis, titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FANTOMA PARA DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS Y CÁMARA DE IONIZACIÓN EN TRATAMIENTO DE RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA”** presentado por el estudiante, SAENZ SOTELO, Shamuel Rhabi, Jurado que está integrado por los siguientes profesores:

Mg. Carlos Alberto Lévano Huamaccto : Presidente  
Mg. María Natalia Rebaza Wu : Secretario  
Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra : Vocal

2° **PROPONER**, al docente Dr. Juan Abraham Méndez Velásquez como asesor y asesor externo al MSc. Walter Vilca Vega, para el desarrollo del proyecto de tesis aprobado en el numeral anterior.

3° **RECOMENDAR**, que dicho Jurado debe remitir su dictamen colegiado al Decano de la Facultad, dentro del plazo máximo de quince (15) días calendarios, contados a partir de la fecha de recepción del expediente y de la presente Resolución, de acuerdo con las normas reglamentarias vigentes sobre la materia.

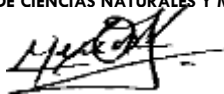

4º. **TRANSCRIBIR**, la presente Resolución al Jurado Evaluador, profesor asesor, Escuela Profesional y Departamento Académico de Matemática, Unidad de Investigación e interesado, para conocimiento y fines.

**REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE**

Fdo. **Dr. JUAN ABRAHAM MÉNDEZ VELÁSQUEZ**. -Decano y Presidente del Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad Nacional del Callao.

Fdo. **Mg. GUSTAVO ALBERTO ALTAMIZA CHÁVEZ**. -Secretario Académico  
Lo que transcribo a usted para los fines pertinentes.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA



---

**Dr. Juan Abraham Méndez Velásquez**  
Decano



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**  
**D E C A N A T O**



**PROVEÍDO N° 334-2022-D-FCNM**

Ref. : Oficio N°30-2022-UI-FCNM  
Jurado Evaluador del Proyecto de Tesis  
Est. SAENZ SOTELO, Samuel Rhabi  
Exp. N°566-2022-MP-FCNM

PASE, el documento de la referencia a la **Oficina de Secretaría Académica**, de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática para su conocimiento y atención.

Bellavista, 06 de junio de 2022

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA



**Dr. Juan Abraham Méndez Velásquez**  
Decano

JAMV/hc  
📁 Archivo



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**  
**UNIDAD DE INVESTIGACION**



“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

Bellavista, 03 de junio de 2022

**OFICIO Nº 30-2022-UI-FCNM**

Señor Doctor

**JUAN A. MÉNDEZ VELÁSQUEZ**

**Decano de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática**

**Presente.** -

**Asunto:** Proyecto de Tesis del estudiante SHAMUEL RHABI, SAENZ SOTELO  
Escuela Profesional de Física.

**Referencia:** Solicitud de Formato Único de Trámite **TA-1098798-2022**,  
del estudiante Samuel Rhabi Sáenz Sotelo - Escuela Profesional de  
Física - Proyecto de Tesis con 29 hojas.

De mi consideración:

Tengo a bien dirigirme a usted para saludarlo y a la vez comunicarle, que el Comité de la Unidad de Investigación en su sesión ordinaria del pasado 31 de mayo, acordó por unanimidad asignar jurado evaluador y aprobar el proyecto de tesis presentado por **SHAMUEL RHABI SAENZ SOTELO**, alumno de la Escuela Profesional de Física.

Por lo que se resuelve lo siguiente:

1. Designar el Jurado Evaluador de Tesis siendo constituido por los siguientes docentes.
  - Mg. Carlos Alberto Lévano Huamaccto : Presidente
  - Mg. María Natalia Rebaza Wu : Secretario
  - Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra : Vocal

para emitir opinión sobre el proyecto de tesis, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FANTOMA PARA DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS Y CÁMARA DE IONIZACIÓN EN TRATAMIENTO DE RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA**”.

El proyecto de tesis se inscribirá en el Libro de Registro de Tesis de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, una vez emitida la Resolución Decanal de aprobación correspondiente.

2. Adjunto documentación para su atención en archivo virtual, y asimismo para el trámite consiguiente.

Sin otro particular, quedo de usted,

**Atentamente,**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y  
MATEMÁTICA



**Dr. WHUALKUER LOZANO BARTRA**  
Director

## ACTA N° 02-2022-C-UI-FCNM

### Sesión Ordinaria del Comité Directivo de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática realizada el día martes 31.05.22

Convocados para la Sesión Ordinaria de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, vía reunión Google Meet, <https://meet.google.com/ito-gyzq-ddd?authuser=0>, siendo las 8:40 horas del día martes treinta y uno de mayo del año dos mil veintidós; bajo la Presidencia del Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra, y de los Miembros del Comité Directivo de la Unidad de Investigación; Mg. Rolando Juan Alva Zavaleta, Dr. Juan Abraham Méndez Velásquez, Dr. Edinson Raúl Montoro Alegre. Comprobado el quórum de reglamento, el señor Presidente declaró abierta la sesión para tratar los puntos de agenda:

#### **1.- Lectura de Acta. -**

El Director dio lectura a la Solicitud de un Informe Final de Proyecto de Investigación y de un Proyecto de Tesis.

#### **2.- Informe Final de Proyecto de Investigación – Dr. Montoro Alegre, Edinson Raúl.**

El Director dio lectura a la solicitud de aprobación de Informe Final de Investigación, presentada por el Dr. Montoro Alegre, Edinson Raúl, mediante la cual deriva en archivo virtual el informe final de investigación titulado: “TRAYECTORIAS QUE CONDUCEN AL CONJUNTO OPTIMAL EN PROGRAMACIÓN LINEAL”

Habiéndose procedido a su evaluación de acuerdo con lo establecido en el Artículo 26° del Reglamento de la Participación de los Docentes de la Universidad Nacional del Callao en Proyectos de Investigación, (RESOLUCIÓN DE APROBACIÓN N° 436-2021-R) y Directiva N°004-2022-R, Directiva para la Elaboración de Proyecto e Informe Final de Investigación de Pregrado, Posgrado, Equipos, Centros e Institutos de Investigación.

#### **Acuerdo N° 01**

No habiendo observaciones, el Comité Directivo de la Unidad de Investigación, por unanimidad tomó el siguiente acuerdo:

Aprobar el Informe Final del Proyecto de Investigación titulado: “TRAYECTORIAS QUE CONDUCEN AL CONJUNTO OPTIMAL EN PROGRAMACIÓN LINEAL” ejecutado por el Dr. Montoro Alegre, Edinson Raúl, desde el 01 de julio del 2021 al 30 de junio del 2022.

#### **3. Solicitud de evaluación de Proyecto de Tesis presentado por el estudiante Sáenz Sotelo Shamuel Rhabi, de la Escuela Profesional de Física.**

El Director de la Unidad de Investigación dio lectura a la Solicitud de Formato Único de Tramite TA-1098798-2022. Por el cual se remite al Comité Directivo de la Unidad de Investigación, en archivo virtual el Proyecto de Tesis, titulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FANTOMA PARA DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS Y CÁMARA DE IONIZACIÓN EN TRATAMIENTO DE RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA”, presentado por el señor Sáenz Sotelo Shamuel Rhabi, quien solicita designación de Jurado y Asesor.

Luego de la revisión correspondiente, los miembros del Comité Directivo de la Unidad de Investigación tomaron el siguiente acuerdo:

### Acuerdo N° 02

No habiendo observaciones, el Comité Directivo de la Unidad de Investigación, por unanimidad tomó el siguiente acuerdo:

Aprobar sin observaciones, el proyecto de investigación del estudiante **Sáenz Sotelo Shamuel Rhabi**, y asimismo conformar el Jurado Evaluador siendo constituido por los siguientes docentes:

1. Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra
2. Mg. Carlos Alberto Lévano Huamaccto
3. Mg. María Natalia Rebaza Wu

Siendo las 8:59 horas del día 31 de mayo del año dos mil veintidós, el Director dio por terminada la sesión. En señal de conformidad de lo actuado firman la presente acta los siguientes Miembros del Comité Directivo de la Unidad de Investigación.

**Mg. Alva Zavaleta, Rolando Juan**

Miembro Comité Directivo UI.

**Dr. Méndez Velásquez, Juan Abraham**

Miembro Comité Directivo UI.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y  
MATEMÁTICA

**Dr. WHUALKUER LOZANO BARTRA**  
Director

**Dr. Montoro Alegre, Edinson Raúl**

Miembro Comité Directivo UI.

*c.c.: Archivo*

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FANTOMA PARA  
DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS Y  
CÁMARA DE IONIZACIÓN EN TRATAMIENTO DE  
RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA**

SHAMUEL RHABI SAENZ SOTELO

ASESOR: Dr. JUAN ABRAHAM MENDEZ VELASQUEZ  
ASESOR EXTERNO: MSc. WALTER VILCA VEGA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS NATURALES

Callao – 2022  
PERÚ





## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:** FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

**TÍTULO:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FANTOMA PARA DOSIMETRÍA CON PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS Y CÁMARA DE IONIZACIÓN EN TRATAMIENTO DE RADIOCIRUGÍA ESTEREOTÁCTICA”

**AUTOR:** 0000-0002-4588-9822 / 72704764

**ASESORES:**

ASESOR: 0000-0002-7685-901X / 10455948

ASESOR EXTERNO: 0000-0002-2018-2740 / 09553765

**LUGAR DE EJECUCIÓN:** DEPARTAMENTO DE RADIOTERAPIA DEL INSTITUTO NACIONAL DE ENFERMEDADES NEOPLÁSICAS

**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** EXPERIMENTAL

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** CIENCIAS NATURALES / FÍSICA MÉDICA

**UNIDADES DE ANÁLISIS:** PELÍCULAS RADIOCRÓMICAS EBT3, PLA y ABS.

# INDICE

<b>INFORMACIÓN BÁSICA</b> .....	3
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:</b> .....	8
<b>1.1. Situación Problemática:</b> .....	8
<b>1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA</b> .....	9
<b>1.2.1 Problema General</b> .....	9
<b>1.2.2 Problemas Específicos</b> .....	9
<b>1.3. OBJETIVOS</b> .....	9
<b>Objetivo General</b> .....	9
<b>Objetivo Específicos</b> .....	9
<b>1.4. Justificación:</b> .....	10
<b>1.5. Limitantes de la Investigación:</b> .....	10
<b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....	11
<b>2.1. Antecedentes:</b> .....	11
<b>2.1.1 Nacionales</b> .....	11
<b>2.1.2 Internacionales:</b> .....	12
<b>2.2. Bases Teóricas:</b> .....	14
<b>2.2.1. Interacción de la radiación ionizante con la materia</b> .....	14
<b>2.2.2. Dosis absorbida</b> .....	14
<b>2.2.3. Fluencia de partículas [<math>\Phi</math>]</b> .....	15
<b>2.2.4. Tasa de fluencia [<math>\varphi</math>]</b> .....	15
<b>2.2.5. Fluencia de energía [<math>\Psi</math>]</b> .....	16
<b>2.2.6. Tasa de fluencia de energía [<math>\psi</math>]</b> .....	16
<b>2.2.7. Teoría de la cavidad</b> .....	16
<b>2.3. Conceptual</b> .....	18
<b>2.3.1. Principios Físicos de la Dosimetría de campos pequeños</b> .....	18
<b>2.3.2. Definición de haces pequeño</b> .....	18
<b>2.3.3. Código de práctica para dosimetría de referencia</b> .....	18
<b>2.3.4. Definición de términos básicos:</b> .....	19
<b>III. HIPOTESIS Y VARIABLES</b> .....	21
<b>3.1. Hipótesis general:</b> .....	21

3.2.	Hipótesis específicas:	21
3.3.	Variables de la investigación	21
3.3.1.	Operacionalización de variables	22
	Operacionalización	22
	Indicadores	22
	Instrumentos	22
	V1	22
	Fantoma en PRC	22
	Dosis relativa	22
	Escáner de PRC	22
	Fantoma en CI	22
	Dosis de referencia	22
	Electrómetro	22
	V2	22
	Radiocirugía estereotáctica	22
	Control de calidad	22
IV.	DISEÑO METODOLÓGICO	23
4.1.	Diseño metodológico	23
4.2.	Método de investigación	23
4.3.	Población y Muestra	23
4.4.	Lugar de estudio	23
4.5.	Técnicas e instrumentación de recolección de datos	23
4.5.1.	Instrumentos	23
4.6.	Análisis y procesamiento de datos	24
V.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	24
VI.	PRESUPUESTO	25
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	26



## INTRODUCCIÓN

La radiocirugía estereotáctica (SRS) intracraneal consiste en el depósito de altas dosis de radiación ionizantes a un blanco muy específico, protegiendo a su vez los órganos de riesgo circundantes que pueden ser afectados por este depósito de dosis, cuya dosis de prescripción depende de la patología a tratar. Entre las patologías a tratar se encuentran la neuralgia del trigémino, enfermedad de Parkinson, malformaciones arteriovenosas (MAV), meningiomas, schwannomas, metástasis cerebrales, entre otras [1-4].

Debido a que este procedimiento deposita alta dosis de radiación ionizante ( $>12$  Gy) en volúmenes de dimensiones reducidas ( $<3$  cm), es necesario emplear una alta exactitud dosimétrica durante el tratamiento, pues cualquier imprecisión en la determinación de dosis magnifica el riesgo de complicaciones en tejido sano. Por lo tanto, los campos empleados en (SRS) requieren, para su caracterización y comisionamiento, dosímetros con alta resolución espacial [2].

Por tal razón, varios autores han señalado a los detectores de películas radiocrómicas como fuertes candidatos para dicha tarea, debido a su excelente resolución espacial, sensibilidad, reproducibilidad y disponibilidad en las mayorías de los centros de radioterapia [1,3]. En consecuencia, existe varios modelos disponibles en el mercado; sin embargo, en este presente trabajo se utilizará las películas radiocrómicas EBT3.

Por lo expuesto, primero se caracterizará los materiales de impresión para el fantoma de radiocirugía que se construirá, a lo cual su densidad debe ser equivalente a la densidad del tejido humano, para esto se determinará el material que se empleará para el trabajo, en la cual, se probará con los siguientes materiales: PLA (**Ácido Poliláctico**) y ABS (**Acrilonitrilo Butadieno Estireno**), eligiendo al más apropiado para su utilización en el fantoma, hallando así, el porcentaje de densidad de relleno de la impresión semejante al tejido humano. Segundo, se diseñará y construirá el fantoma denominado *Fantoma SRS*, mediante el software de modelado CAD 3D, FUSION 360, cuyo diseño se podrá utilizar las cámaras de ionización y películas radiocrómicas. Luego, se caracterizará y calibrará las películas radiocrómicas EBT3 a emplearse. En consecuencia, se realizará la dosimetría relativa y de referencia empleando el fantoma SRS fabricado, mediante las películas radiocrómicas EBT3 y la cámara de ionización pinpoint respectivamente.

Los resultados permitirán implementar esta fantoma originalmente creada de este trabajo de investigación, para los diversos tipos de patologías en radiocirugía estereotáctica intracraneal, en los diferentes centros clínicos de nuestro país y a nivel internacional.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

### 1.1. Situación Problemática:

Se ha descrito ampliamente en la literatura la complejidad que representa realizar la dosimetría en campos pequeños para la radiocirugía estereotáctica (SRS) es un problema abierto de interés mundial, debido a varios factores, como los altos gradientes de dosis y la desigualdad con el tejido de los diferentes detectores de radiación ionizante existentes [5]. El principal reto de la dosimetría no estándar o no convencional emana de la correcta elección del detector a usarse para comisionar de manera confiable el sistema de planificación de tratamientos (TPS) [1-5]. La caracterización de haces pequeños de radiación se puede realizar con [6]: cámara de ionización, detectores de estado sólido, dosímetros termoluminiscentes y películas radiocrómicas [6,7].

Dadas las características, las PRC son ideales para la dosimetría de campos pequeños. Cabe agregar, el trabajo teórico-experimental de *Franceson et al.* [8] mostró hace años que la dosimetría con PRC entrega resultados consistentes e independientes de tamaño de campo.

Por lo tanto, actualmente en el mercado existen fantomas especializados para control de calidad en SRS; sin embargo, podemos encontrar algunos fantomas, que presentan inconvenientes al momento de realizar el control de calidad de paciente específico, como es: el escaneo en TC del fantoma para cada caso de control de calidad de radiocirugía. Debido que se debe llenar con agua el fantoma, luego posicionar adecuadamente la cámara de ionización, finalmente, vaciarlo para realizar otro caso de un paciente nuevo. Asimismo, si se desea realizar dosimetría relativa y dosimetría de referencia, con las películas radiocrómicas y cámaras de ionización, respectivamente. El procedimiento se convierte engorroso, teniendo en cuenta lo antes mencionado.

Por lo expuesto, se desarrollará el diseño, elaboración y construcción de un fantoma de bajo costo, utilizando una impresora 3D, cuyo material tendrá las bondades de ser económico, accesible y resistente. Además, que sea en composición muy similar a tejido equivalente. En la cual, podrá implementarse fácilmente en varios hospitales y clínicas, debido a que sus bondades no presentarán todos los inconvenientes mencionados antes.

Por este motivo, el presente proyecto de investigación propone el diseño y construcción del fantoma SRS para la dosimetría con películas radiocrómicas EBT3 y cámara de ionización en el tratamiento de radiocirugía estereotáctica intracraneal.

## **1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Problema General**

¿Será posible el diseño y construcción de un fantoma experimental, para la implementación en el tratamiento de radiocirugía estereotáctica?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

- a) ¿Qué material de filamento PLA y ABS, permitirá la construcción de un fantoma para el control de calidad de paciente específico en radiocirugía estereotáctica?
- b) ¿Qué resultado se obtendrá de dosis relativa de las películas radiocrómicas a partir de la construcción del fantoma?
- c) ¿Qué resultado se obtendrá de la dosis de referencia para la cámara de ionización a partir de la construcción del fantoma?
- d) ¿Qué factor de corrección será necesaria para la determinación de dosis relativa y absoluta, para el fantoma construido?

## **1.3. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Diseñar y construir un fantoma para dosimetría con películas radiocrómicas y cámara de ionización en el tratamiento de radiocirugía estereotáctica intracraneal.

### **Objetivo Específicos**

- Caracterizar el material de filamento (PLA) y (ABS) que permitirá el diseño y construcción del fantoma para radiocirugía estereotáctica.
- Realizar la dosimetría relativa con películas radiocrómicas con el fantoma elaborado.
- Realizar la dosimetría de referencia con cámara de ionización con el fantoma elaborado.
- Calcular el factor de corrección debido al material utilizado para la construcción del fantoma.

#### 1.4. Justificación:

Las investigaciones y los avances continuos en el tratamiento de diversas patologías han permitido la obtención de resultados cada vez más exitosos, con especial atención en los tratamientos radioterapéuticos por ser uno de los medios que permite un mayor control en la proliferación de células tumorales. Para algunos tipos de cáncer o MAV que son tratados con radiocirugía, los resultados de obliteración y la morbi-mortalidad obtenida concuerdan con la literatura, demostrando que la radiocirugía estereotáctica por su seguridad y eficacia es la modalidad terapéutica de elección en los pacientes con las patologías mencionadas respectivamente, según Reyes et. al. en [4]: *“Radiocirugía con linac en malformaciones arteriovenosas intracraneales de localización profunda: resultados clínicos”*.

La necesidad que lleva a realizar este proyecto es que no existen estudios previos de fantasmas elaborados con diversos materiales, como en el caso de los filamentos que se están empleando para una impresora 3D; por lo que abre nuevas posibilidades de investigación al respecto. Cabe resaltar, que la gran mayoría de los fantasmas están hechos de PMMA.

Por esta razón, la presente tesis de Licenciatura tiene como propósito determinar e implementar otros tipos de materiales accesibles que puedan reemplazar a los fantasmas especializados en SRS ya existentes en el mercado, con la finalidad de que sean asequibles a todas las clínicas y éstas garanticen un excelente control de calidad para la radiocirugía estereotáctica intracraneal.

#### 1.5. Limitantes de la Investigación:

- a) **Teórico.** – De acuerdo a mis consultas existe poca bibliografía de materiales de impresión 3D, y por tanto el análisis dosimétrico y cuantitativo de los fantasmas construidos bajo estos materiales son escasos en el mundo científico, por tal razón, esta investigación permitirá contribuir en la fase experimental y teórica.
- b) **Temporal.** – En cuanto, a la limitante temporal la construcción y modelado en 3D por factores económicos se ha realizado en diferentes etapas, lo cual, no influye en el resultado de la investigación, por lo tanto, esta limitante no es trascendente en la investigación.
- c) **Espacial.** - El proyecto propuesto se desarrollará en el Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, contando con la disponibilidad de todos sus equipos y materiales de trabajo, previo permiso de la institución, lo cual, es una limitante que no permite terminar el trabajo, según la fecha propuesta.



## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes:

#### 2.1.1 Nacionales

Existen trabajos de autores nacionales relacionados a la radiocirugía estereotáxica (**SRS**); No obstante, no desarrollan un fantoma especialmente para radiocirugía que ofrezca un excelente control de calidad. A continuación, se mencionará dichos trabajos.

**González A. (2018)**, menciona actualmente en el Perú, cuenta con la tecnología para realizar tratamientos de SRS para tratar múltiples metástasis cerebrales con técnicas modernas de radioterapia, como: la técnica de Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) es capaz de tratar estas patologías en el cerebro, al mismo tiempo y en una sola sesión. El objetivo de esta tesis es comprobar que la dosis absorbida planificada en el TPS es comparable con la dosis absorbida administrada al paciente, realizando todo el procedimiento del tratamiento de SRS de un paciente en específico, que presenta diecinueve metástasis intracraneales, utilizando como dosímetros a los diodos, películas radiocrómicas EBT3 y dosímetros termoluminiscentes TLD. Cuyo resultado, se obtuvo un índice gamma, demostrando que las PRC son excelentes para realizar controles de calidad en SRS, debido a su resolución espacial.

**Querebalú C. (2019)**, evaluó la DP (*Dosis periféricas*) en tratamientos de radiocirugía para blancos simulados en diferentes posiciones en la cabeza de un fantoma antropomórfica, con técnicas de cuatro arcos y criterios de planificación. El desarrollo de este trabajo contempló el uso de PRC EBT2, las cuales fueron caracterizados y calibrados. Se concluye que, para realizar la optimización durante el procedimiento en radiocirugía, se tiene que conocer la dependencia de la DP con respecto a la localización del blanco, el tamaño del colimador y la distancia.

**Vilca W. (2019)**, desarrolló una metodología para la verificación del sistema de planificación de tratamiento TPS Mónaco 5.11 basado en las consideraciones del nuevo formalismo de dosimetría de campos pequeños TRS – 483. Se caracterizó los diferentes detectores como: pinpoint, semiflex siendo estas cámaras de ionización, diodos (Edge) en reproducibilidad, dependencia de linealidad, dependencia con la tasa de dosis. Luego, se realizó el proceso de validación del sistema de planificación para campos de  $0.49 \times 0.49 \text{ cm}^2$ , entre otros. Posteriormente, se determinó los outputs factor con variación sin corregir mayor al 3% y se realizó la corrección según al protocolo TRS – 483; Finalmente, todos los resultados medidos de la dosimetría relativa se compararon con los datos obtenidos del planificador Mónaco 5.11 y con la base de datos Elekta, los resultados fueron evaluados mediante la prueba T-Student con un valor de confianza de 98%.

### 2.1.2 Internacionales:

Se tiene literatura internacional en radiocirugía relacionado al control de calidad analizando que dosímetro es el más adecuado, entre otros; sin embargo, no existe uno relacionado al diseño y elaboración de un fantoma para SRS.

**Francescon P. et. al. (1998)**, evaluaron el uso de las nuevas películas radiocrómicas EBT y la nueva microcámara de ionización paralela y TLD 800 para el uso en campos de haz pequeños. El objetivo fue determinar que dosímetros era el más adecuado para utilizar en campos pequeños, para eso determinaron, la linealidad, reproducibilidad, repetibilidad, entre otros. Como resultado, el uso de películas radiocrómicas fue el más adecuado, dados por sus bondades, como una de ellas, su alta resolución espacial.

**García O. et. al. (2011)**, caracterizaron los haces pequeños de radiación para la realización de radiocirugía y radioterapia estereotáctica, mediante el uso de películas radiocrómicas EBT2 (en aquel entonces poseían una alta resolución espacial y equivalencia al tejido). Con ello se pretendió obtener medidas con alta precisión y exactitud. Asimismo, establecer una metodología del uso de este tipo de detectores para dosimetría de campos pequeños y tener un control de calidad en tratamientos de intensidad modulada.

**García D. et. al. (2011)**, evaluaron el desempeño de diferentes detectores de película en la caracterización de haces de fotones utilizados en SRS, comparándolos con el diodo estereotáctico. Donde se midieron los factores de salida de haces de fotones generados con colimadores cónicos. En los resultados consideraron la incertidumbre experimental y tomando como referencia las mediciones con SFD. Finalmente, se encontraron intervalos de diámetros de colimadores cónicos para el uso de cada tipo de películas en términos de su desempeño comparados con el de SFD; entre las películas evaluadas, la película EBT2 ofrece mejor desempeño y mejores características para su uso clínico.

**Tyler M. et. al. (2013)**, el objetivo de este estudio es identificar los mejores detectores para cada tarea en el proceso de caracterización. Se midieron relaciones de salida, perfiles de haz y dosis de profundidad porcentual para diámetros de cono SRS de 5-45 mm. Se utilizaron detectores emergentes y disponibles comercialmente como, las películas radiocrómicas EBT2, dosímetro de fibra óptica de núcleo de aire (FOD), diodo de campo estereotáctico IBA, diodo de electrones PTW 60012 y una cámara de iones de dedal de pequeño volumen IBA cc01. El análisis de los datos medidos respaldados por los datos de simulación de referencia de Montecarlo llevó a las siguientes recomendaciones: Primero, los detectores equivalentes al agua (EBT2) o los FOD son la opción preferida para la dosimetría SRS. Segundo, se deben evitar las cámaras iónicas (Incluidos las cámaras de pequeño volumen con electrodos centrales de alta densidad, debido a los efectos de promedio de volumen y la dependencia energética. Por último, se utilizan diodos, en la cual se debe realizar correcciones para tener en cuenta su exceso de respuesta en campos pequeños.

**León E. et. al. (2013)**, caracterizaron las películas radiocrómicas EBT2 irradiando en un acelerador lineal de 6 MV, utilizando tres sistemas ópticos (SO); la caracterización de las películas consistirá en obtener las curvas de calibración, los espectros de absorción y polarización. De los resultados, respecto a la polarización, se observa que a medida que aumenta la dosis, el grado de polarización disminuye. Asimismo, para las curvas de calibración cada uno de estos SO presentan diferente sensibilidad siendo el espectrofotómetro el que posee mayor. En conclusión, es posible utilizar laser y espectrofotómetro como SO alternativos para analizar las PR EBT2, así, se puede evitar el efecto de polarización, así como aumentar la sensibilidad en la respuesta ya que estos factores influyen en la incertidumbre total en la determinación de la dosis.

**Camacho M. et. al. (2015)**, desarrollaron la implementación de un sistema óptico de escaneo bidimensional automático de películas radiocrómicas para su uso en dosimetría en tratamientos de radiocirugía. Este sistema de escaneo micrométrico bidimensional que consiste en dos mesas de traslación, un láser de emisión como fuente de luz y dos fotodiodos para realizar las medidas de densidad óptica de las películas. Para evaluar el funcionamiento del sistema óptico de escaneo en la determinación de las distribuciones de dosis, se simularon dos tratamientos de radiocirugía con dos diferentes tamaños de haz. 4mm y 20mm.

**Molina M. (2017)**, analizó las diferentes películas radiocrómicas fabricadas, entre ellas las: EBT (1era generación), EBT2 (2da generación) y las EBT3 siendo estas las últimas en el mercado. En la cual, el trabajo estudió a fondo las películas EBT3, estudiando sus propiedades dosimétricas con haces de electrones de 6-22 Mev, como son las dependencias de la densidad óptica en función de la dosis y la dependencia con la energía para los canales rojo, verde y azul. Concluyendo, que las curvas de la densidad óptica como función de la dosis no son lineales por lo que, para realizar la dosimetría de un haz de electrones, se requiere hacer la calibración de las películas EBT3 en el intervalo de dosis. Debido a que la densidad óptica no depende de la energía del haz de electrones para cada dosis a partir de 3 Gy, la película EBT3 se puede calibrar con una calidad del haz y se puede usar la curva de calibración para determinar la dosis impartida por electrones de cualquiera de las otras energías.

**Gerardo E. (2017)**, desarrolló un sistema manual de lectura puntual para las películas radiocrómica, en el cual se emplea una fuente de luz monocromática y fotosensores que permiten calcular la densidad óptica de la película para así relacionarla con a unidad de dosis. El nuevo sistema cuenta con los valores de intensidad, procesa los datos con base en una curva de calibración y reconstruye la imagen de la película indicando la distribución de dosis. La validación se realizó mediante un campo colimado utilizado en radiocirugía. Los resultados fueron comparados cuantitativamente con el sistema de planificación de tratamientos a través del índice gamma.

**Ardila I. (2020)**, implementó las recomendaciones del TRS-483 y determinar si tenemos exactitud dosimétrica para tratamientos de Radiocirugía estereotáctica, incluyendo la evaluación del mínimo tamaño de segmento. Se utilizó detectores, como: Semiflex, pinpoint y diodos. En la cual, la verificación de planes de tratamientos específicos para pacientes se realizó usando el arreglo de diodos con criterios gamma 5%/2mm y 5%/1mm. Al comparar los factores de campos con las correcciones establecidas en el TRS-483 y los factores de campo calculados en el sistema de planificación. Finalmente, para garantizar la exactitud en procedimientos de SRS se recomienda la optimización con MTS=0.5cm para volúmenes pequeños.

## **2.2. Bases Teóricas:**

### **2.2.1. Interacción de la radiación ionizante con la materia**

La radiación ionizante es definida como un tipo de energía liberada en forma de ondas electromagnéticas o partículas, produciendo excitación e ionización entre los átomos del medio. Estas pueden ser provocadas por fuentes radioactivas natural o de manera artificial. Asimismo, este tipo de radiación se puede clasificar según la ionización inducida como radiación directamente ionizante, que son aquellas partículas no cargadas que producen mínimas ionizaciones, sea transmitiendo toda o parte de su energía [9].

### **2.2.2. Dosis absorbida**

La dosis absorbida es una cantidad no estocástica aplicable tanto a la radiación indirectamente ionizante como a la directamente ionizante [10]. La dosis absorbida está relacionada con la cantidad estocástica denominada energía impartida, y está definida como la energía impartida media  $\Delta\bar{\epsilon}$  por radiación ionizante a un volumen  $V$  finito de masa  $\Delta m$  [12]:

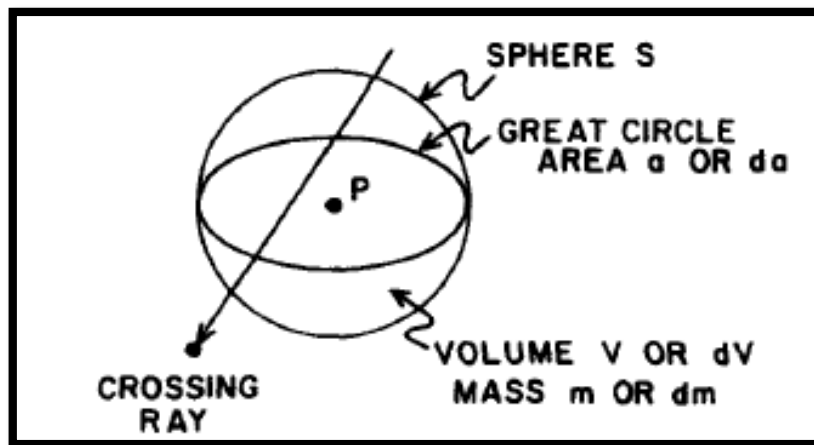
$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (2.1)$$

La energía impartida  $\Delta\bar{\epsilon}$  es la suma de todas las energías que entran en un volumen de interés menos toda la energía que deja el volumen, teniendo en

cuenta las conversiones de masa y energía al interior del volumen. La unidad de dosis absorbida es el *gray* que es 1 joule por kilogramo ( $J / Kg$ ).

### 2.2.3. Fluencia de partículas [ $\Phi$ ]

Considerando la *figura 2.3*, se tiene el término  $N_e$  como el valor esperado del número de partículas que atraviesa una esfera finita alrededor del punto  $P$  durante un intervalo de tiempo. Si la esfera se reduce infinitesimal en el punto  $P$  con un área de sección transversal, podemos definir que la fluencia de partículas  $\Phi$ , como el diferencial del número de partículas  $N_e$  que atraviesa un diferencial de área, cuyo valor esta expresado en unidades de  $m^{-2}$  o  $cm^{-2}$  [10,12].



*Figura 2.3: ESFERA DE VOLUMEN V Y SUPERFICIE ESFERICA S CENTRADO EN EL PUNTO P QUE ES ATRAVESADO POR UN HAZ DE RADIACION [10].*

La ecuación que define a la fluencia de partículas es determinada por:

$$\Phi = \frac{dN_e}{dA} \quad (2.2)$$

### 2.2.4. Tasa de fluencia [ $\varphi$ ]

La tasa de fluencia es el incremento de la fluencia durante un intervalo de tiempo entre  $t = t_0$  hasta  $t = t_{max}$ , entonces a partir de la ecuación 2.2 se define:

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dN_e}{dA} \right) \quad (2.3)$$

Donde  $d\Phi$  es el incremento de la fluencia de energía para un intervalo de tiempo  $dt$ , sus unidades están expresadas en  $m^{-2}s^{-2}$  [10,12].

### 2.2.5. Fluencia de energía [ $\Psi$ ]

Consideramos a  $R$  como valor esperado de la energía total para todas las partículas  $N_e$  que traspasan una esfera finita en el punto  $P$ , (ver figura 2.3), en un intervalo de tiempo arbitrario; considerando que la esfera se reduce infinitesimalmente en el punto  $P$  con un área circular, entonces se define la fluencia de energía como [12]:

$$\Psi = \frac{dR}{dA} \quad (2.4)$$

### 2.2.6. Tasa de fluencia de energía [ $\psi$ ]

Para cualquier intervalo de tiempo que varíe entre  $t = t_0$  hasta  $t = t_{max}$ , se definirá a la tasa de fluencia energética como la variación de la fluencia de energía durante ese intervalo de tiempo [12], de la ecuación 2.4, se tiene que:

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dR}{dA} \right) \quad (2.5)$$

### 2.2.7. Teoría de la cavidad

La dosimetría tiene como propósito la medida de la dosis absorbida en un punto determinado en un medio irradiado, si el medio no es apropiado para servir como dosímetro es necesario utilizar un instrumento sensible a la radiación. En general, un dosímetro es una pequeña cavidad que se introduce en el medio de interés; la dosis absorbida en la cavidad es diferente a la dosis en el medio, esto se debe a las propiedades de absorción de energía de los dos materiales no son las mismas [12,16]. Se han desarrollado varias teorías de cavidades para relacionar la dosis absorbida en el medio y la dosis absorbida en la cavidad, por ejemplo:

#### 2.2.7.1. Teoría de la cavidad de Bragg-Gray

La teoría de la cavidad de Bragg-Gray proporciona una relación fundamental de la dosimetría que vincula a dosis absorbida en un dosímetro y la dosis absorbida

en el medio que contiene el dosímetro. Las condiciones para la aplicación de la teoría de la cavidad de Bragg-Gray son, que la cavidad del dosímetro debe ser pequeña respecto con el rango de partículas cargadas incidentes en ella, y la dosis absorbida en la cavidad se deposita únicamente por partículas cargadas [12]. La dosis absorbida en la cavidad viene dada por:

$$D_{gas} = J_{gas} \left( \frac{W}{e} \right) \quad (2.6)$$

Donde el término  $\frac{W}{e}$  es la energía necesaria para producir un par iónico y  $J_{gas}$  es la colección de cargas por unidad de masa en el gas. Además, como la dosis relativa en el medio y el gas se relacionan con la razón de coeficientes másicos de poder de frenado de colisión se tiene:

$$\frac{D_{med}}{D_{gas}} = \left( \frac{S}{P} \right)_{med_{gas}} \quad (2.7)$$

Relacionando las ecuaciones (2.6) y (2.7), se tiene:

$$D_{gas} = J_{gas} \left( \frac{W}{e} \right) \left( \frac{S}{P} \right)_{med_{gas}} \quad (2.8)$$

Donde la expresión 2.8, indica la relación de la dosis en el gas de la cavidad del dosímetro con la dosis en el medio.

### 2.2.7.2. Teoría de la cavidad de Spencer- Attix

La teoría de Bragg-Gray demostró limitaciones al no determinar exactamente la densidad de ionización en cavidades llenas de aire, contenidas en cámaras de ionización con paredes de diferente material al del medio. Es por ello, la teoría de Spencer y Attix desarrollaron una modificación a la teoría de Bragg-Gray tomando en cuenta la producción de rayos delta [10]. La teoría de Bragg-Gray considera únicamente el transporte de los electrones primarios; no obstante, la distinción entre electrones primarios y secundarios es artificial porque un electrón primario es idéntico a un electrón secundario de la misma energía. Por tal motivo, Spencer-Attix planteó la idea de omitir el transporte de todos los electrones con energías inferiores a cierto parámetro de corte  $\Delta$ , este consiste en requerir la existencia de equilibrio electrónico (EPC). En la teoría de Spencer-Attix, la dosis absorbida en el medio se relaciona con la dosis absorbida en la cavidad como [16,12]:

$$\frac{D_{med}}{D_{aire}} = \frac{\int_{\Delta}^{Tmax} \phi_T \cdot \left[ \frac{L(\Delta)}{\rho} \right]_{med} dT + \phi_T(\Delta) \cdot \left[ \frac{S(\Delta)}{\rho} \right]_{med} \cdot \Delta}{\int_{\Delta}^{Tmax} \phi_T \cdot \left[ \frac{L(\Delta)}{\rho} \right]_{aire} dT + \phi_T(\Delta) \cdot \left[ \frac{S(\Delta)}{\rho} \right]_{aire} \cdot \Delta} \quad (2.9)$$

Donde  $\left( \frac{L(\Delta)}{\rho} \right)$  es el poder de frenado másico restringido por el parámetro  $\Delta$  y  $\left( \frac{S(\Delta)}{\rho} \right)$  es el poder de frenado másico sin restringir, evaluado en la energía  $\Delta$  y  $\phi_T$  es la fluencia de partículas totales.

## 2.3. Conceptual

### 2.3.1. Principios Físicos de la Dosimetría de campos pequeños

La dosimetría para campos pequeños de fotones se debe tener en cuenta con mucha atención. Las condiciones de campos pequeños están presentes cuando los dispositivos de colimación bloquean la vista completa de la fuente de haz directo de fotones, cuando hay pérdida del equilibrio de partículas cargadas (EPC) o cuando el promedio de volumen provoca una reducción en la señal medida producida por detectores que son grandes en comparación con el campo de radiación [16,11].

### 2.3.2. Definición de haces pequeño

Se define un campo pequeño a aquel que tiene por lo menos una dimensión menor que el alcance de equilibrio lateral de electrones ( $r_{LCPE}$ ) [18]. Asimismo, las perturbaciones en el detector son afectadas por la falta de equilibrio, se considera que las condiciones de campo pequeño se presentan también cuando cualquier punto del volumen sensible del detector cae a menos de  $r_{LCPE}$  cualquier borde del campo (al 50% de dosis): el alcance lateral de los electrones se determina por la relación [16,11]:

$$r_{LCPE} = 5.973 \cdot TPR_{20,10} - 2,688 [g \cdot cm^{-2}] \quad (2.10)$$

### 2.3.3. Código de práctica para dosimetría de referencia



En el protocolo TRS 483, la dosimetría para campos pequeños está basada en medidas con una cámara de ionización previamente calibrada en términos de dosis absorbida en agua, se basa en la definición de un campo intermedio llamado campo de referencia de específico de máquina ( $f_{msr}$ ), que es menor de 10 cm x 10 cm, pero lo mayor posible para equipos generados que no pueden determinar un campo estándar de referencia. En caso contrario, en un acelerador convencional el campo estándar de referencia coincide con el campo específico de máquina,  $f_{msr} = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  [11].

#### 2.3.4. Código de práctica para dosimetría relativa

El principio de la dosimetría relativa de campos pequeños es idéntico a la de campos convencionales, donde un campo clínico  $f_{clin}$  se relaciona con la de campo estándar de referencia  $f_{ref}$  (10 cm x 10 cm) a través de un factor de campo (*Output Factor, factor de dosis relativa o factor de dispersión total*), en el protocolo TRS 483 proporciona una guía para las medidas de los factores de campo y perfiles en las profundidades de medición como también los factores de corrección del promedio del volumen [11].

#### 2.3.4. Definición de términos básicos:

- a. **SRS:** La radiocirugía estereotáctica, es una radioterapia no quirúrgica que se usa para tratar anomalías funcionales y pequeños tumores en el cerebro, entregando dosis dirigida en forma precisa en menos tratamientos de altas dosis que la terapia convencional.
- b. **Linac:** Acelerador lineal, es una máquina de radioterapia externa, generadora de rayos X de alta energía mediante la aceleración de electrones que chocan y producen rayos de frenado.
- c. **Haz:** Los haces de tratamiento de los aceleradores y las bombas de cobalto salen de la máquina siempre con forma rectangular, debida a dos pares de colimadores internos integrados en la máquina. Posteriormente, se puede conformar mediante accesorios (bloques de cerrobend o colimador multiláminas).
- d. **Gray (Gy):** Es la unidad de dosis de radiación y equivale a 1 J/kg.
- e. **Fraccionamiento:** Es el reparto de la dosis en el tiempo. El fraccionamiento convencional para tratamientos complementarios o radicales es de 1.8 a 2 Gy/fracción, una fracción al día, cinco días por semana,
- f. **MLC:** Colimador multiláminas, es un dispositivo que sustituye a los bloques de cerrobend para conformar los campos de tratamiento. Consta de unas cuantas hojas o láminas radiopacas que pueden moverse individualmente.
- g. **TPS:** Sistema de planificación de tratamiento, es la selección de los campos de tratamientos que, en opinión del oncólogo radioterapéutico, mejor efecto tendrá para el paciente.
- h. **OAR:** Órganos de riesgos o críticos, son órganos que plantean problemas a la hora de diseñar (planificar) un tratamiento por encontrarse cerca del

volumen blanco y en los que hay que conocer con precisión la dosis que van a recibir.

- i. **Fantoma:** El fantoma es un aparato o elemento utilizado para el calibrado de equipos de imagen y que contiene, en su interior, elementos de características similares a los del organismo.
- j. **Filamento PLA:** El *Ácido Poliláctico*, es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar.
- k. **Filamento ABS:** El *Acrilonitrilo Butadieno Estireno*, es un polímero termoplástico bastante común en la industria, conocido principalmente por su buena resistencia a las bajas temperaturas y su peso liviano.

### **III. HIPOTESIS Y VARIABLES**

Basado en el planteamiento del problema se establece la siguiente hipótesis:

#### **3.1. Hipótesis general:**

El diseño y construcción de un fantoma para realizar dosimetría relativa con películas radiocrómicas y dosimetría de referencia con cámara de ionización para el tratamiento de radiocirugía estereotáctica.

#### **3.2. Hipótesis específicas:**

Los materiales que tienen mayor posibilidad a emplearse para la construcción del fantoma, por sus propiedades son: PLA y ABS.

En la evaluación de la dosimetría relativa, el porcentaje aceptado de la desviación máxima es menor a 3%.

En la evaluación de la dosimetría de referencia, el porcentaje aceptado de la desviación máxima es menor a 3%.

El factor de corrección por el tipo de material utilizado en el fantoma para la realización de la dosimetría relativa y absoluta es menor a 1%,

#### **3.3. Variables de la investigación**

En el desarrollo de la tesis se ha identificado 2 variables de investigación:

V1: Diseño y construcción de un fantoma para dosimetría con películas radiocrómicas y cámara de ionización.

V2: Tratamiento de radiocirugía estereotáctica.

### 3.3.1. Operacionalización de variables

	<b>Operacionalización</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumentos</b>
<b>V1</b>	<b>Fantoma en PRC</b>	<b>Dosis relativa Factor de corrección</b>	<b>Escáner de PRC Software FilmQA o RIT</b>
	<b>Fantoma en CI</b>	<b>Dosis de referencia Factor de corrección</b>	<b>Electrómetro</b>
<b>V2</b>	<b>Radiocirugía estereotáctica</b>	<b>Control de calidad Eficiencia</b>	

## **IV. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1. Diseño metodológico**

En el presente trabajo se utilizará un diseño de investigación cuasi experimental, en la cual, se podrá calcular evaluar una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes.

### **4.2. Método de investigación**

Esta investigación es de tipo descriptiva cuantitativa en la que se estudiarán y determinarán los parámetros adecuados para la construcción de un fantoma a base de materiales de impresión 3D, a fin de validar las hipótesis. Asimismo, también es transversal ya que los valores cuantitativos de las variables se midieron en una perspectiva temporal concreta actual.

### **4.3. Población y Muestra**

Dado la naturaleza de la investigación no corresponde establecer población, sin embargo, el diseño y construcción del fantoma permitirá su uso en todo los centros clínicos privadas y estatales.

En cuanto a la muestra, corresponde a los materiales elaborados que a su vez sirve de modelo experimental, para realizar dosimetría de relativa y de referencia.

### **4.4. Lugar de estudio**

Las actividades de investigación del presente trabajo se realizarán en el departamento de Radioterapia del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas y el laboratorio De Biofísica y Física Médica – INFISA de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

### **4.5. Técnicas e instrumentación de recolección de datos**

Se utilizarán técnicas de observación y medición cuantitativa que consisten en procedimientos de irradiación de películas radiocrómicas para cada una de las características dosimétricas definidas anteriormente. La recolección de datos se realizará a partir de la digitalización de estas películas mediante escáner digitalizador y un software de análisis especializado.

#### **4.5.1. Instrumentos**

Los instrumentos que se mencionarán a continuación se detallarán a más profundidad en la etapa final del trabajo.

- ✓ Acelerador lineal.
- ✓ Películas radiocrómicas
- ✓ Escáner de películas radiocrómicas
- ✓ Sistema RIT o FilmQA Pro.
- ✓ Fantoma.
- ✓ Cámara de ionización PinPoint.
- ✓ Electrómetro.

#### 4.6. Análisis y procesamiento de datos

Se procederá a irradiar el fantoma de acrílico con la cámara de ionización insertada. Luego, se hará el mismo procedimiento con la fantoma construida aplicando una serie de parámetros para determinar el valor de las dosis.

### V. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES	MESES							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Revisión bibliográfica, estado de arte.	x	x	x					
Capacitación del funcionamiento del Fusion 360 y elaboración del diseño del fantoma SRS.		x	x	x				
Caracterización del material de impresión e construcción del fantoma SRS.			x	x	x	x		
Calibración de las películas radiocrómicas y cámara de ionización mediante el acelerador lineal Elekta modelo infinity.					x	x		
Análisis de datos, tratamiento de datos, validación y discusión de resultados.						x	x	
Redacción de resultados, conclusiones e informe final.						x	x	x

## VI. PRESUPUESTO

RUBROS	CANTIDAD	PRECIO (Soles)	%	TOTAL RUBRO
<b>Bienes</b>				<b>50,050</b>
Filamentos ABS	20	1500		
Filamentos PLA	20	1300		
Impresora 3D	1	44000		
Laptop	1	3000		
USB	1	50		
Útiles de escritorio		100		
Otros bienes		100		
<b>Servicios</b>				<b>8,000</b>
Movilidad		2000		
Pago de servicios profesionales		2000		
Fotocopias, anillados y empastados		1500		
Imprevistos		2500		
<b>TOTAL GASTOS</b>				<b>58,050</b>

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. García-Hernández D, Lárraga-Gutiérrez JM, Ballesteros-Zebadúa, P. Comparación entre factores de salida de campos de radiocirugía estereotáctica medidos con diferentes dosímetros de película. Arch Neurocién. 2011; 16, 79-82.
- [2]. Camacho A, Gutiérrez R, García OA, León Y. Implementación de un sistema óptico de escaneo bidimensional automático para su uso en dosimetría con película radiocrómica. 2015.
- [3]. García OA, Lárraga, JM, Rodríguez M, Martínez A, & Celis MA. Small photon beam measurements using radiochromic film and Monte Carlo simulations in a water phantom. Radiotherapy and Oncology. 2010; 96(2), 250-253.
- [4]. Reyes I, Moreno S, Hernández M, Soro GE, de Jesús Suárez J, Aceves GA, Celis MA. Radiocirugía con linac en malformaciones arteriovenosas intracraneales de localización profunda: resultados clínicos. Arch Neurocién (Mex). 2008; 13(2), 91-98.
- [5]. García OA, Rivera T. Dosimetría de campos pequeños mediante películas radiocrómicas. 2013.
- [6]. Jiménez, G. Diseño, desarrollo e implementación de un sistema automático de escaneo óptico bidimensional para dosimetría con película radiocrómica en radioterapia de intensidad modulada [tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México; 2017.
- [7]. Tyler M, Liu PZ, Chan KW, Ralston A, McKenzie DR, Downes S, Suchowerska N. Characterization of small-field stereotactic radiosurgery beam with modern detectors. Physics in Medicine & Biology. 2013; 58(21), 7595.
- [8]. Francescon P, Cora S, Cavedon C, Scalchi P, Reccanello S, Colombo F. Use of a new type of radiochromic film, a new parallel-plate micro-chamber, MOSFET's and TLD 800 microcubes in the dosimetry of small beams. Medical Physics. 1998; 25(4), 503-511.



**[9].** Vatnisky S, Meghzifene A, Christaki K, Palmans H, Andrew P. Saiful M. OIEA TRS-483. Dosimetría de campos pequeños utilizados en radioterapia de haz externo: Un código de práctica internacional para la determinación de dosis relativa y de referencia. Organismo Internacional de Energía Atómica; 2017.

**[10].** Attix FH. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.

**[11].** International Code of Practice for reference and Relative dose determination, Dosimetry of Small Static fields used in external Beam Radiotherapy. Technical Reports Series N° 483, IAEA – AAPM, 2017.

**[12].** Podgorsak EB. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. Viena. Editorial International Atomic Energy Agency. 2005.

**[13].** Molina M. Propiedades dosimétricas de las películas de tinte radiocrómico EBT3 irradiadas con electrones de alta energía, 2017.

**[14].** Gonzales AM. Control de calidad de radiocirugía estereotáxica de múltiples metástasis intracraneales con arcoterapia volumétrica modulada, usando películas dosimétricas y TLD, 2018.

**[15].** Querebalú C. Evaluación de la dosis periférica para tratamientos de radiocirugía en blancos simulados en diferentes posiciones de la cabeza de un fantoma, 2019.

**[16].** Vilca WJ. Implementación del nuevo protocolo TRS 483 para la validación del cálculo de dosis del TPS Mónaco para campos pequeños aplicado a radiocirugía, 2019.

**[17].** Ardila ID. Dosimetría de campos pequeños de fotones en el contexto de tratamientos de radiocirugía estereotáctica intracraneal (SRS), 2020.

**[18].** Andreo P. Física de la Dosimetría de campos Pequeños de Fotones MV, Curso Implementación del COP IAEA TRS-483, la Habana, oct. 2017, Presentación en Power Point.