



Facultad de Ciencias
Universidad de La Laguna

Caracterización de un equipo para radioterapia intraoperatoria (ioRT-50)

Daniel Prieto González

Julio 2021

Tutores:

Carlos Garrido Bretón

Manuel Eulalio Torres Betancort

54114844F

alu010103105@ull.edu.es

629 11 12 68

Índice

Agradecimientos.	I
Motivación.	II
Resumen.	III
Abstract.	V
1. Introducción.	1
1.1. Objetivo del trabajo.	1
1.2. ¿Qué es el ioRT-50?.....	1
1.3. Historia de los equipos de radioterapia intraoperatoria.	1
1.4. ¿Cómo funciona un equipo de radioterapia intraoperatoria?	2
1.4.1. El ioRT-50, una nueva herramienta para la radioterapia intraoperatoria.	4
2. Método experimental.....	5
2.1. Montaje experimental para el cálculo de la curva de referencia.	5
2.2. Mediciones de radiación para aplicadores esféricos.	7
3. Análisis de los datos experimentales.....	10
3.1. Análisis de las películas mediante el software ImageJ.....	10
3.2. Análisis de las películas correspondientes al aplicador cilíndrico.	10
3.3. Análisis de las películas correspondientes al aplicador esférico.	11
3.4. Obtención de la curva de referencia.	13
3.5. Obtención de los perfiles de radiación para un aplicador esférico.	15
3.6. Obtención de las dosis de profundidad porcentual (PDD).	16
4. Análisis de resultados.....	18
4.1. Radiado y escaneo de las películas SP-45.....	18
4.2. Cálculo de las curvas PDD para el aplicador SP-45.	20
4.3. Determinación de los tiempos de disparo del SP-45.....	23
5. Radioterapia intraoperatoria.	26
6. Conclusiones.	30
7. Bibliografía.	31
I. Anexo.	33
a) Aplicador SP-35.	33
i) Serie 1:	33

ii) Serie 2:	36
b) Aplicador SP-40.....	39
i) Serie 1:	39
ii) Serie 2:	42
c) Aplicador SP-45.....	45
i) Serie 2:	45
d) Aplicador SP-50:.....	48
i) Serie 1:	48
e) Aplicador SP-55.....	51
i) Serie 1:	51
ii) Serie 2:	54

Agradecimientos.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de mis tutores, Carlos Garrido Bretón y Manuel Eulalio Torres Betancort.

En primer lugar, a Carlos, muchísimas gracias por tu apoyo y por introducirme de la mejor manera en el fascinante mundo de la radiofísica. Sin duda, el ambiente en el hospital, el trabajo en equipo y la camaradería entre profesionales han supuesto lo mejor de este proyecto. Desde el primer momento me sentí bienvenido. Por ello, también quiero agradecer especialmente su preocupación por que mi estancia fuera buena a Fernando Fernández, quien ha actuado casi como un tutor más.

A Manuel, gracias por tus consejos y ayuda durante la redacción del siguiente documento. Si no fuera por tus sabias palabras, no creo que todo hubiese salido tan bien como es el caso. El terror a la página en blanco fue mucho menor debido a tu presencia. Cómo me animaste a escribir y cómo tus consejos me ayudaron a mejorar es algo que nunca olvidaré. Gran parte de este proyecto es gracias a ti.

A Gara y Saskia, dos inesperadas compañeras durante las tomas de medidas. Siendo prácticos, agradecerles muchas de las imágenes que porta este documento. Sin duda han aumentado la calidad del trabajo. Siendo sentimentales, gracias por su compañía durante un día de toma de medidas que se planteaba especialmente duro por motivos personales. A pesar de las pocas horas que trabajamos juntos, este trabajo de fin de grado también es parte de ustedes.

A los camaradas de C.M, quienes se han convertido en una parte indispensable de mi vida, gracias por hacer conmigo este camino. A mi familia, por su constante apoyo, por aguantar mis malos momentos durante la redacción del trabajo (que los ha habido, sí) y por estar siempre ahí. A Pili y a Tuero, dos maravillosas personas que me han acompañado durante este difícil curso y que tengo la suerte de llamar amigos. Gracias por todo.

Y, finalmente, a mi abuela, quien ha tenido la mala fortuna de vivir esta enfermedad, aunque en uno de sus estadios menos graves. Espero que tanto la oncología como la radiofísica sigan en su ascendente progresión hacia el futuro para vencer al cáncer. Cada día que pasa es un paso más en este camino. Ánimo, te quiero mucho.

“La idea, por su naturaleza misma, necesita ser comunicada: escrita, explicada, realizada.”

Ursula K. Le Guin.

Motivación.

La Física es una disciplina científica con innumerables salidas profesionales. Las más conocidas por el estudiante son, probablemente, la carrera investigadora (ya sea astrofísica, física cuántica, etc.) y la labor como docente. Sin embargo, otras tantas se esconden detrás de estas, desde miembros en entidades bancarias hasta radiofísicos en un hospital.

El campo de la radiofísica supone, en muchas ocasiones, un completo desconocido para el estudiante del Grado. Trabajos como este permiten conocer mejor un mundo nuevo, un empleo que puede satisfacer enormemente a aquellos más enfocados a ayudar a la sociedad a través de la Física.

Durante los últimos años, se han realizado grandes inversiones en el campo de la radiofísica, permitiendo a instituciones como el Hospital Universitario de Canarias (HUC) adquirir nuevo equipamiento. Entre ellos, el ioRT-50, diseñado especialmente para la radioterapia intraoperatoria y superficial. Sin embargo, antes de poder trabajar con él, es necesaria una calibración que permita garantizar su correcto funcionamiento.

Este es el principal objetivo del siguiente trabajo, así como una de las tareas que llevan a cabo el equipo de radiofísicos del hospital. Se trata de una oportunidad única para el estudiante de acercarse a este nuevo ámbito laboral, además de un estudio en primera persona que me permitirá tratar de dilucidar el futuro: ¿quiero ser radiofísico?

Resumen.

En España se diagnostican cerca de 30.000 nuevos cánceres de mama cada año ^{[1][2]}, la mayoría de ellos en mujeres. Los estadios en los que se suelen encontrar estos a la hora de la detección son muy variados, pero, dadas las características de este tipo de enfermedad, la acción más usual en el tratamiento es la extirpación del tumor mediante cirugía (tumorectomía). Tras la operación, la paciente se somete a sesiones de radioterapia externa hasta cinco o seis semanas después de la intervención.

Dicho procedimiento conlleva grandes esfuerzos físicos, psicológicos y económicos por parte de la paciente y del equipo médico. La tendencia actual de la oncología es minimizar este tipo de procesos, haciéndolos menos invasivos, con menor agresividad y más cortos en el tiempo. Por ello, centros como el Hospital Universitario de Canarias (HUC) han adquirido equipos como el ioRT-50 (intraoperative radiation therapy), de la empresa alemana Ecklert & Ziegler-Womed (WOLF-Medizintechnik GmbH). Se trata de un instrumento de última generación que permite la aplicación de radioterapia superficial e intraoperatoria, adquirido por el hospital en diciembre de 2017 y puesto en marcha en el verano de 2019 ^{[3][4]}.

El ioRT-50 se puede utilizar en braquiterapia después de la extracción del cáncer de mama bajo unos criterios clínicos específicos, relacionados con la edad de la paciente, el tamaño y localización del tumor y el estiaje de la enfermedad. En el caso de que sea posible su aplicación, el instrumento se introduce en el lecho tumoral, radiándolo para asegurar la eliminación de posibles células cancerígenas residuales. De esta manera, la paciente no tiene que someterse a una radioterapia posterior y despierta de la anestesia con el tratamiento local realizado.

Para garantizar su seguridad, es necesaria una caracterización del haz de radiación emitido y control de calidad que asegure el correcto funcionamiento del aparato. En el siguiente documento se detalla el proceso llevado a cabo para la caracterización de los perfiles de radiación, estudiando que los valores de dosis calculados concuerden con los resultados facilitados por el fabricante.

En primer lugar, se obtiene la curva de calibración o curva sensitométrica. Este gráfico permite relacionar la duración de los disparos y el oscurecimiento de las películas radiológicas con la dosis radiada. Para ello, se utiliza un aplicador cilíndrico y películas sensibles a la radiación denominadas ETB3. El montaje experimental consiste en láminas de agua sólida, una cámara de ionización y un electrómetro, así como un barómetro y un termómetro.

Doce películas se radian en diferentes tiempos, de treinta segundos a seis minutos. Mientras tanto, la carga se detecta tres veces. Al realizar un ajuste lineal, se determinan el resto de los valores. Se pasa de la carga a la dosis por factores de conversión. Las películas se digitalizan con un escáner y se analizan mediante el software libre ImageJ. Se obtiene el valor de oscurecimiento del píxel. Finalmente, este parámetro se relaciona con los datos de dosis medidos mediante un ajuste hiperbólico. Una vez calculada la curva de referencia, se trabaja con los aplicadores esféricos quirúrgicos.

La siguiente parte de la caracterización consiste en determinar la duración de los disparos con cada aplicador para irradiar una dosis de 12,5 Gy a 5 mm de profundidad. Para ello, el proceso que se explica a continuación se repite con los cinco aplicadores. Estos dispositivos tienen diámetros de 35 a 55 mm, aumentando de cinco en cinco. El montaje experimental es el siguiente: películas diseñadas para el trabajo, software Rad-Control II y una cuba llena de agua. Preparado el dispositivo, se irradian las películas necesarias. Se realizan dieciséis tomas por cada aplicador, ochenta en total. Las películas se agrupan en series de ocho. La duración de los disparos es de un minuto para los aplicadores SP-35, SP-40 y SP-45 y de dos para los SP-50 y SP-55, todo ello con el objetivo de que los datos no varíen mucho.

Una vez radiadas, las películas son recogidas. Se escanean y se analizan con ImageJ. El trazador de rectas se utiliza para obtener el "Plot Profile" de las películas en diferentes ángulos (40°, 50°, 70°, 90°, 130°, sus opuestos, y 180°). Los datos se agrupan en lotes de cuatro películas en un archivo de Excel y abarcan desde el centro de la película hasta el borde. A continuación, se selecciona el valor absoluto de un ángulo y se calcula la curva PDD. Para ello, se realiza un ajuste en Excel. Se representa la tasa de dosis frente a los valores de profundidad y se calculan los parámetros de la curva: la tasa de dosis superficial y el coeficiente de atenuación.

Cuando se obtienen dichos coeficientes para todos los ángulos de un aplicador, se sustituyen en una tabla. Se calcula la media y la dosis (12,5 Gy) se divide por ella. Así se calcula la duración del disparo. El proceso se repite para las otras doce películas y para todos los aplicadores. Los nuevos datos se comparan con los de la caracterización anterior y se discuten sus características. Si no se han visto modificados en exceso, el resultado se considera satisfactorio.

Finalmente, se comenta la aplicación del ioRT-50 en una sesión de radioterapia intraoperatoria. En primer lugar, es calibrado por la mañana por el equipo de radiofísica. Se trata de un proceso sencillo que dura menos de media hora. Si los resultados son favorables, el instrumento es llevado a quirófano. Una vez extirpado el tumor y realizada la actuación del equipo de medicina nuclear, se aplica el disparo con el tiempo calculado por la calibración anterior. Luego, la incisión se cierra y finaliza la intervención. La participación en un proceso de estas características es fundamental para la experiencia de ser radiofísico.

Abstract.

About 30,000 new breast cancers are diagnosed in Spain each year ^{[1][2]}, most of them in women. The stages in which these are usually found at the time of detection are very varied, but, given the characteristics of this type of disease, the most common action in treatment is the removal of the tumour by surgery (lumpectomy). After the operation, the patient undergoes external radiotherapy sessions up to five or six weeks after the intervention.

This procedure involves great physical, psychological and economic efforts on the part of the patient and the medical team. The current trend of oncology is to minimize this type of process, making them less invasive, less aggressive, and shorter in time. For this reason, centres such as the University Hospital of the Canary Islands (HUC) have acquired devices as the ioRT-50 (intraoperative radiation therapy), from the German company Ecklert & Ziegler - Womed (WOLF-Medizintechnik GmbH). It is a modern instrument that allows the application of superficial and intraoperative radiotherapy, acquired by the hospital in December 2017 and launched in the summer of 2019 ^{[3][4]}.

IoRT-50 can be used in brachytherapy after breast cancer removal under specific clinical criteria, related to the patient's age, tumor size and location, and disease stretching. If it is possible, the instrument is introduced into the tumor bed, radiating it to ensure the elimination of possible residual cancer cells. In this way, the patient does not have to undergo subsequent radiotherapy and wakes up from the anesthesia with the local treatment performed.

To make sure patient safety, calibration is necessary to secure the proper functioning of the device. The following document details the process carried out for this purpose, characterizing the radiation profiles, and studying that the dose values obtained agree with the results of the last calibration and those provided by the literature.

First, you get the calibration curve or sensitometric curve. This graph allows to relate the duration of the shots and the darkening of the radiological films with the radiated dose. For this purpose, a cylindrical applicator and radiation-sensitive films called ETB3 are used. The experimental assembly consists of solid water sheets, an ionization chamber, and an electrometer. A barometer and a thermometer are also available.

Twelve films are broadcast at different times, from thirty seconds to six minutes. Meanwhile, the load is detected three times. By making a linear adjustment, the rest of the values are determined. It is passed from load to dose by conversion factors. The films are digitized with a scanner and analysed by a free software, ImageJ. The darkening value of the pixel is obtained. Finally, this parameter is related to the dose data measured by hyperbolic adjustment. When the reference curve has been calculated, we work with the surgical spherical applicators.

The next part of the calibration consists of determining the duration of the shot with each applicator to radiate a dose of 12,5 Gy at 5 mm depth. To do this, the process explained below is repeated with the five applicators. These devices have diameters from 35 to 55

mm, increasing from five to five. The experimental assembly is as follows: films designed for the job, Rad-Control II software, and a bucket filled with water. Prepared the device, the necessary films are radiated. Sixteen shots are made for each applicator, eighty in total. The films are grouped into series of eight films. The duration of the shots is one minute for the SP-35, SP-40, and SP-45 applicators. The duration for SP-50 and SP-55 is two minutes. The goal is that the data does not vary much.

The films are collected. It is scanned with a scanner and analysed with ImageJ. The line selector is used to obtain the “Plot Profile” of the films at different angles (40°, 50°, 70°, 90°, 130°, their opposites, and 180°). The data are grouped into batches of four films in an Excel file and they are from the centre of the film to the edge. Then, the absolute value of an angle is selected and the PDD curve is calculated. To do this, an adjustment is made in Excel. The dose rate versus depth values is represented and the curve parameters are calculated. These are surface dose rate and attenuation coefficient.

When they are obtained for all angles in an applicator, the values in a table are substituted. The mean is calculated. The dose (12,5 Gy) is divided by this. Now, the duration of the shot is gotten. The process is repeated for the other twelve films and for all applicators. The new data are checked against those of the previous calibration and its characteristics are discussed. If they have not changed much, the process has been successful.

Finally, the application of ioRT-50 in an intraoperative radiotherapy session is discussed. First, it is calibrated in the morning by the radio physics team. It is a simple process, and it lasts less than half an hour. If conditions are favourable, the instrument is taken to the operating room. When the tumour is removed and the nuclear medicine team acts, the device is prepared. The radiology equipment applies the shot with the time given by the previous calibration. Then, the incision is closed and the operation ends. Having participated in this experience is an important part of the work of a radio physicist.

1. Introducción.

The objective of the next work is to calculate the radiation doses in different depths to all applicators of ioRT-50 in the yearly calibration. First, it is explained what it is an intraoperative radiotherapy device and its main characteristics. X-Rays tubes are important tools in medical fields like radiography or fluoroscopy. To really understand the intraoperative radiation, it is necessary to know the historical evolution of this processes. Beginning with Wilhelm Röntgen and finishing with Mitsuyuki Abe and the first application of this technic. Then, physics fundamentals of X-Rays tubes are explained to finish with the specific characteristics of ioRT-50.

1.1. Objetivo del trabajo.

El trabajo mostrado a continuación tiene como objetivo calcular las dosis de radiación a distintas profundidades para todos los aplicadores del ioRT-50 dentro del proceso de caracterización del equipo.

1.2. ¿Qué es el ioRT-50?

El ioRT-50 es un equipo de radioterapia intraoperatoria que permite radiar localmente el lecho tumoral dentro del quirófano inmediatamente después de la cirugía mientras se minimiza el efecto al tejido sano de alrededor. Se trata de un tubo de rayos X, que genera fotones por transmisión en un blanco de titanio.

Un tubo de rayos X es una válvula de vacío que convierte la energía eléctrica en radiación electromagnética con rango de frecuencias entre $30 \cdot 10^{15}$ Hz y $30 \cdot 10^{18}$ Hz. Los electrones son arrancados del cátodo mediante la aplicación de una corriente eléctrica, se aceleran por medio de un potencial e impactan contra los átomos del ánodo, generándose en el proceso fotones con energía dentro del rango de los rayos X.

En medicina, la aplicación de estos dispositivos se centra tanto en el ámbito del diagnóstico como en la terapia. Quizás las más conocidas entre el público general sea su uso en radiografías, aunque también se emplean en campos como tomografía computarizada o fluoroscopia, incluida la radioterapia.

1.3. Historia de los equipos de radioterapia intraoperatoria.

A finales del siglo XIX fueron muchos los investigadores que observaron fenómenos asociados con los rayos X mientras estudiaban dispositivos como los tubos de Crookes. Sin embargo, la primera publicación acerca de este tipo de radiación tiene lugar el 28 de diciembre de 1895, cuando Wilhelm Röntgen envía un ensayo a la revista de la Sociedad Médico-Física de Würzburg (Alemania) titulado “Sobre un nuevo tipo de rayo” [5].

Poco después Röntgen descubre el uso médico de su hallazgo al realizar una radiografía de la mano de su mujer. Los rayos X pronto se hacen mundialmente conocidos, por lo que su aplicación en la medicina se generaliza con rapidez. El primer uso clínico tiene lugar en Inglaterra por parte de John Hall-Edwards el 11 de enero de 1896, cuando radiografía una aguja clavada en la mano de un compañero. Posteriormente, el 14 de febrero del mismo año, Halls-Edwards es el primero en aplicar rayos X durante una intervención quirúrgica.

Sin embargo, fue el 29 de enero de 1896 cuando los rayos X se utilizan por primera vez para tratar un cáncer. El médico estadounidense Émil Grubbé trata un cáncer de la mama izquierda de la paciente Rose Lee [6]. A partir de aquí, e investigando más acerca de la radiación y sus efectos sobre el cuerpo humano, la radioterapia avanza a lo largo del siglo XX y se comienza a aplicar a cada vez más variados tratamientos.

Es en la década de 1960 cuando aparece la radioterapia intraoperatoria. Un equipo médico de la Universidad de Kyoto (Japón), encabezado por Mitsuyuki Abe, aplica por primera vez radiación durante operaciones para tratar carcinomas de estómago y páncreas [7]. Este método se sigue desarrollando a lo largo de los años y, poco a poco, extendiéndose por hospitales alrededor del mundo, popularizándose su uso. De esta manera, en 2017, el Hospital Universitario de Canarias adquiere el equipo ioRT-50 y comienza a trabajar con él en 2019.

1.4.¿Cómo funciona un equipo de radioterapia intraoperatoria?

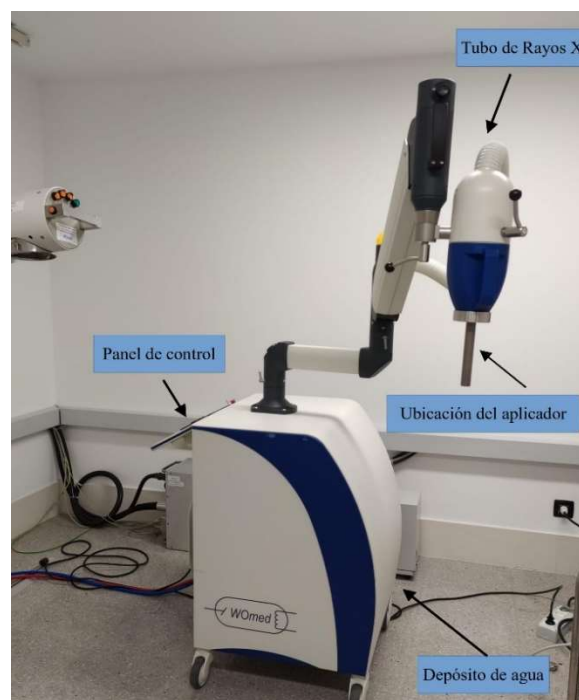


Figura 1.1: Partes principales del ioRT-50.

El ioRT-50 consiste, principalmente, en un tubo de rayos X, produciéndolos al impactar electrones acelerados contra una diana metálica (Figura 1.1 y 1.2). A continuación, se

detalla el funcionamiento de las diferentes partes del instrumento, así como el fundamento físico de la producción de esta radiación electromagnética.

En primer lugar, es necesario producir los electrones que luego serán acelerados. Para ello se aplica una corriente eléctrica al cátodo del equipo, aumentando la temperatura de este y generando una nube de electrones por efecto termoiónico [8]. Los electrones excitados luego son acelerados mediante la diferencia de potencial existente entre el cátodo y el ánodo.

Para que tenga lugar el efecto termoiónico, el cátodo debe calentarse a muy altas temperaturas, emitiendo grandes cantidades de calor por efecto Joule que pueden llegar a afectar al equipo. Por ello es necesario, tanto en el cátodo como en el ánodo, un sistema de refrigeración que prolongue el tiempo de uso.

Tras viajar por un tubo en el cual se ha hecho vacío, los electrones impactan contra una lámina de tungsteno que actúa como ánodo. Aproximadamente el 99% de la energía cinética del electrón se emite en forma de calor al chocar con el objetivo. Mientras, el 1% restante se transforma en rayos X que son los que al final llegan al paciente. Dentro de este porcentaje, se generan dos tipos de radiación: característica y de frenado.

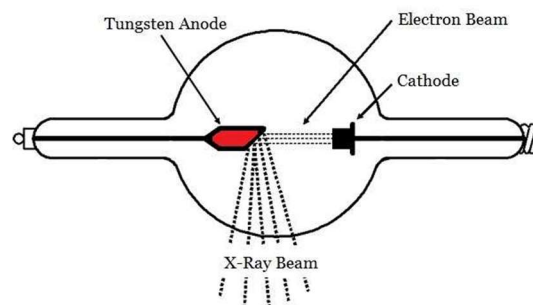


Figura 1.2: Diagrama de un tubo de rayos X^[9].

Cuando un electrón alcanza el objetivo, la energía cinética de este puede ser tan grande que puede excitar a los electrones de los átomos que lo conforman, provocando que salten a una capa electrónica superior. Entonces, el hueco creado es ocupado por otra partícula, liberando el exceso de energía con una frecuencia dependiente del número atómico del elemento.

También sucede que los electrones se aproximan a los núcleos de los átomos que conforman el objetivo, viéndose afectados por una atracción electrostática. Con la aparición de esta fuerza, se produce un frenado que disminuye su velocidad. La energía sobrante se emite en forma de fotones con una frecuencia característica de los rayos X. El fenómeno producido es muy variable. Puede darse desde el caso en el que el electrón frena al 100%, convirtiendo toda su energía cinética en radiación, hasta aquel en el cual el electrón sigue su camino sin verse afectado.

Estos dos efectos combinados con la autoabsorción de fotones en el propio blanco generan un haz de fotones con una energía pico de 70 keV y una energía media en torno a 50 keV.

Por último, los aplicadores quirúrgicos colocados a la salida del haz de rayos X modelan los haces de radiación para conseguir una forma aproximadamente esférica.

1.4.1. El ioRT-50, una nueva herramienta para la radioterapia intraoperatoria.

Son varias las empresas que diseñan equipos para la radioterapia intraoperatoria. Entre ellas Womed, perteneciente a la compañía alemana Eckert & Ziegler. Desde su fundación en 1990 se han dedicado a la fabricación de distintas herramientas para la radioterapia, tanto superficial como intraoperatoria, así como al desarrollo de softwares como RadControl-II que permitan el uso de sus aparatos^[10].

La unidad de radioterapia ioRT-50 consta de un carro móvil con un soporte para un tubo de rayos X. Su utilización se realiza a través de una pantalla táctil integrada en el propio carro o de forma remota mediante su software instalado en un ordenador portátil.

El ioRT-50 puede funcionar a dos potenciales, 50 kV y 70 kV. Posee, además, dos tipos de aplicadores. De cara a la radioterapia superficial, el equipo médico tiene a su disposición cinco aplicadores cilíndricos de distintos diámetros. Mientras, para la radioterapia intraoperatoria, el ioRT-50 cuenta con aplicadores quirúrgicos esféricos de cinco diámetros diferentes.

2. Método experimental.

During the following sections, the different studies carried out during the realization of the work are detailed. First, a radiation curve is obtained that allows to relate the exposure time of the films with the radiation doses applied. Calculated this aspect, then we proceed to study the radiation profiles of the different applicators of the ioRT-50. The process described below runs in the same way for all of them.

A continuación, se explican los distintos procedimientos llevados a cabo durante la parte experimental.

2.1. Montaje experimental para el cálculo de la curva de referencia.

Se posiciona en un maniquí de agua sólida una película a la profundidad de 5 mm, perpendicularmente se ubica el aplicador cilíndrico y se radia a dosis conocidas.

El procedimiento seguido se esquematiza en un diagrama de flujo para su rápida visualización (Figura 2.1).

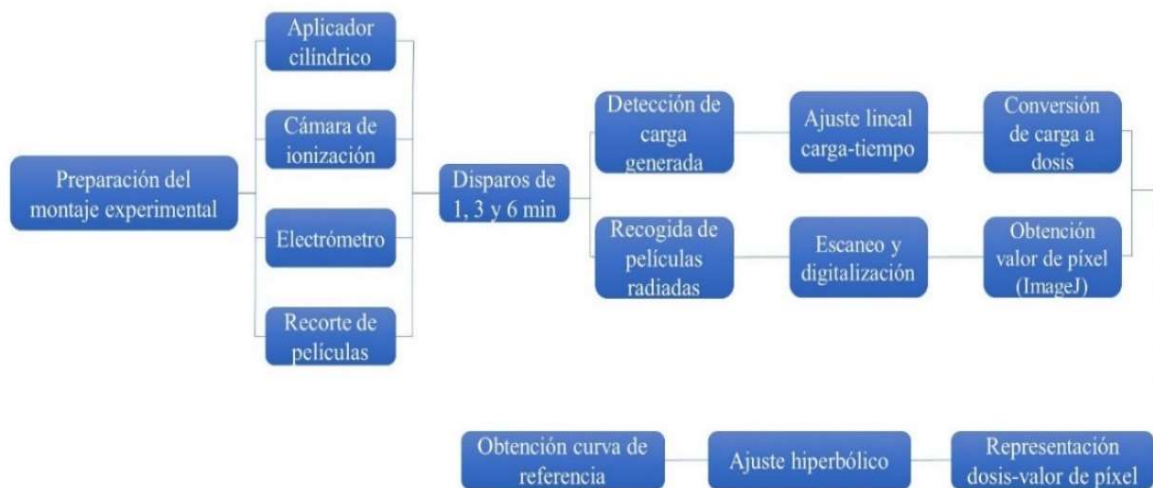


Figura 2.1: Obtención de la curva de referencia.

Una cámara de ionización, de pequeño tamaño, se conecta a un electrómetro que recoge la carga generada en la ionización de las moléculas de aire cuando interaccionan con la radiación.



Figura 2.2: Aplicador cilíndrico d3/30.

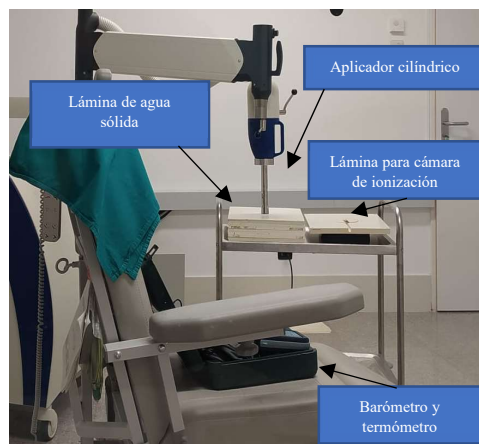


Figura 2.3: Montaje experimental para el aplicador cilíndrico.

Sobre el carrito equipado con el aplicador cilíndrico (Figura 2.2) se colocan seis láminas de agua sólida de 1 cm de grosor; a su vez, encima de esta, se coloca otra de igual espesor, pero con un compartimento para introducir la cámara (Figura 2.3). Ubicado el equipo, y asegurándose de que esté bien conectado, se coloca sobre la cámara una lámina de 5 mm de espesor.

Poniendo el electrómetro en cero al inicio, se registran las cargas generadas por cada disparo. Conociendo que la relación carga-tiempo es lineal, se hacen disparos para uno, tres y seis minutos. Terminado el proceso, se desmonta el equipo, apuntando los valores obtenidos durante la experiencia y se calcula la dosis absorbida con la cámara a la profundidad de 5 mm con el formalismo del *TRS-398*^[11].

Se radian a continuación las películas a dosis conocidas. Las películas ETB3, de la marca Fimecorp International S.L.^[12] tienen un rango de sensibilidad que abarca desde 1 cGy hasta 2000 cGy. Presentan una alta resistencia al agua y estabilidad frente a la luz, además de ser económicas, debido, principalmente, a su gran tamaño y su facilidad para adaptarse a distintas formas mediante recortes con tijeras o láser.

La respuesta sensitométrica de la misma presenta el pico de absorción en 636 nm, de modo que la sensibilidad está maximizada para la lectura con luz roja. Sin embargo, durante la calibración del ioRT-50, esta se realiza con luz verde. El modelo ETB3 puede ser escaneado con cualquier tipo de equipo, aunque no se recomiendan aquellos de blanco y negro. Por último, también está diseñada para medir dosis desde KeV hasta MeV.

Se recortan las películas, en forma de cuadrado, con una diagonal de 5 cm aproximadamente (Figura 2.4).

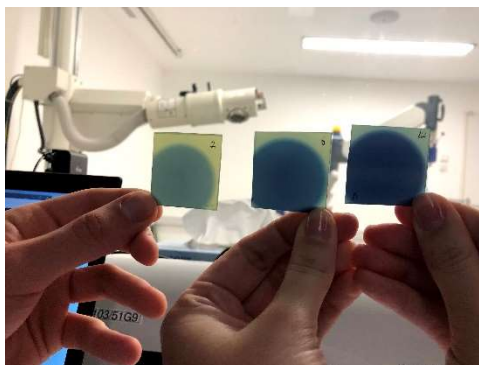


Figura 2.4: Películas radiadas correspondientes a 1, 3 y 6 minutos.

Sobre un carrito metálico se colocan siete láminas de agua sólida de 1 cm de grosor, un material plástico con una densidad similar a la del agua.

Encima de las láminas, intentando que esté lo más centrada posible, se posiciona la película a radiar. Posteriormente se coloca otra lámina de agua sólida, aunque esta con sólo 5 mm de grosor. Mediante unas marcas tanto en la lámina inferior como superior, se alinean la película y el aplicador cilíndrico. Terminado el montaje, se inician las medidas (Figura 2.3).

En total se radian doce películas en distintos tiempos, los cuales van desde los treinta segundos hasta los seis minutos, con incrementos de medio minuto. Mediante el software Rad-Control II, distribuido por la casa comercial, se programan los sucesivos disparos.

Durante el disparo, la habitación donde se encuentra el ioRT-50 debe estar completamente cerrada por motivos de seguridad. Su seguimiento se realiza desde una sala de control. Finalizado este, se accede a la habitación, se retira el aplicador, el cual estaba en contacto directo con la lámina de 5 mm, y se guarda la película para su posterior análisis.

Ya se tienen las películas radiadas a dosis conocidas y se trata ahora de asociar el oscurecimiento de la película a la dosis absorbida.

2.2. Mediciones de radiación para aplicadores esféricos.

El siguiente procedimiento experimental a llevar a cabo consiste en la radiación de las películas para los aplicadores esféricos. En este caso, los aplicadores son cilindros metálicos terminados en una esfera de plástico, translúcida. Los aplicadores son nombrados en función de su diámetro. En total se dispone de cinco aplicadores distintos,

cuyos diámetros van desde 35 a 50 mm, aumentando de cinco en cinco. Estos se designan como SP-35, SP-40, SP-45, SP-50 y SP-55 (Figura 2.5).



Figura 2.5: Aplicadores esféricos SP-35, SP-40 y SP-50. El SP-45 y el SP-50 estaban esterilizándose.

En el otro extremo del cilindro mecánico, cada aplicador posee unas lengüetas que permiten una unión firme con el resto del instrumento.

El montaje para ello es el siguiente. Sobre el mismo carrito metálico utilizado antes, se coloca una cuba llena de agua, el medio donde se realizan las medidas. A continuación se desplaza el brazo del instrumento sobre la cuba, se coloca el aplicador, y se posiciona de tal manera que esté perpendicular con el horizonte y con la superficie del agua (Figura 2.7). La película se sitúa en torno al aplicador gracias a un soporte creado mediante impresión 3D (Figura 2.8). Cuando todo se encuentra preparado, se sumerge el aplicador en la cubeta.

El objetivo es realizar las mediciones mediante un montaje que se parezca lo máximo posible a las aplicaciones del ioRT-50 en el quirófano. Por lo tanto, al igual que la esfera dentro del lecho tumoral está en contacto con el tejido interno de la paciente, en este caso la película se debe ajustar de manera óptima al aplicador.

Las películas están cortadas por láser (Figura 2.6) para encajar perfectamente con los aplicadores. La longitud del corte depende exclusivamente del diámetro de la esfera de plástico. Los segmentos superiores aseguran además que el aplicador queda totalmente cubierto. Sin embargo, las películas cortadas por láser, del orden de diez, no eran las suficientes para realizar todas las medidas. Para cada aplicador, se efectuaron dieciséis medidas, lo que supone un total de ochenta películas radiadas. El resto se tuvieron que fabricar de forma casera a partir de películas de gran tamaño con tijeras y usando algunas de las cortadas por láser como molde.

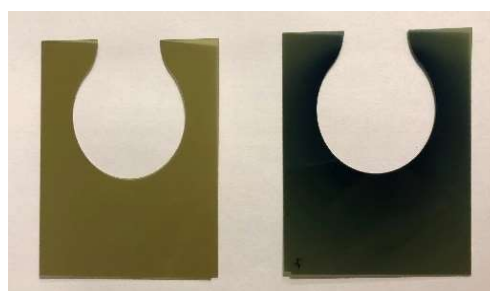


Figura 2.6: Película ETB3 antes y después de ser radiada.

La duración de los disparos depende del diámetro de cada aplicador. Para los SP-50 y SP-55, cada disparo es de dos minutos de duración, mientras que, para el resto de diámetros, los disparos sólo son de un minuto. Cuanto mayor sea el diámetro del aplicador, más cantidad de plástico deben atravesar los fotones desde el final del tubo metálico hasta la propia película. La radiación menos energética en muchas ocasiones no alcanza la superficie del aplicador, ya que es absorbida por el material de la esfera. Cuanto más grande sea esta, menor número de fotones radiará la película. Por lo tanto, para que la radiación emitida por todos los aplicadores sea similar, a los aplicadores más grandes se les aumenta el tiempo de disparo. Los criterios en los que se fundamenta esta decisión son puramente experimentales, de acuerdo a los datos obtenidos en las calibraciones anteriores.



Figura 2.7: Montaje experimental para el aplicador cilíndrico.

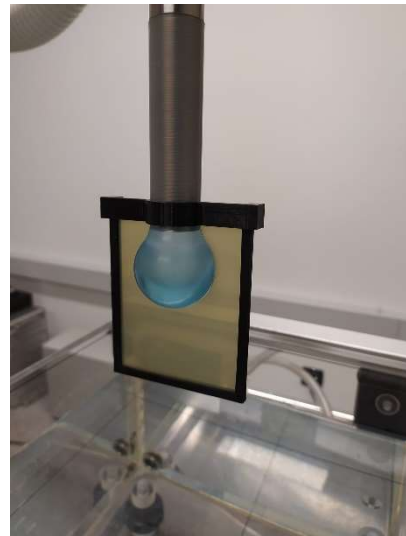


Figura 2.8: Detalle del montaje experimental.

De esta manera, se completan un total de ocho disparos para los distintos aplicadores. Finalizados todos los diámetros, se procede al estudio de las películas radiadas.

3. Análisis de los datos experimentales.

The analysis of the films corresponding to the spherical applicator and the cylindrical is carried out in a similar way. Below it is the procedure carried out for this part of the project, which is essential for obtaining data. First, the movies are scanned and analyzed with the ImageJ software. Obtained the pixel and dose values as a function of the charge for the spherical applicator, the reference curve is calculated. Subsequently, by analyzing the films of the spherical applicator, the profiles for the different angles of a film are generated. Finally, the parameters of surface dose rate and attenuation coefficient are calculated by means of an exponential adjustment and the corresponding PDD curves.

3.1. Análisis de las películas mediante el software ImageJ.

El análisis tanto de las películas correspondientes al aplicador cilíndrico como a las de los aplicadores esféricos se efectúa de manera similar. A continuación se detalla el procedimiento llevado a cabo para esta parte del proyecto, esencial para la obtención de datos.

En primer lugar, se deja un tiempo de reposo de 24 h entre la radiación de la película y su posterior escaneo para asegurar que todos los procesos fisicoquímicos asociados al oscurecimiento de la película ya han concluido.

El análisis de todas las películas se ha llevado a cabo mediante el software libre "ImageJ". Se trata de un programa de procesamiento de imagen digital desarrollado por el National Institutes of Health, la agencia gubernamental de los Estados Unidos responsable de la biomedicina y la salud pública de investigación^{[13][14]}. Entre sus múltiples usos, dentro del campo de la física se pueden encontrar el análisis de espectros electromagnéticos o de películas radiocrómicas. Mediante distintas herramientas, ImageJ permite el calibrado o realce de contrastes de imágenes, así como filtrados de imagen y dominio frecuencial. En esta ocasión, se utiliza el software para determinar los valores de píxel asociados al oscurecimiento de la película.

Para digitalizar las películas se hace uso de un escáner. Este equipo permite su escaneo en los tres canales primarios de color: rojo, azul y verde. Por lo tanto, el valor de píxel arrojado por el programa dependerá del canal que se use. Sólo es necesario un escaneo para obtener las tres opciones. Así, se toma una película, se escanea y se extraen los datos mediante ImageJ. Se selecciona el canal verde para realizar el resto de medidas.

3.2. Análisis de las películas correspondientes al aplicador cilíndrico.

En primer lugar, se digitaliza la película mediante el escáner. Se repite el proceso para todas ellas, desde la correspondiente a treinta segundos de disparo hasta la de seis minutos.

Una vez se obtienen las imágenes digitales de las películas, se guardan en una carpeta para su posterior análisis a partir del software ImageJ, escogiéndose el canal verde.

Entre las múltiples herramientas que este ofrece, se utiliza una región de interés (ROI) circular, la cual permite seleccionar una zona de la imagen trazando un círculo o un óvalo. A continuación, se efectúa la medida y el programa ofrece el valor medio de píxel de la región seleccionada, así como la mediana y la desviación típica. La elección se ha hecho de tal forma que sólo se tome el centro de la zona radiada, garantizando uniformidad. Por lo tanto, dentro de un margen de error, se toma la media como el valor de píxel correspondiente a dicho tiempo de disparo. Por otro lado, la desviación típica actúa como error de la medida.

Se repite el proceso con todas las películas. Así, finalmente, se obtienen doce valores de píxel con su error correspondiente.

3.3. Análisis de las películas correspondientes al aplicador esférico.

Se toma una de las películas y se coloca en la cama de cristal en una posición centrada, con la base paralela a uno de los bordes (Figura 3.1).

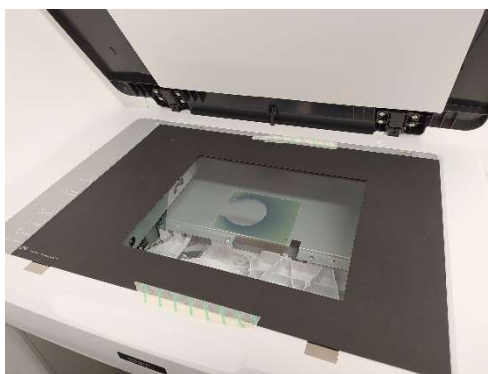


Figura 3.1: Escaneo de una película correspondiente a un aplicador esférico.

Se escanea y la imagen obtenida se abre con el software ImageJ. En lugar del seleccionador circular, se hace uso de un trazador de rectas. El análisis se ejecuta de la siguiente manera. En primer lugar, se ubica uno de los extremos de la recta en el punto que corresponde al centro del aplicador. Se trata de una elección manual, por lo que el error es significativo.

Desde ahí, se extienden rectas a distintos ángulos hasta el final de la zona oscurecida por la radiación. El objetivo es obtener valores de píxel en todas las direcciones en las que emite el aplicador. En el caso anterior, al tratarse de un cilindro, la región oscurecida era uniforme y sólo se necesitaba un dato. Sin embargo, al tratarse ahora de un aplicador esférico, este emite en todas las direcciones, salvo en aquella que justo coincide con el tubo metálico. Al existir multitud de ángulos, se establecen un total de once representativos: 40° , 50° , 70° , 90° , 130° , 180° y sus opuestos.

A causa de las características del programa, se debe hacer una conversión de ángulos (Figura 3.2). Se define como 180° la dirección perpendicular al punto inferior del aplicador esférico, es decir, paralela al tubo metálico. Mientras tanto, para el programa, la misma dirección corresponde con -90° .

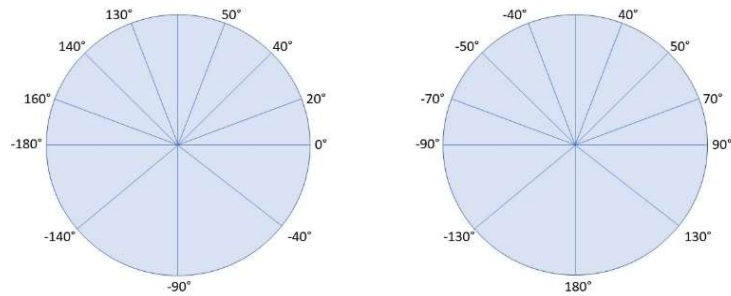


Figura 3.2: Equivalencia de ángulos. ImageJ (izquierda) y Hospital (derecha).

La selección realizada permite obtener los valores de píxel de todos los puntos de la imagen que contiene, gracias a la herramienta “Plot profile”. Esta arroja un gráfico en el que se representa el valor de píxel frente a la distancia entre el punto y el inicio de la recta (Figura 3.3).

Es importante señalar que todas las curvas presentan una forma similar. El primer intervalo de la gráfica, una línea casi horizontal, corresponde a la zona donde se ubica el aplicador esférico. Al escanear la película, dicha región es blanca, de ahí que tenga un valor de píxel máximo. Cuando se alcanza su borde interior, el oscurecimiento es muy notable, aumentando el valor del píxel de forma gradual a medida que la radiación es menos significativa.

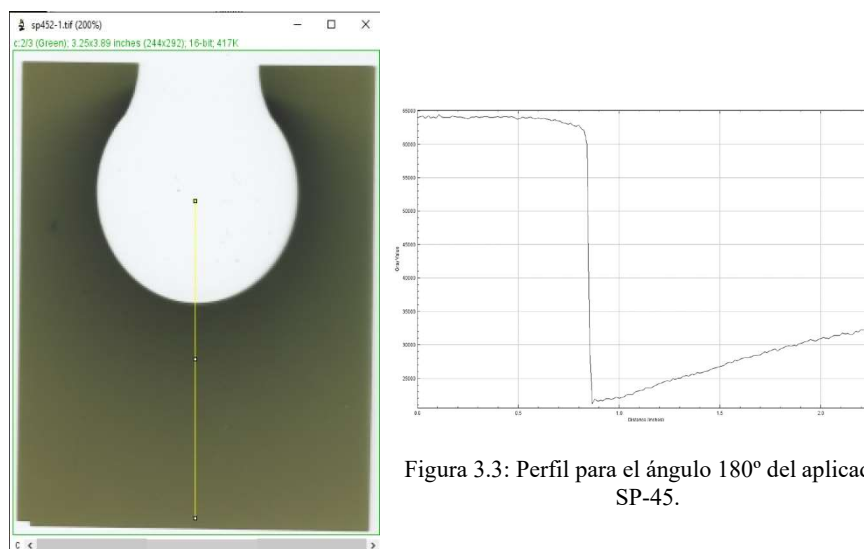


Figura 3.3: Perfil para el ángulo 180° del aplicador SP-45.

3.4. Obtención de la curva de referencia.

Tal como se comentó anteriormente, la relación carga-tiempo es lineal. Basándose en ello, se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados (Figura 3.4). Obtenido el polinomio de la recta, se sustituyen el resto de valores y se determina la carga detectada para un tiempo determinado.

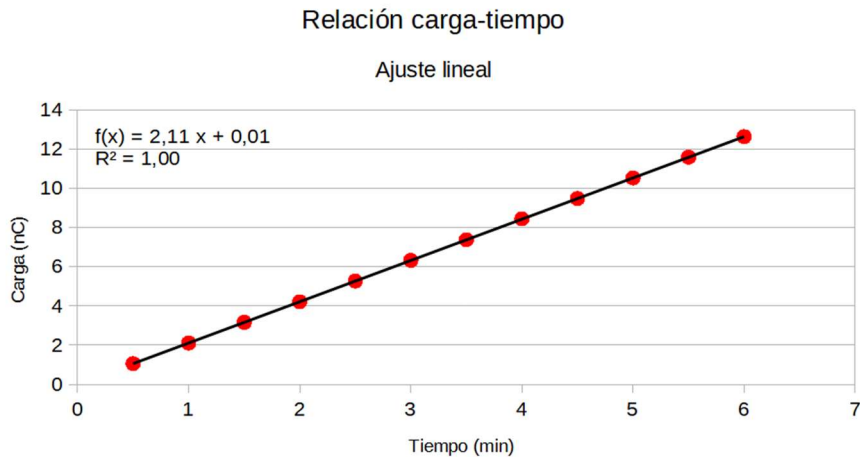


Figura 3.4: Ajuste lineal por mínimos cuadrados de carga-tiempo.

Antes de representar la curva, es necesario relacionar los valores de carga con la dosis. Es conocido que cierta cantidad de fotones excita el gas en el interior de la cámara para cada tiempo. Aplicando el protocolo *TRS-398* se calculan los valores de dosis absorbida en función de la carga recogida.

$$Dosis = Qk_{PT}k_qN_{D,W} \quad (3.1)$$

Donde k_q es el factor de calidad del haz, k_{PT} es el factor presión temperatura y $N_{D,W}$ es el factor de calibración del detector (Tabla 3.1). Multiplicando estos tres parámetros por los valores de carga (Ecuación 3.1), se obtienen las correspondientes dosis de radiación.

k_{PT}	1,02
k_q	1,002
$N_{D,W}(\text{Gy/C})$	$1,542 \cdot 10^9$

Tabla 3.1: Factores de conversión ^{[15][16]}.

Una vez se tienen las dosis para cada uno de los tiempos, estos se relacionan con los valores de píxel obtenidos en el procesado de las películas mediante un ajuste. En primer lugar se representan las dosis de radiación frente a los valores de píxel. En función de la forma que tenga la curva, el ajuste a realizar será hiperbólico o exponencial. De acuerdo con la recomendación del fabricante de las películas, la curva dosis-píxel se ajusta a una hiperbólica. Como se observa en la imagen, los valores experimentales se ajustan mejor a una dependencia hiperbólica, sobre todo en la región cercana al cero (Figura 3.5).

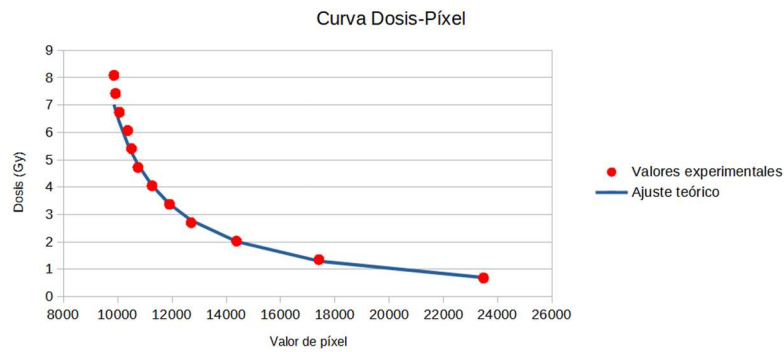


Figura 3.5: Valores teóricos y experimental para la curva Dosis-Píxel.

En una tabla de Excel ya preparada para ello se introducen los valores de dosis y píxel. El programa diseñado por los miembros del HUC arroja los parámetros del ajuste hiperbólico, así como los valores teóricos de dosis y la diferencia con el valor real. A través de este ajuste, luego se calcula la relación dosis-valor de píxel (Ecuación 3.2).

$$\text{Dosis} = a + \frac{b}{\text{Píxel} - c} \quad (3.2)$$

a	-0,7
b	37992,1
c	7821,1
R²	0,993

Tabla 3.2: Tabla con parámetros del ajuste.

Tal como se puede observar a través del coeficiente de correlación de Pearson, el ajuste hiperbólico cumple satisfactoriamente (Tabla 3.2). Todo ello a pesar de las grandes incertidumbres en el error que conlleva sobre todo el estudio del oscurecimiento de las películas.

A la hora de analizar la radiación emitida por los aplicadores esféricos, los únicos datos de los que haremos uso serán los parámetros del ajuste. Así, una vez se ha relacionado el

valor de píxel su dosis correspondiente, se procede a trabajar con los datos experimentales obtenidos durante el estudio con los aplicadores esféricos.

3.5. Obtención de los perfiles de radiación para un aplicador esférico.

Para cada aplicador esférico se radian un total de dieciséis películas. Para cada película, se toma el perfil de radiación de once ángulos distintos. A partir de aquí, con los datos recogidos en una tabla, se procede a calcular las curvas de radiación para cada ángulo de cada aplicador, de tal forma que se generaran sesenta gráficas. El método llevado a cabo durante esta parte de la caracterización se detalla a continuación.

En primer lugar, se selecciona un conjunto de cuatro películas asociadas a un aplicador esférico. Se abren las tablas correspondientes con los datos de todos los ángulos. De cada documento se seleccionan las columnas correspondientes a un ángulo y su opuesto. Por ejemplo, 40° y -40°. Estos valores son copiados y trasladados hasta un nuevo fichero de Excel donde se calculará la curva correspondiente a dicho ángulo.

Las características de esta nueva hoja de Excel son las siguientes (Figura 3.6). En la primera página se introducen las distintas series, compuestas, a su vez, de dos columnas. Una correspondiente a la distancia entre el origen de la recta y el punto correspondiente y la otra al valor de píxel. En total se pueden insertar ocho grupos, es decir, dieciséis columnas. Cuatro corresponderán al ángulo positivo y las otras cuatro al negativo. Por lo tanto, el máximo de películas que intervienen es cuatro.

SERIE 1		SERIE 2		SERIE 3		SERIE 4		SERIE 5		SERIE 6		SERIE 7		SERIE 8	
Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1	Tiempo (min)	1
Quitar (mm)	2	Quitar (mm)	3	Quitar (mm)	2	Quitar (mm)	2	Quitar (mm)	5	Quitar (mm)	2	Quitar (mm)	2	Quitar (mm)	0
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0.6346129		0.6346129		0.63856000		0.63856000		0.6306484		0.6306484		0.63794484		0.63794484	

CALIBRACIÓN	
T < 2 min	T > 2 min
a	-0,7
b	37992,1
c	7821,1
R ²	0,9927

Ángulo (°):	90
APLICADOR:	SP-45

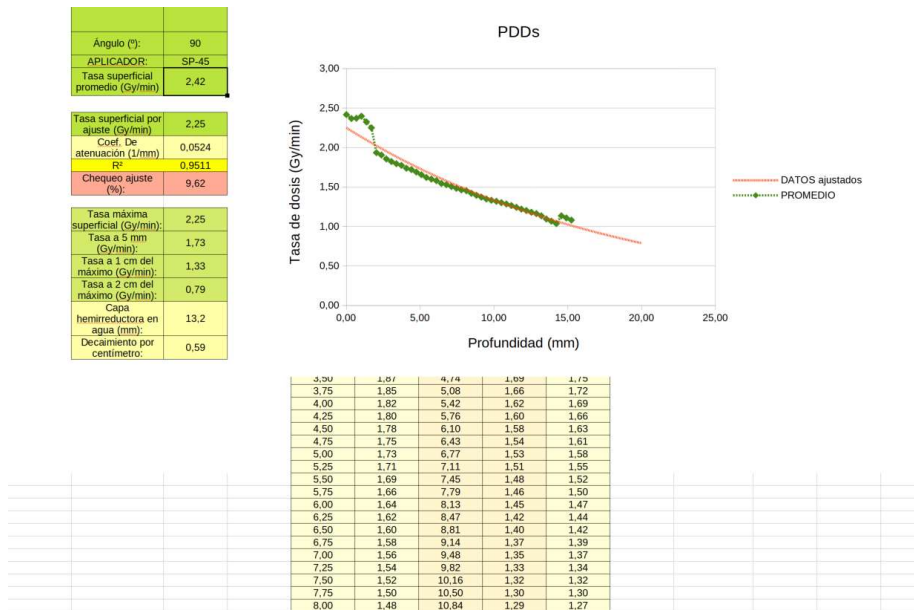


Figura 3.6: Excel para el cálculo de la curva PDD.

El fichero arroja al final una curva exponencial (Ecuación 3.3) para cada uno de los ángulos analizados donde se muestran las tasas de dosis (Gy/min) frente a la profundidad en milímetros.

$$D = D_0 e^{-\mu x} \quad (3.3)$$

Donde, D_0 (Gy/min) es la tasa de dosis superficial y μ (1/mm) el coeficiente de atenuación.

Además, el programa informa de muchos otros parámetros. Por un lado, la tasa superficial promedio, tomada directamente de los datos experimentales, y el coeficiente de correlación del ajuste exponencial. De esta forma, se puede determinar la calidad del mismo. Además, arroja otros datos relevantes para la caracterización del haz, tales como la tasa a 5 mm (Gy/min), la tasa a 1 cm del máximo (Gy/min), la capa hemirreductora de agua (mm) o el decaimiento por centímetro.

Aquellos factores que se utilizan para finalizar el análisis de los aplicadores son la tasa superficial de ajuste y el coeficiente de atenuación. Por lo tanto, se agrupan en un documento aparte para su posterior uso. El procedimiento descrito se repite para el resto de parejas de ángulos.

3.6. Obtención de las dosis de profundidad porcentual (PDD).

Las curvas obtenidas mediante el ajuste exponencial de tasa de dosis-profundidad se archivan en un documento (Figura 3.9). El documento consta de cinco tablas, una para cada aplicador, con una columna para cada ángulo, desde 70° a 180° para los SP-35, SP-40 y SP-45, y desde 50° a 180° para el SP-50 y SP-55. En general, para los primeros aplicadores, los ángulos de 40° y 50° suponen ajustes con coeficientes de correlación

bajos. Además, en estas direcciones no emiten radiación directamente sobre el lecho, sino sobre la piel.

The figure displays three sections of an Excel spreadsheet, one for each applicator: SP35, SP40, and SP45. Each section contains a table with columns for depth (Profundidad) and dose rate (Tasa de dosis) at different depths (0, 5, 10, 20 mm, and PIEL). The dose rate is calculated based on the surface dose rate and the attenuation coefficient. To the right of each section, there are two summary boxes: one for 'dosis tiempo' (dose time) and another for a comparison of applicators, showing the time required for each applicator to deliver a specific dose to a 5 cm surface area and the PIEL.

Figura 3.9: Parte del Excel para el cálculo de tiempos de disparo.

Al inicio de la columna correspondiente a una dirección determinada, se indican la tasa de dosis superficial por ajuste y el coeficiente de atenuación. Conociendo el valor de dosis sobre la piel, es decir, a cero milímetros de profundidad, el archivo calcula el resto de tasas desde los 5 mm hasta los 20 mm, aumentando de cinco en cinco.

Obtenidos todos los datos de dosis a distintas profundidades y conocida la dosis deseada, se determina el tiempo que debe durar el disparo para ello (Ecuación 3.4 y 3.5).

$$t = \frac{4 \cdot 12,5}{D_{70} + D_{90} + D_{130} + D_{180}} \quad (3.4)$$

$$t = \frac{5 \cdot 12,5}{D_{50} + D_{70} + D_{90} + D_{130} + D_{180}} \quad (3.5)$$

Tal como se puede observar, se calcula la media de tasas del aplicador a esa profundidad y se divide entre el valor deseado. Al estar dividiendo Gy entre Gy/min, el resultado final se arroja en minutos.

4. Análisis de resultados.

The following sections analyze the different results obtained during the calibration of the ioRT-50 intraoperative radiotherapy device. Due to the huge amount of data, we proceed as follows. In total there are five applicators, with sixteen films radiated for each and with eleven selected angles. Therefore, for each applicator you have 176 angles, grouped into series of four films. The study for a series of the SP-45 applicator is explained below in detail, while the graphs for the rest are attached in the annex at the end of this document.

El proceso seguido se representa en forma de diagrama de flujo para una visualización más clara (Figura 4.1).



Figura 4.1: Obtención del tiempo de disparo.

4.1. Radiado y escaneo de las películas SP-45.

Para el aplicador esférico SP-45 se radiaron dieciséis películas, agrupadas en dos series de ocho. La primera serie se realizó el día 10 de febrero de 2021 (Figura 4.2), mientras que la segunda corresponde al 10 de marzo del mismo año.

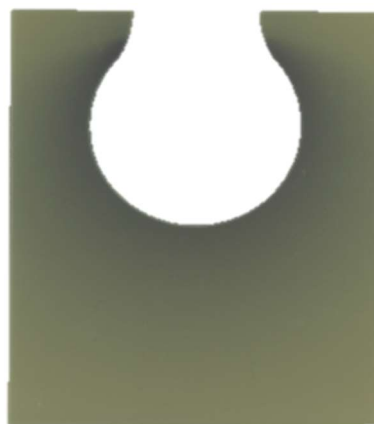


Figura 4.2: Película del SP-45 correspondiente a la primera serie.

Las películas presentan una coloración más oscura en las zonas cercanas al aplicador. A mayor distancia, el oscurecimiento es menos significativo hasta alcanzar regiones del borde de la película donde muy pocos fotones han llegado. Los resultados obtenidos, a juicio del equipo de radiofísica, son óptimos y concuerdan con los de medidas anteriores.

Radiadas todas las necesarias, se esperan las 24 horas para que las películas se estabilicen. Al día siguiente, se obtiene una imagen digital en los tres canales de color. Las películas se escanean de una en una. Haciendo uso de la herramienta correspondiente, se toman los "Plot profile" de cada ángulo. A continuación se muestran los correspondientes a la película número 1.

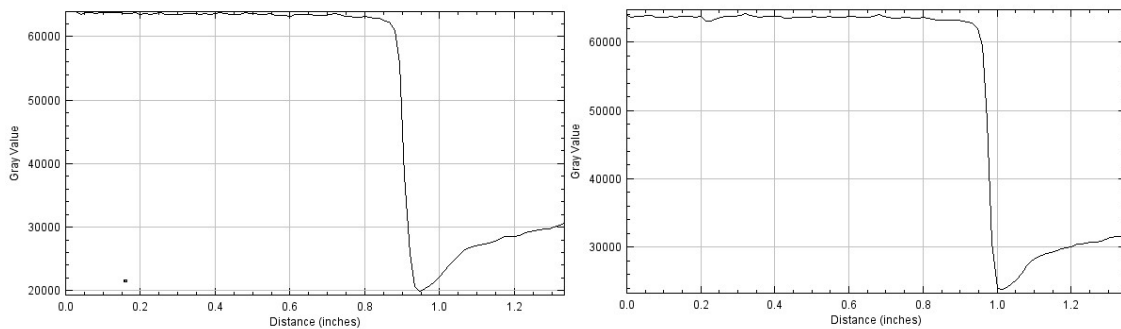


Figura 4.3: Ángulos de 40° (izquierda) y -40° (derecha)

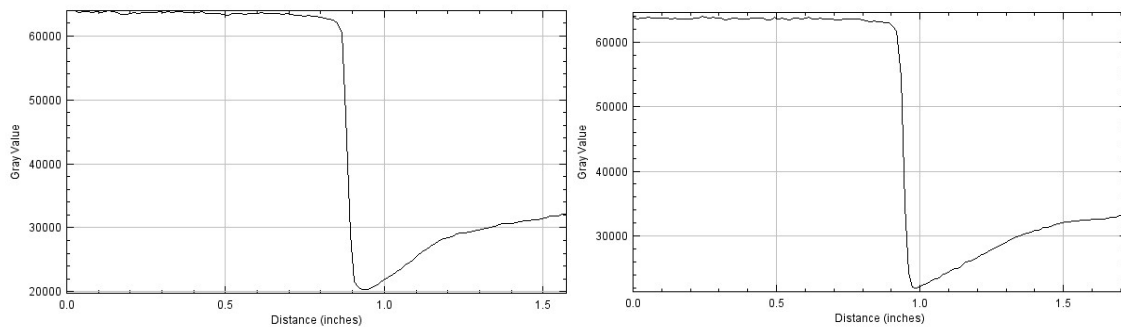


Figura 4.4: Ángulos de 50° (izquierda) y -50° (derecha)

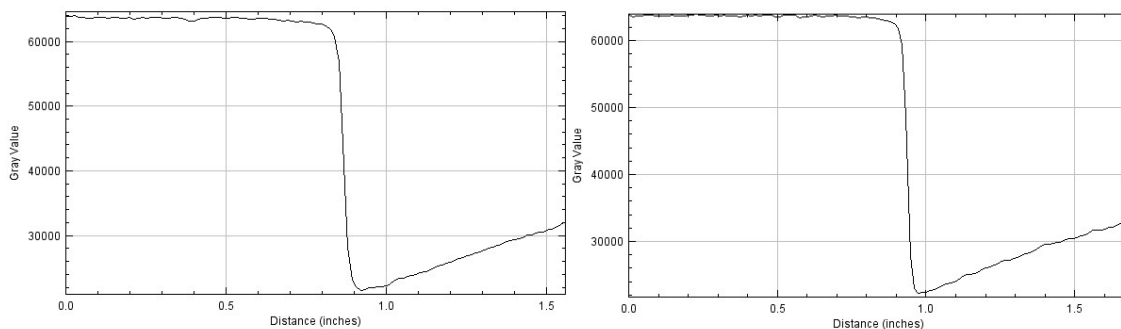


Figura 4.5: Ángulos de 70° (izquierda) y -70° (derecha)

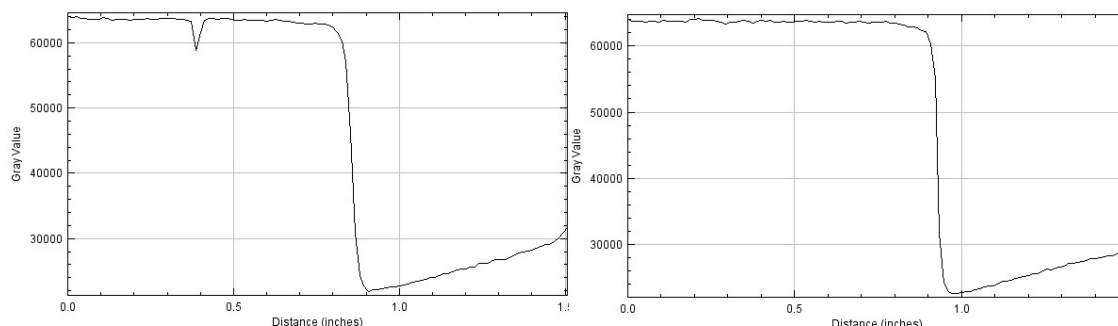


Figura 4.6: Ángulos de 90° (izquierda) y -90° (derecha)

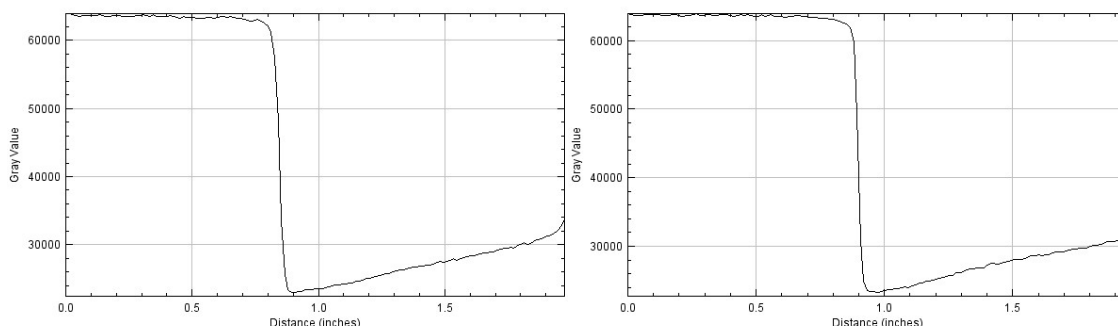


Figura 4.7: Ángulos de 130° (izquierda) y -130° (derecha)

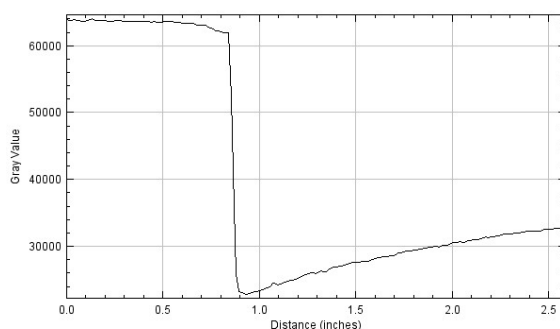


Figura 4.8: Ángulo de 180°

La diferencia en los datos de distancia se debe principalmente a la geometría de las películas. No es lo mismo extender una recta desde el centro de la película hasta su borde con un ángulo de 40° que con uno de 180°. Desde 40° hasta 70° (Figura 4.3, 4.4 y 4.5), el número de valores del eje horizontal aumenta. Al llegar a 90° (Figura 4.6), disminuyen un poco. Cuanto mayor sea el diámetro, el espacio entre el borde de la esfera y el de la película será menor. Por lo tanto, la diferencia es mucho más significativa para los SP-50 y SP-55. A partir de aquí (Figura 4.7 y 4.8), hasta 180°, el número de datos vuelve a aumentar.

4.2.Cálculo de las curvas PDD para el aplicador SP-45.

A partir de las tablas de datos obtenidas al trazar los perfiles para cada ángulo se calculan las curvas exponenciales.

Se presentan a continuación las gráficas obtenidas.

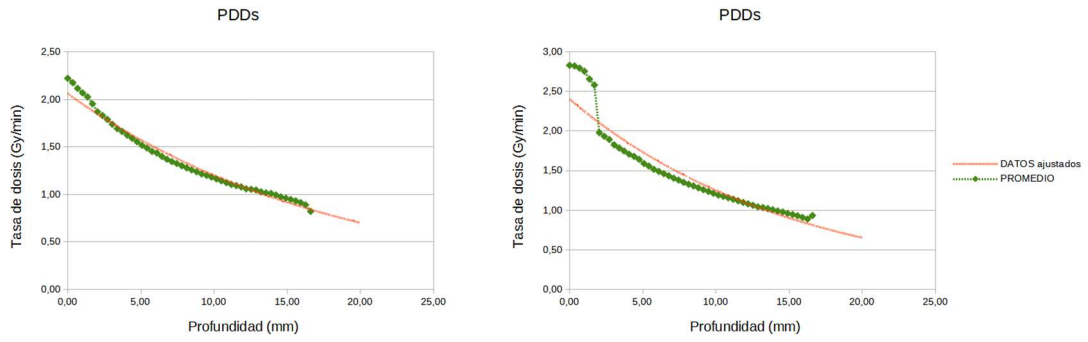


Figura 4.9: PDDs para el ángulo de 70°

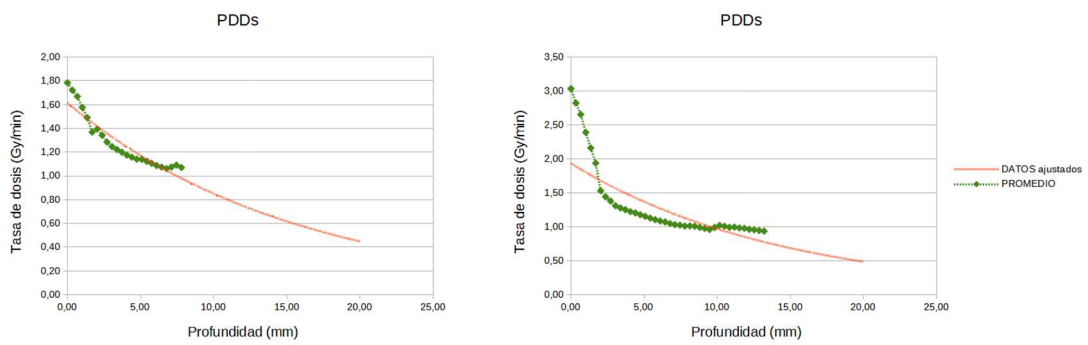


Figura 4.10: PDDs para el ángulo de 40°

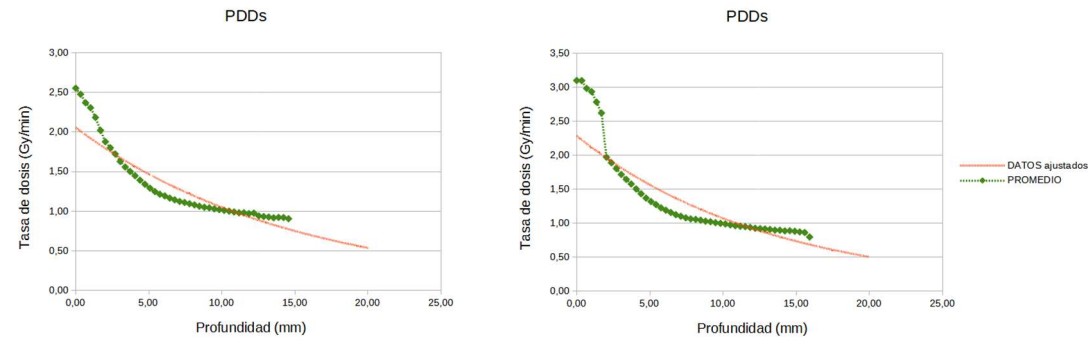


Figura 4.11: PDDs para el ángulo de 50°

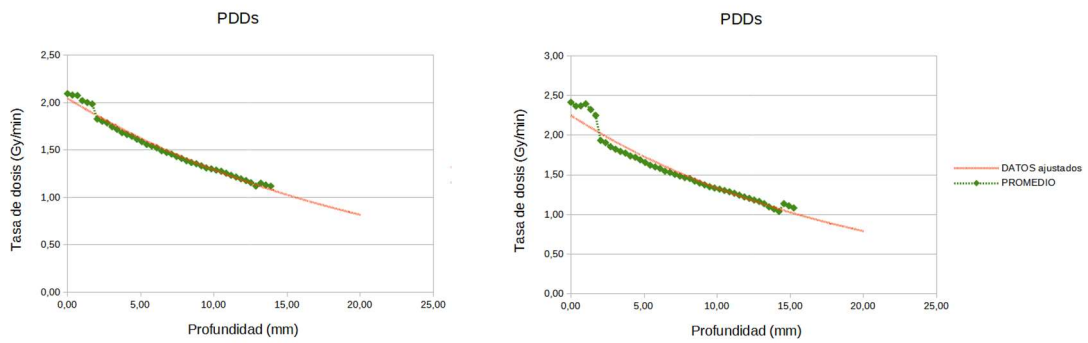


Figura 4.12: PDDs para el ángulo de 90°

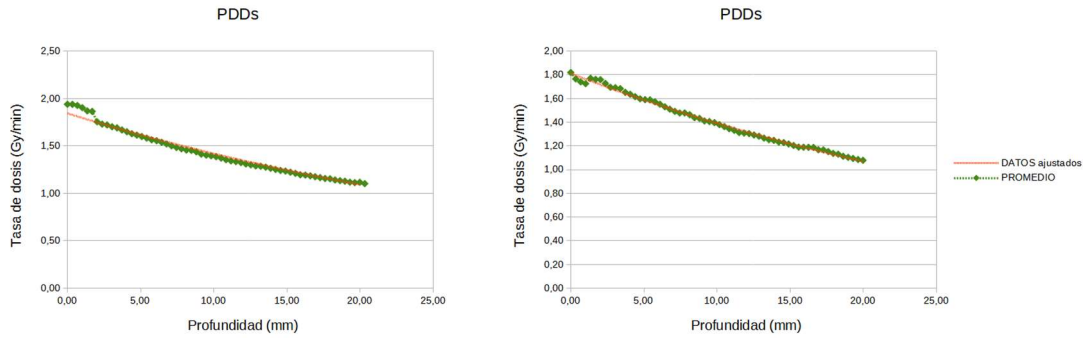


Figura 4.13: PDDs para el ángulo de 130°

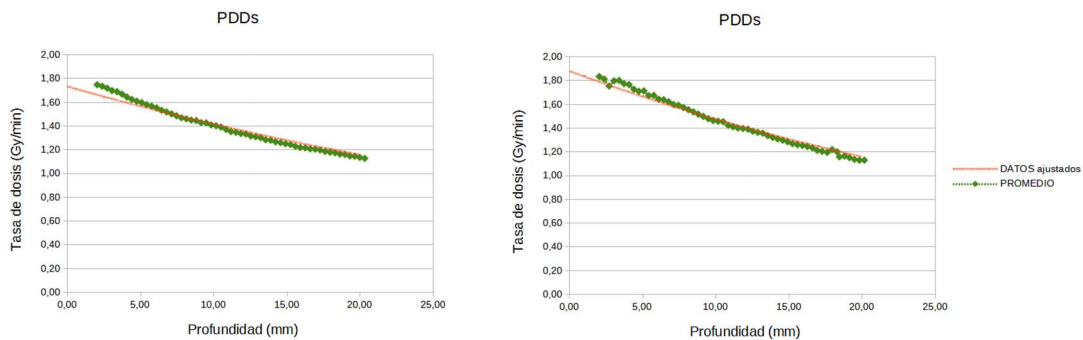


Figura 4.14: PDDs para el ángulo de 180°

Por norma general, las primeras direcciones tienen menor espacio para tomar datos, lo que dificulta un buen proceso de cálculo. Además, también se deben tener en cuenta las características de los aplicadores esféricos. El cilindro metálico envía los fotones en la dirección de 180°. Para que la radiación se distribuya más o menos de manera similar hacia todos los ángulos, las esferas de plástico se diseñan con la base un poco más gruesa con el objetivo de transmitir menos fotones. Así, el resto de ellos puede distribuirse por las demás zonas del aplicador y radiar uniformemente en todas las direcciones. A la hora de radiar, dentro de lo que cabe, esto se cumple. Sin embargo, sólo hasta un cierto ángulo (70°) (Figura 4.9). Para las direcciones de 40° y 50° (Figura 4.10 y 4.11), los resultados tienen una calidad considerablemente menor, a excepción del ángulo de 50° para los aplicadores SP-50 y SP-55, debido a su mayor diámetro.

Existe una tendencia común a todos los ángulos de las distintas películas. Cuanto más cerca se encuentra uno del borde interior de la película, los datos se alejan más de la curva teórica. Esto se debe a que el borde del aplicador no encaja perfectamente con el borde de la película, especialmente en las recortadas a mano. Lo que genera, a su vez, una dificultad para definir la dosis en superficie, que se calcula extrapolando la curva obtenida a partir 2 mm de distancia al aplicador.

El hecho de no tener el borde bien definido genera una incertidumbre en torno a dos milímetros que supone aproximadamente un 5% de la dosis.

Además, hay que tener en cuenta que la calidad del haz varía con la dirección tomada debido al distinto espesor de aplicador. Los fotones emitidos a la dirección de 180° atravesarán más espesor de aplicador que los emitidos en la dirección de 90°, lo que provoca que menos fotones de baja energía salgan en la dirección de 180°. El rendimiento

en profundidad es mayor para los haces que contiene en promedio fotones de mayor energía y es por esto por lo que las curvas a 180° depositan más dosis a profundidades mayores de 1 cm que el resto de ángulos.

4.3. Determinación de los tiempos de disparo del SP-45.

Por cada una de las gráficas, se obtiene un valor de tasa de dosis superficial y de coeficiente de atenuación. Estos parámetros corresponden a los ajustes exponenciales realizados y permiten a continuación obtener los tiempos de cada aplicador. En el documento correspondiente se copian dichos coeficientes, arrojando como resultado las tasas de dosis y las dosis a distintas profundidades, así como los periodos de tiempo. En las siguientes tablas se recogen los resultados correspondientes a la primera serie de ocho películas del aplicador SP-45.

SP-45 (1)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,1	0,054	2	0,046	1,8	0,026	1,7	0,02
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,1		2		1,8		1,7	
5	1,6		1,6		1,6		1,6	
10	1,2		1,3		1,4		1,4	
20	0,7		0,8		1,1		1,2	
	Dosis (Gy)							
0	11,3		11,2		10,1		9,5	
5	8,6		8,9		8,8		8,6	
10	6,6		7,1		7,8		7,7	
20	3,8		4,5		6		6,3	

SP-45 (2)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,4	0,065	2,3	0,052	1,8	0,026	1,9	0,024
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,4		2,3		1,8		1,9	
5	1,7		1,7		1,6		1,7	
10	1,2		1,3		1,4		1,5	
20	0,6		0,8		1,1		1,2	
	Dosis (Gy)							
0	11,3		10,6		8,5		8,8	
5	8,1		8,1		7,4		7,8	
10	5,9		6,2		6,5		6,9	
20	3		3,7		5		5,4	

Tabla 4.1: Tasa de dosis y dosis para la primera serie del aplicador SP-45.

Los valores de tasa de dosis superficial presentan un comportamiento descendente en relación al ángulo de incidencia (Tabla 4.1), debido a las características de la esfera del aplicador, tal como se comentó anteriormente.

Una vez calculados los datos necesarios a distintas profundidades, se puede estimar el tiempo de disparo para aplicar una dosis determinada a 5 mm de profundidad, donde se pretende prescribir para los tratamientos de pacientes. Aplicando la ecuación correspondiente al aplicador SP-45, se obtienen los tiempos de disparo (Tabla 4.2).

Dosis (Gy)	12,5
Tiempo 1 (min)	7,85
Tiempo 2 (min)	7,45

Tabla 4.2: Tiempos de disparo.

En las tablas mostradas a continuación figuran los valores de tasa de dosis del aplicador SP-45 correspondientes a esta calibración y a la anterior, así como los tiempos calculados (Tabla 4.13). Para comparar ambos procesos, se seleccionan las direcciones de 90° y 180° a modo representativo.

Profundidad (mm)	SP-45					
	<i>90 Anterior</i>		<i>90 (1)</i>		<i>90 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,7	0,084	3,1	0,077	2,3	0,052
0	2,7		3		2,3	
5	1,7		2,2		1,7	
10	1,1		1,6		1,3	
20	0,5		0,9		0,8	
	<i>180 Anterior</i>		<i>180 (1)</i>		<i>180 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,1	0,041	1,7	0,024	1,9	0,024
0	2,1		2,5		1,9	
5	1,7		2,1		1,7	
10	1,4		1,8		1,5	
20	0,9		1,4		1,2	
Tiempo (min)	7,37		7,85		7,45	

Tabla 4.3: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

Tal como se puede apreciar, los resultados, dentro de un rango de error, son muy similares. Por norma general, los valores de dosis presentan una disminución respecto a los de la caracterización del año anterior, pudiera ser debido al desgaste del aparato. Es probable que en los próximos procesos sean aun menores.

Una vez finalizado el proceso, los nuevos valores de calibración se incluyen en los ficheros Excel usados en el proceso de radioterapia intraoperatoria. De esta manera, el Oncólogo Radioterápico encargado durante la intervención quirúrgica sólo tiene que

acudir al documento y leer el tiempo necesario para una dosis deseada a 5 mm de profundidad. Mientras el equipo está operativo, con el objetivo de asegurar su correcto funcionamiento, se llevarán a cabo calibraciones menos exhaustivas antes de cada operación y otra de carácter mensual.

5. Radioterapia intraoperatoria.

The calibration of the device is just one more task of all those carried out by the HUC Radio physics team. The use and supervision of this in the operating room is also key in the work done. Therefore, for the student to know in greater detail the work of a radio physicist, it is proposed to participate in a removal of breast cancer from the same as an observer. The experience and procedures carried out are detailed below.

El ioRT-50 es un equipo diseñado para radioterapia intraoperatoria y superficial. Entre sus usos se encuentra el tratamiento de cáncer de mama durante la tumorectomía. Se extrae el tumor a la paciente y luego se imparte una dosis de radiación en el lecho, con el objetivo de eliminar posibles células cancerígenas que hayan quedado en la zona. Tratamientos así permiten ahorrar a la paciente sesiones de radioterapia posteriores que pueden durar varios meses, lo que implica una mejora no sólo física, sino también mental. Este aspecto es, quizás, uno de los más importantes del ioRT-50.

La caracterización del equipo es sólo una tarea más de todas las llevadas a cabo por el equipo de Radiofísica del HUC. El uso y supervisión de este en el quirófano también es clave en el trabajo realizado. Por lo tanto, con el objetivo de que el alumno conozca con mayor detalle el trabajo de un radiofísico, se propone la participación en una intervención como observador. A continuación se detalla la experiencia y los procedimientos llevados a cabo.

Las operaciones de extirpación de un tumor normalmente se programan para primera hora de la mañana. En general se trata de un proceso que dura varias horas y en el que intervienen numerosos especialistas de distintos ámbitos. Sin especificar demasiado, este tipo de intervenciones se pueden dividir en tres fases. En la primera, un equipo de médicos, compuesto por el ginecólogo cirujano, anestesista y demás, se encarga de realizar la incisión en el pecho de la paciente y comenzar a extraer el tumor. Luego, el equipo de medicina nuclear, equipado con un detector de radiación, se encarga de determinar las zonas afectadas por el tumor para su posterior extracción. La radiación detectada procede de un radiofármaco inyectado en el sistema linfático de la paciente el día anterior, entre cuyos ingredientes se encuentran isótopos de tecnecio radioactivo. El compuesto, debido a sus propiedades químicas, se adhiere a las células cancerígenas. Finalmente, una vez el tumor ha sido extraído, así como los posibles ganglios afectados, el equipo de radiología coloca el aplicador esférico del ioRT-50 en el lecho tumoral y aplica la dosis terapéutica en el lecho quirúrgico.

Sin embargo, previo a la irradiación del lecho quirúrgico los radiofísicos verifican el funcionamiento correcto del equipo. Para ello se realiza una verificación breve, mucho más sencilla y rápida que las anteriores. El proceso no suele durar más de media hora y

se realiza en la misma sala que la toma de medidas, lugar donde se encuentra el ioRT-50 habitualmente.

Basándose en los datos de la anterior verificación anual, la comprobación preoperatoria sólo consiste en comprobar la relación carga-tiempo. Tal como se comentó antes, la relación entre ambas magnitudes es lineal. De esta manera, se realizan disparos de quince segundos, un minuto y cuatro minutos para verificar la linealidad. Sobre un carrito metálico se colocan siete láminas de agua sólida de 1 cm de grosor y una superior de iguales características pero con un hueco donde ubicar la cámara de ionización. El aplicador usado es el cilíndrico de 30 mm de diámetro, al igual que durante la obtención de la curva de referencia. La cámara se coloca en la superficie del aplicador, no se utiliza la lámina de 5 mm, por lo que la carga detectada por la cámara será más alta en todos los tiempos.

Así, se comienza con los disparos y se anotan en la hoja de verificación preoperatoria y en la de la propia paciente. La primera almacena los resultados obtenidos durante las calibraciones previas, de tal forma que se pueda comprobar la validez de los datos experimentales. Aunque los valores no se pasan de Culombios a Gray, sí se realiza la corrección de presión y temperatura mediante el parámetro k_{PT} , por lo que se miden ambas magnitudes mediante el termómetro y el barómetro.

Insertados los datos en el documento Excel, se obtienen tanto la pendiente de la recta como su índice de correlación. Salvo algún fallo puntual, normalmente dicho parámetro tiene valores entre 0,99 y 1. Para terminar la calibración, se realiza un disparo con un ángulo de 45°, considerando 0° como la posición donde el tubo del ioRT-50 y las láminas de agua sólida son perpendiculares. Se trata de un proceso que, aunque no es indispensable, sí puede servir de ayuda para detectar errores que no ocurren en otra disposición.

Comprobando que todos los valores obtenidos durante la calibración no varíen mucho respecto a anteriores estudios, se procede a esperar hasta la llamada a quirófano por parte del equipo médico. Mientras tanto, se traslada el ioRT-50 hasta la sala exterior a la zona de intervención.

Una vez la extracción del tumor ha sido finalizada, el equipo de medicina nuclear comienza a estudiar la región de la mama para detectar las partes de la paciente a las que se han adherido los isótopos de tecnecio. En el caso de que haya más zonas afectadas, el cirujano las extrae. Una vez se ha preparado el lecho tumoral para la aplicación del ioRT-50, interviene el equipo de radioterapia. La región a tratar ya ha sido preparada convenientemente, quedando únicamente un orificio en la piel de la paciente para introducir el aplicador esférico.

El tamaño del lecho tumoral varía en función del pecho de la paciente y del tamaño del tumor, por lo que primero es necesario determinar el aplicador a usar. Introduciendo los distintos aplicadores dentro del pecho y a través del orificio en la piel se elige el más

adecuado (Figura 5.1 y 5.2). Seleccionado este, se monta en el ioRT-50 y se ubica para estar en contacto con el lecho tumoral. Se enciende el equipo y se configura para conectarlo con el software RadControl-II. Por último, se colocan cuatro películas sobre la paciente, dos en el pecho afectado y dos en la cara. Al día siguiente, mediante el análisis de las mismas, se determinará cuánta radiación ha recibido.



Figura 5.1: Introducción del aplicador esférico en el pecho.

A continuación el equipo al completo abandona el quirófano y se cierran las puertas, diseñadas para no dejar pasar la radiación. En la sala inmediatamente contigua, la misma donde se ubicó el ioRT-50 al principio, se ejecuta el software desde un ordenador portátil y se programa el disparo. Además, para mantener vigiladas las constantes vitales de la paciente, se conecta a otro ordenador una webcam ubicada en el quirófano y enfocada al monitor.



Figura 5.2: Disposición para radioterapia intraoperatoria.

Haciendo uso de los datos de la última calibración, se determina cuánto tiene que durar el disparo con el aplicador seleccionado para que la dosis sea de 12,5 Gy. En este caso, el tiempo es de siete minutos aproximadamente. Finalizado, se accede de nuevo al quirófano, se retira el ioRT-50 y se recogen las películas radiadas para su posterior

análisis (Figura 5.3). Por su parte, el equipo médico cose el orificio en el pecho, terminando así la operación.

Al día siguiente, una vez las películas se han estabilizado, se procede a analizarlas mediante el software ImageJ. Se estudian de idéntica manera a las radiadas para determinar la curva de referencia. Con la herramienta ROI circular, se selecciona la región más oscurecida y uniforme, tomando la media como el valor de píxel y la desviación estándar como el error. Se repite el proceso para las cuatro películas. Mediante un ajuste exponencial, utilizando los parámetros calculados en la última caracterización, se transforman los valores de oscurecimiento en dosis y se calcula su error. De esta manera, el equipo de radiofísica determina cuánta radiación ha recibido la piel cercana a la zona de la intervención y los ojos de la paciente.

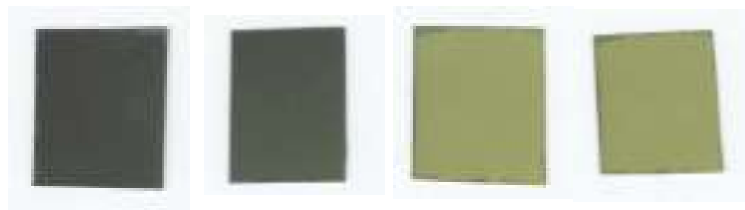


Figura 5.3: Películas radiadas durante la operación. Las dos de la izquierda, ubicadas en el pecho. Las dos de la derecha, bajo los ojos.

Los valores obtenidos, en Gy, no suelen suponer un riesgo para la paciente. Sin embargo, siempre es necesaria su comprobación (Tabla 5.1). Las dosis han sido calculadas con un ajuste exponencial (Ecuación 5.1).

$$Dosis = APíxel^B \quad (5.1)$$

MEDIDAS INTRAOPERATORIA				
	Lámina	VALOR PÍXEL	Desviación estándar	Ajuste exponencial (Gy)
PIEL	1	20651	425	3,1
	2	21558	473	2,8
Ojos	3	28328	453	1,3
	4	42978	235	0,2

A=	32,928
B=	0,0001139

Tabla 5.1: Análisis de las películas.

De esta manera, se finaliza la experiencia de radioterapia intraoperatoria, habiendo experimentado de primera mano la utilización en el quirófano del equipo a caracterizar. Una práctica que sirve para descubrir con mayor detalle el papel de un radiofísico en el hospital, indispensable de cara al futuro.

6. Conclusiones.

The results obtained during the calibration of the ioRT-50 largely coincide with those expected, as well as with those corresponding to previous annual calibrations. The behavior of the applicators has not changed greatly, which in turn demonstrates a good condition of the device.

Los resultados obtenidos durante la caracterización del ioRT-50 coinciden en gran medida con los esperados, así como con los correspondientes a caracterizaciones anteriores. El comportamiento de los aplicadores no ha variado en gran medida, lo que demuestra a su vez una buena condición del equipo.

La adquisición de este equipo para radioterapia intraoperatoria por parte del Hospital Universitario de Canarias ha supuesto un importante avance en el tratamiento del cáncer de mama. Mediante los aplicadores quirúrgicos esféricos, el servicio de Radioterapia puede ofrecer esta alternativa de tratamiento a muchas pacientes de cáncer de mama.

Además, el trabajo realizado ha servido para acercar al alumno al campo de la radiofísica, una región de la Física sin explorar durante los años de carrera. Conocer de primera mano las características más importantes de este departamento ha sido una experiencia de lo más enriquecedora que, sin lugar a duda, será difícil de olvidar.

7. Bibliografía.

- [1] Asociación Española contra el Cáncer (2017): Todo sobre el cáncer de mama, <https://www.aecc.es/es/todo-sobre-cancer/tipos-cancer/cancer-mama>
- [2] Sociedad Española de Física Médica: ¿Qué es la SEFM?, https://sefm.es/que_es_la_sefm/
- [3] Eckert & Ziegler (2019): Eckert & Ziegler BEBIG celebra 20 años de la braquiterapia LDR con la implantación de semillas de I.125 para el tratamiento del cáncer de próstata en el XX Congreso de la SEOR, https://www.bebig.com/home/press/press_releases/?user_hugin_pi1%5BCMD%5D=singleView&user_hugin_pi1%5BshowUid%5D=2235499&user_hugin_pi1%5Bpage%5D=0&user_hugin_pi1%5Byear%5D=2019&cHash=72b649ea79d67b7700b1993a64435dd7
- [4] ConSalud.es (2020): El HUC incorpora radioterapia intraoperatoria para pacientes con cáncer de mama, https://www.consalud.es/autonomias/canarias/huc-incorpora-radioterapia-intraoperatoria-pacientes-cancer-mama_75081_102.html
- [5] Röntgen, W (1896): On a New Kind of Rays, <https://www.nature.com/articles/053274b0>
- [6] Grubbé, E (1933): Priority in the Therapeutic Use of X-Rays, <https://pubs.rsna.org/doi/pdf/10.1148/21.2.156>
- [7] Abe M, Shibamoto Y, Ono K, Takahashi M (1991): Intraoperative radiation for carcinoma of the stomach and pancreas, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1908417>
- [8] Curry T, Dowdey J, Murry R (1974): Christensen's Physics of Diagnostic Radiology, https://books.google.es/books?id=W2PrMwHqX10C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [9] Tekin O.H (2016): Analysis of filtering material and its effect on x-ray features by using Monte Carlo method for medical imaging applications, https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-x-ray-tube-and-position-of-anode_fig1_304620438
- [10] Sethi A, Emami B, Small Jr W, Thomas T.O (2018): Intraoperative Radiotherapy with INTRABEAM: Technical and Dosimetric Considerations, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fonc.2018.00074/full>
- [11] IAEA (2005): Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS_398s_Web.pdf

- [12] Fimecorp International S.L: EBT3, <http://fimecorp.com/ebt3-2/>
- [13] Wikipedia: ImageJ, <https://en.wikipedia.org/wiki/ImageJ>
- [14] Wikipedia: National Institutes of Health, https://en.wikipedia.org/wiki/National_Institutes_of_Health
- [15] Certificado de calibración No. 1903325 (2019) emitido por la empresa PTW.
- [16] Test de aceptación (2019) emitido por la empresa Womed.

I. Anexo.

a) Aplicador SP-35.

i) Serie 1:

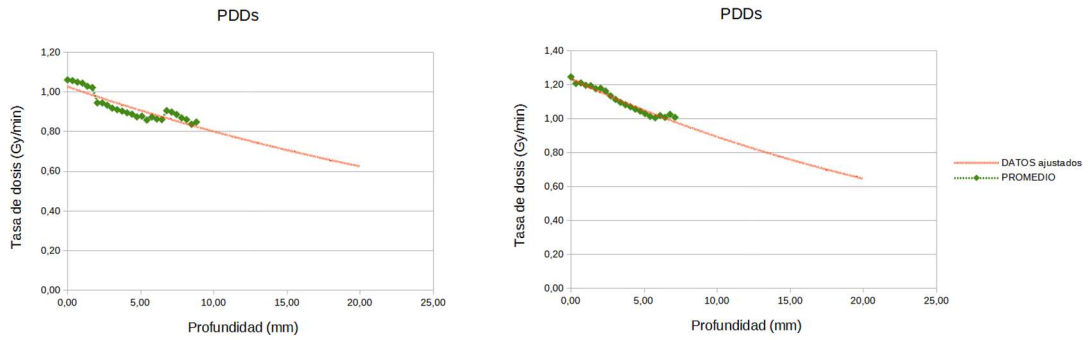


Figura A.1: Ángulo de 40°

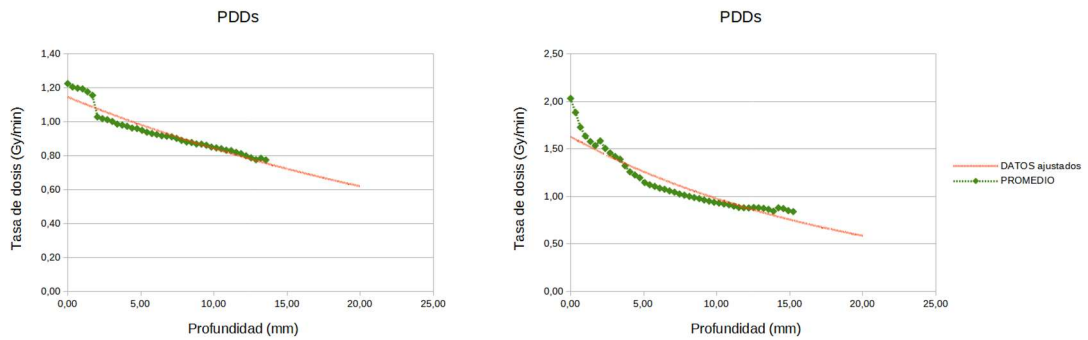


Figura A.2: Ángulo de 50°

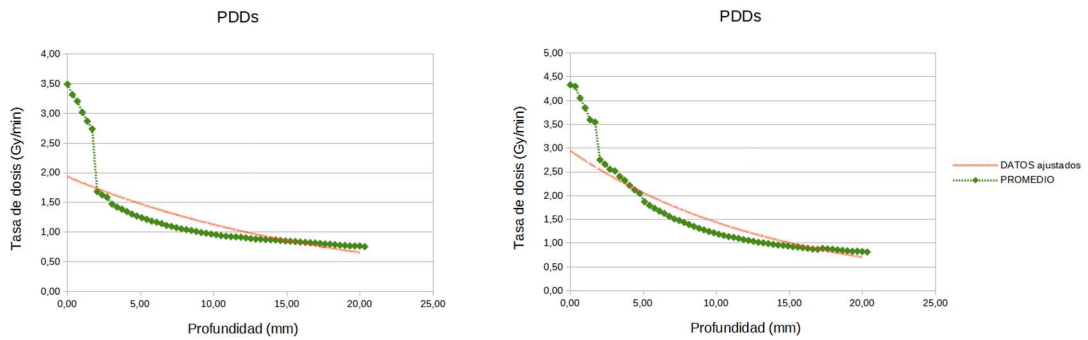


Figura A.3: Ángulo de 70°

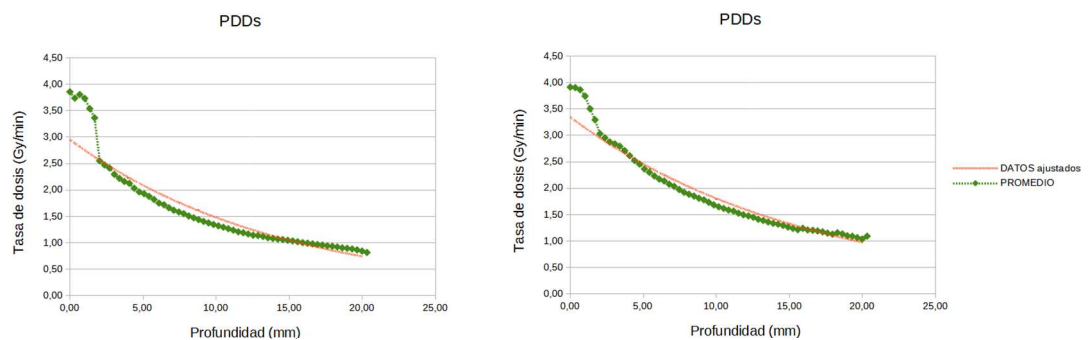


Figura A.4: Ángulo de 90°

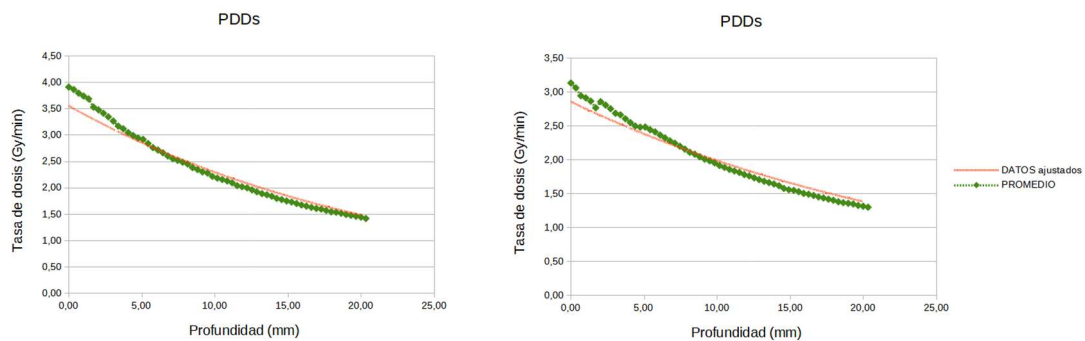


Figura A.5: Ángulo de 130°

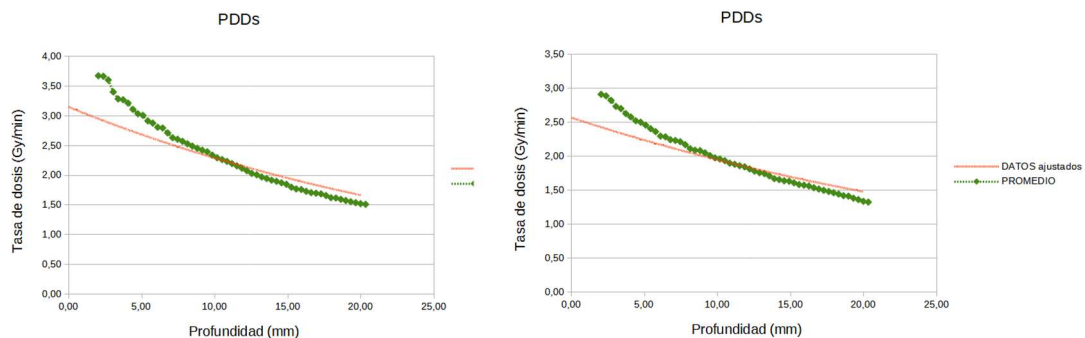


Figura A.6: Ángulo de 180°

SP-35 (1)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,9	0,054	3	0,069	3,6	0,044	3,2	0,032
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,9		3		3,6		3,2	
5	2,2		2,1		2,9		2,7	
10	1,7		1,5		2,3		2,3	
20	1		0,7		1,5		1,7	
	Dosis (Gy)							
0	14,8		14,9		18		16	
5	11,3		10,6		14,5		13,6	
10	8,7		7,5		11,6		11,6	
20	5		3,7		7,5		8,4	

SP-35 (2)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,9	0,072	3,3	0,054	2,9	0,036	2,6	0,028
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,9		3,3		2,9		2,6	
5	2,1		2,5		2,4		2,2	
10	1,4		1,8		2		1,9	
20	0,7		1		1,4		1,5	
	Dosis (Gy)							
0	16,1		18,3		15,7		14,1	
5	11,3		13,4		13,1		12,3	
10	7,9		9,9		10,9		10,7	
20	3,8		5,3		7,6		8,1	

Tabla A.1: Tasa de dosis y dosis para la primera serie del aplicador SP-35.

SP-35						
Profundidad (mm)	90 Anterior		90 (1)		90 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	3,9	0,085	3	0,069	3,3	0,062
0	3,9		3		3,3	
5	2,5		2,1		2,5	
10	1,7		1,5		1,8	
20	0,7		0,7		1	
	180 Anterior		180 (1)		180 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	3,9	0,054	3,9	0,054	2,6	0,028
0	3,9		3,9		2,6	
5	3		3		2,2	
10	2,3		2,3		1,9	
20	1,3		1,3		1,5	
Tiempo (min)	4,69		5,03		5,48	

Tabla A.2: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

ii) Serie 2:

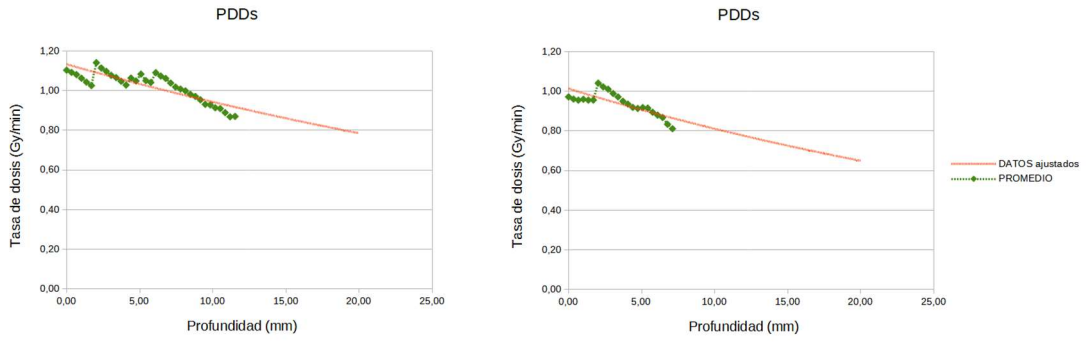


Figura A.7: Ángulo de 40°

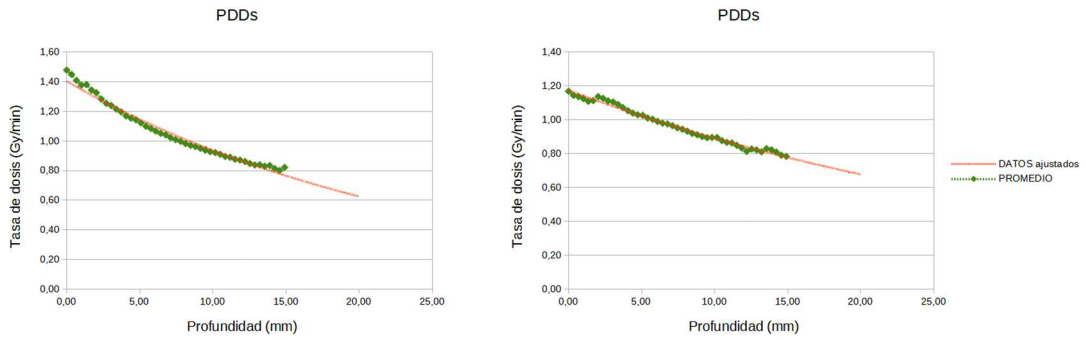


Figura A.8: Ángulo de 50°

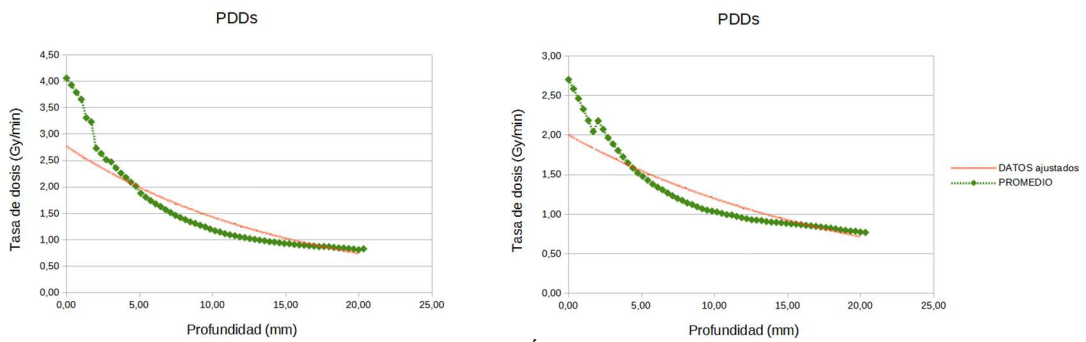


Figura A.9: Ángulo de 70°

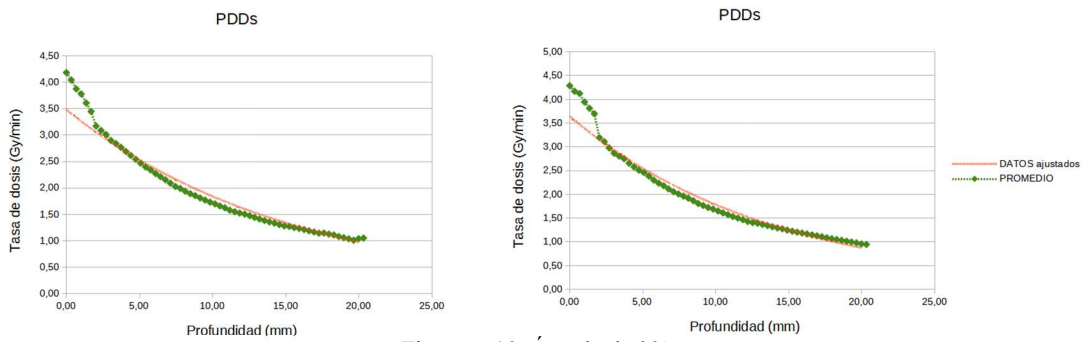


Figura A.10: Ángulo de 90°

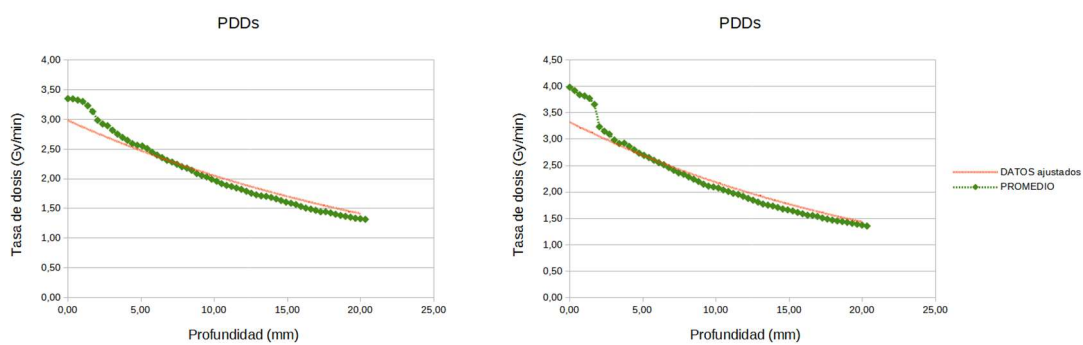


Figura A.11: Ángulo de 130°

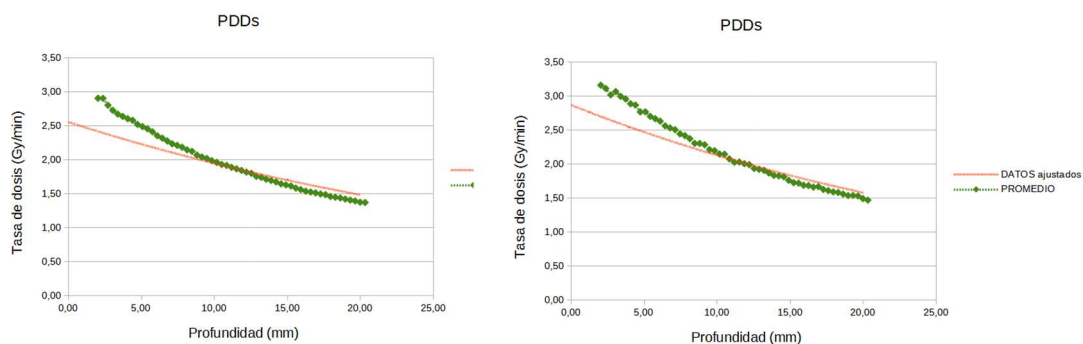


Figura A.12: Ángulo de 180°

SP-35 (1)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,8	0,066	3,5	0,064	3	0,037	2,6
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,8		3,5		3		2,6	
5	2		2,5		2,5		2,2	
10	1,4		1,8		2,1		2	
20	0,7		1		1,4		1,5	
	Dosis (Gy)							
0	15		18,9		16,2		13,9	
5	10,8		13,7		13,4		12,1	
10	7,7		10		11,1		10,6	
20	4		5,3		7,6		8,1	

SP-35 (2)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2	0,052	3,6	0,072	3,3	0,042	2,9
Tasa de dosis (Gy/min)								
0	2		3,6		3,3		2,9	
5	1,5		2,5		2,7		2,5	
10	1,2		1,8		2,2		2,1	
20	0,7		0,9		1,4		1,6	
Dosis (Gy)								
0	10,8		19,7		17,9		15,5	
5	8,4		13,8		14,5		13,4	
10	6,5		9,6		11,8		11,5	
20	3,9		4,7		7,7		8,5	

Tabla A.3: Tasa de dosis y dosis para la segunda serie del aplicador SP-35.

SP-35						
Profundidad (mm)	90 Anterior		90 (1)		90 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		3,9	0,085	3,5	0,064	3,6
0	3,9		3,5		3,6	
5	2,5		2,5		2,5	
10	1,7		1,8		1,8	
20	0,7		1		0,09	
180 Anterior						
180 (1)						
180 (2)						
Profundidad (mm)	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	3,9	0,054	2,6	0,027	2,9	0,03
	0	3,9		2,6		2,9
5	3		2,2		2,5	
10	2,3		2		2,1	
20	1,3		1,5		1,6	
Tiempo (min)	4,69		5,42		5,4	

Tabla A.4: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

b) Aplicador SP-40.

i) Serie 1:

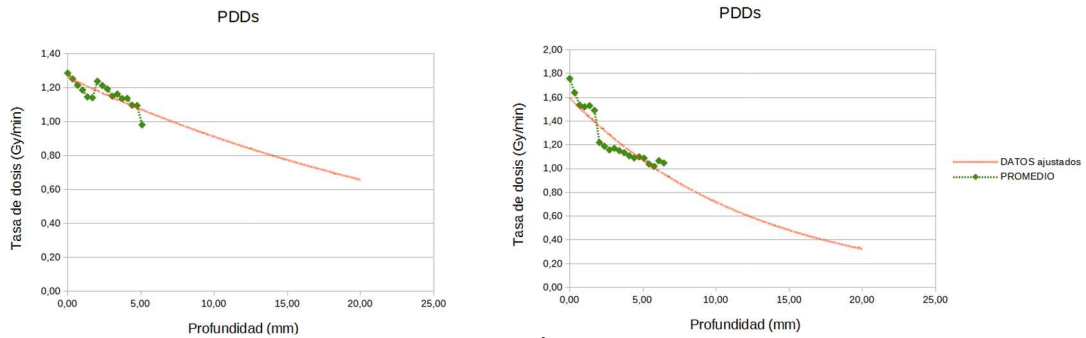


Figura A.13: Ángulo de 40°

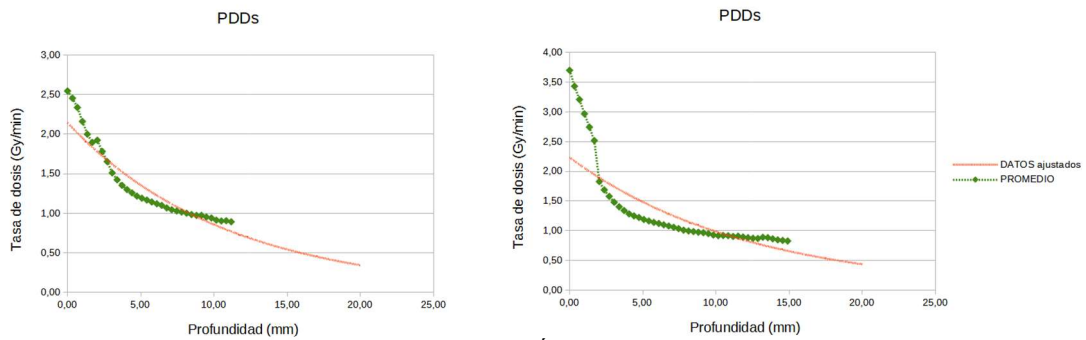


Figura A.14: Ángulo de 50°

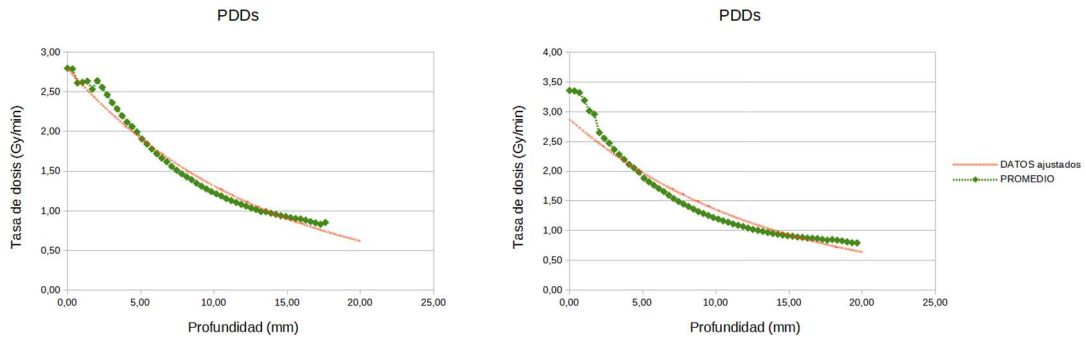


Figura A.15: Ángulo de 70°

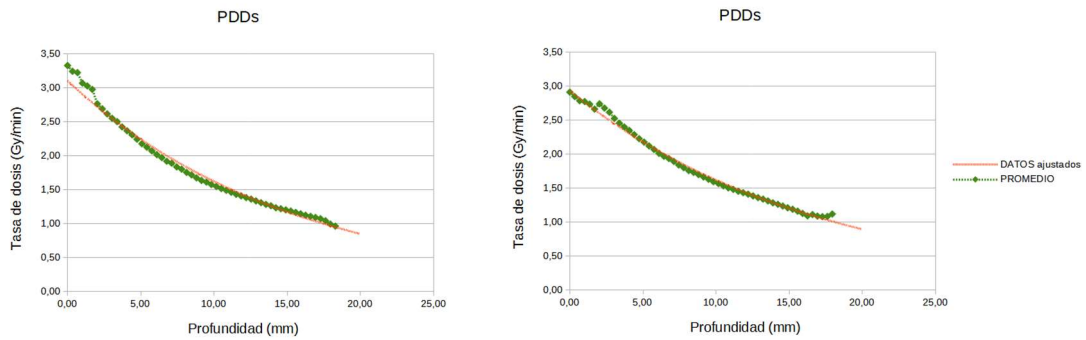


Figura A.16: Ángulo de 90°

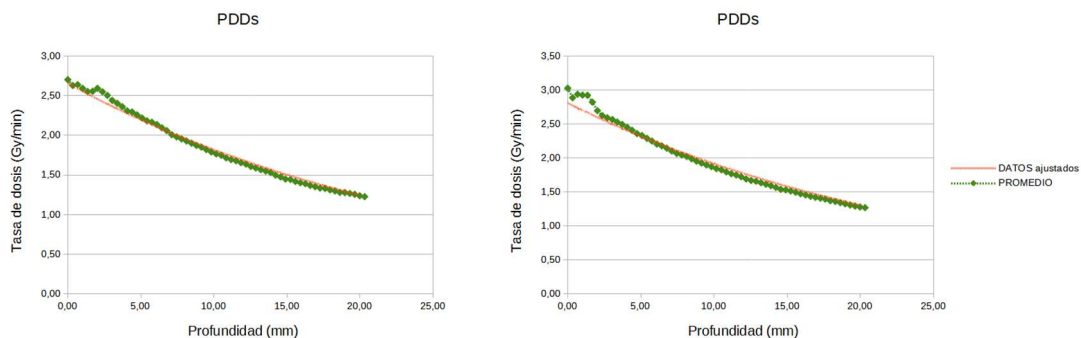


Figura A.17: Ángulo de 130°

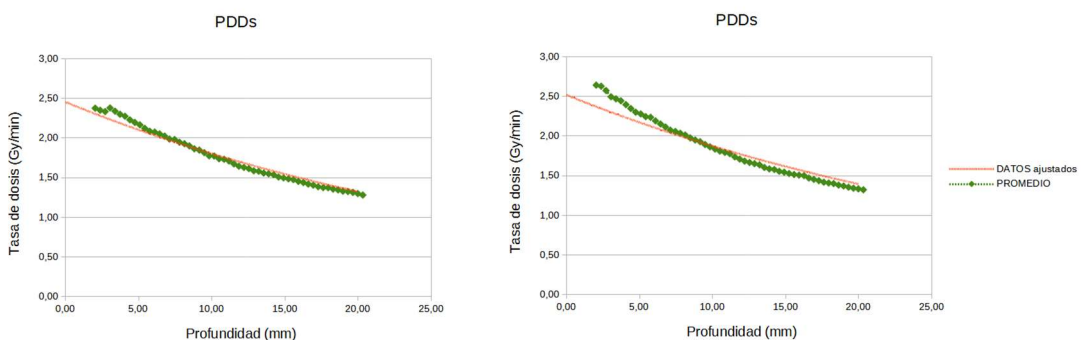


Figura A.18: Ángulo de 180°

SP-40 (1)									
Profundidad (mm)	70		90		130		180		
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	
		2,8	0,075	2,9	0,06	2,7	0,038	2,5	0,031
	Tasa de dosis (Gy/min)								
0	2,8		2,9		2,7		2,5		
5	1,9		2,2		2,2		2,1		
10	1,3		1,6		1,8		1,8		
20	0,6		0,9		1,2		1,3		
	Dosis (Gy)								
0	14		14,7		13,4		12,3		
5	9,6		10,9		11,1		10,5		
10	6,6		8,1		9,1		9		
20	3,1		4,5		6,3		6,6		

SP-40 (2)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,9	0,075	3,1	0,065	2,8	0,038	2,5
Tasa de dosis (Gy/min)								
0	2,9		3,1		2,8		2,5	
5	2		2,2		2,3		2,2	
10	1,4		1,6		1,9		1,9	
20	0,6		0,8		1,3		1,4	
Dosis (Gy)								
0	15,7		17		15,4		13,8	
5	10,8		12,3		12,7		11,9	
10	7,4		8,9		10,5		10,3	
20	3,5		4,6		7,1		7,6	

Tabla A.5: Tasa de dosis y dosis para la primera serie del aplicador SP-40.

SP-40						
Profundidad (mm)	90 Anterior		90 (1)		90 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		3,3	0,083	2,9	0,06	3,1
0	3,3		2,9		3,1	
5	2,2		2,2		2,2	
10	1,5		1,6		1,6	
20	0,6		0,9		0,8	
180 Anterior		180 (1)		180 (2)		
Do	mu	Do	mu	Do	mu	
2,9	0,046	2,5	0,031	2,5	0,03	
0	2,9		2,5		2,5	
5	2,3		2,1		2,2	
10	1,8		1,8		1,9	
20	1,1		1,3		1,4	
Tiempo (min)	5,81		5,96		5,75	

Tabla A.6: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

ii) Serie 2:

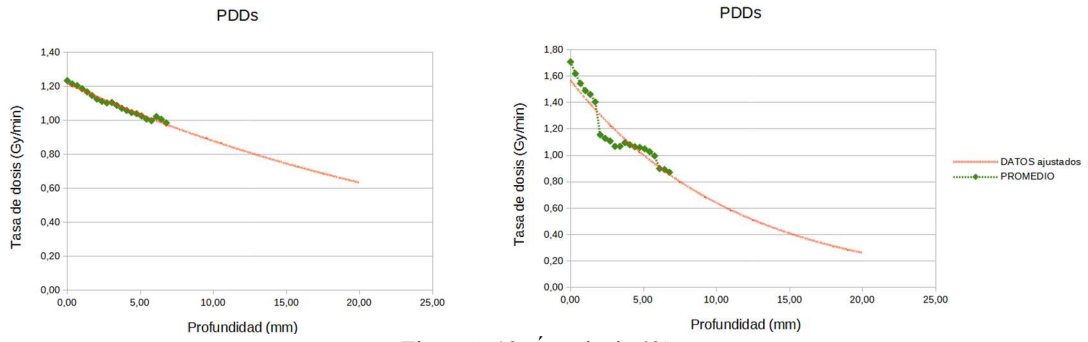


Figura A.19: Ángulo de 40°

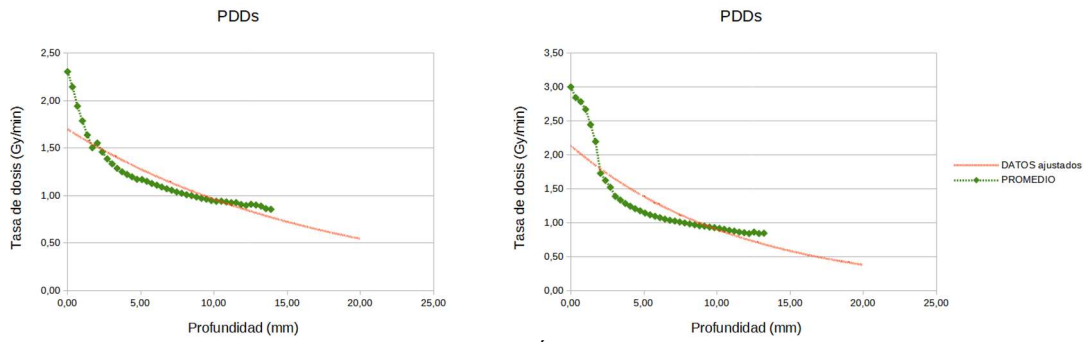


Figura A.20: Ángulo de 50°

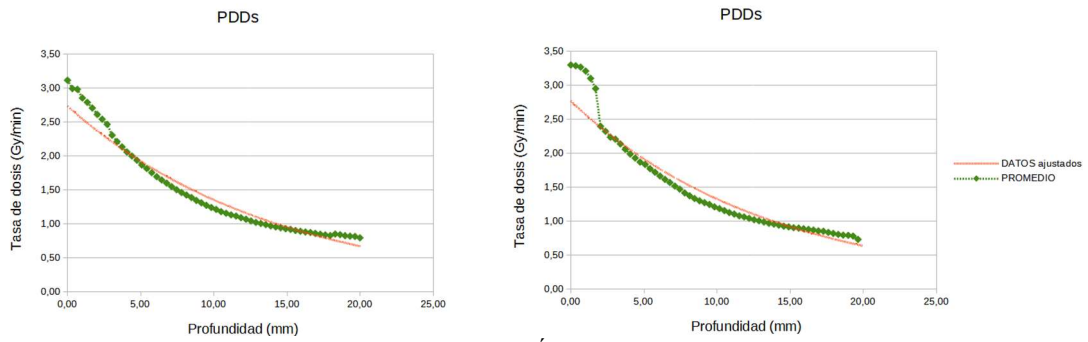


Figura A.21: Ángulo de 70°

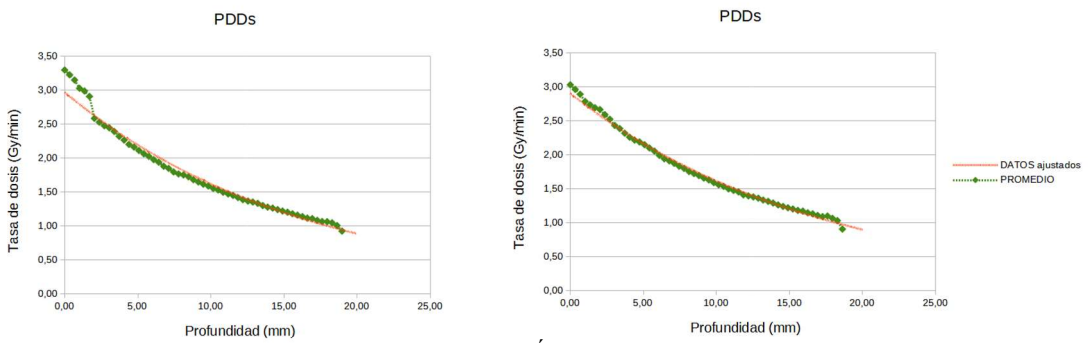


Figura A.22: Ángulo de 90°

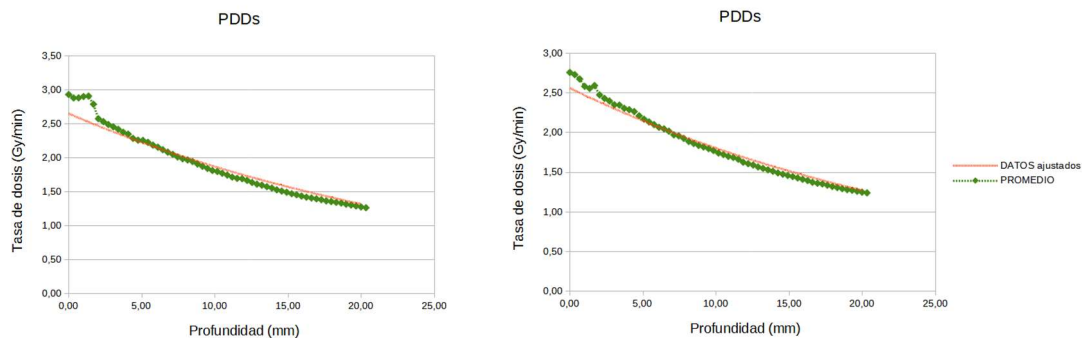


Figura A.23: Ángulo de 130°

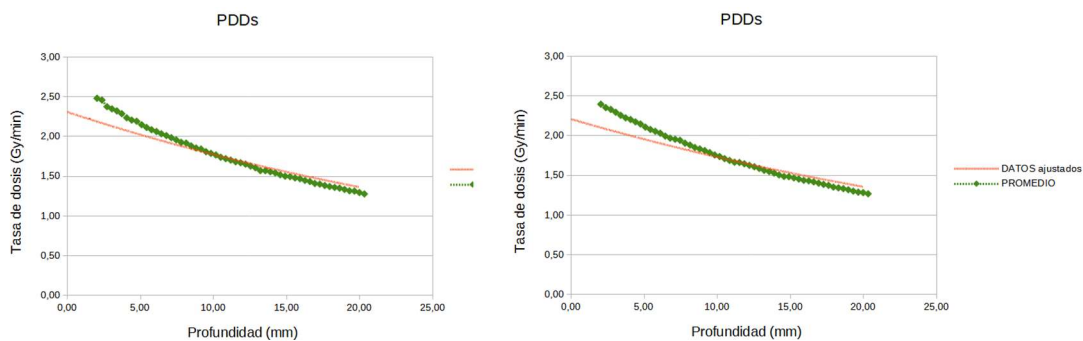


Figura A.24: Ángulo de 180°

SP-40 (1)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,8	0,074	3	0,061	2,7	0,035	2,3
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,8		3		2,7		2,3	
5	1,9		2,2		2,2		2	
10	1,3		1,6		1,9		1,8	
20	0,6		0,9		1,3		1,4	
	Dosis (Gy)							
0	15		16,1		14,4		12,5	
5	10,4		11,9		12,1		11	
10	7,2		8,8		10,1		9,6	
20	3,4		4,8		7,1		7,4	

SP-40 (2)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,8	0,07	2,9	0,059	2,6	0,035	2,2
	Tasa de dosis (Gy/min)							
0	2,8		2,9		2,6		2,2	
5	1,9		2,2		2,1		2	
10	1,4		1,6		1,8		1,7	
20	0,7		0,9		1,3		1,4	
	Dosis (Gy)							
0	15		15,7		13,8		11,9	
5	10,5		11,7		11,6		10,6	
10	7,4		8,7		9,7		9,4	
20	3,7		4,9		6,9		7,3	

Tabla A.7: Tasa de dosis y dosis para la segunda serie del aplicador SP-40.

SP-40						
Profundidad (mm)	90 Anterior		90 (1)		90 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		3,3	0,083	3	0,061	2,3
0	3,3		2,9		3,1	
5	2,2		2,2		2,2	
10	1,5		1,6		1,6	
20	0,6		0,9		0,8	
	180 Anterior		180 (1)		180 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,9	0,046	2,9	0,059	2,2	0,024
0	2,9		2,5		2,5	
5	2,3		2,1		2,2	
10	1,8		1,8		1,9	
20	1,1		1,3		1,4	
Tiempo (min)	5,81		5,98		6,08	

Tabla A.8: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

c) Aplicador SP-45.

i) Serie 2:

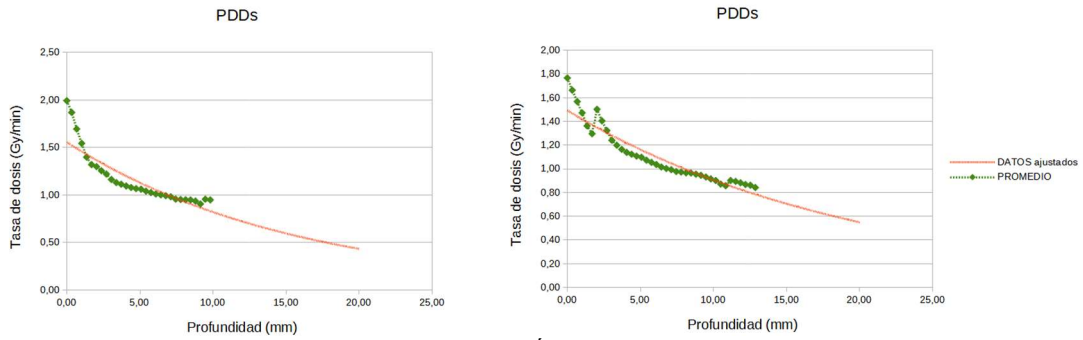


Figura A.25: Ángulo de 40°

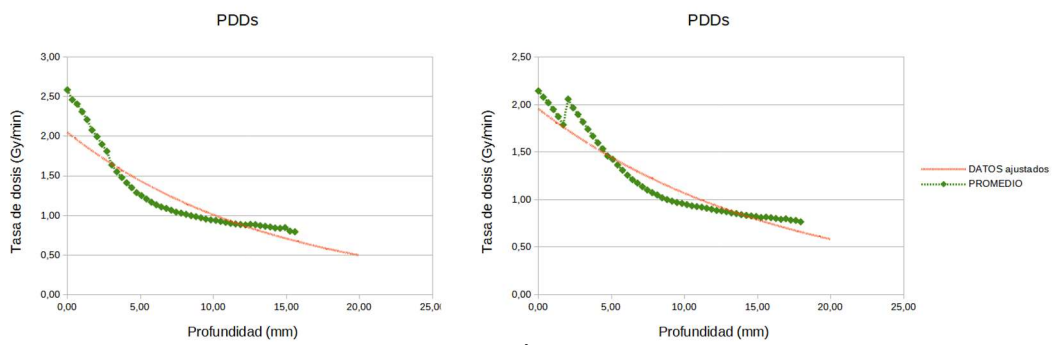


Figura A.26: Ángulo de 50°

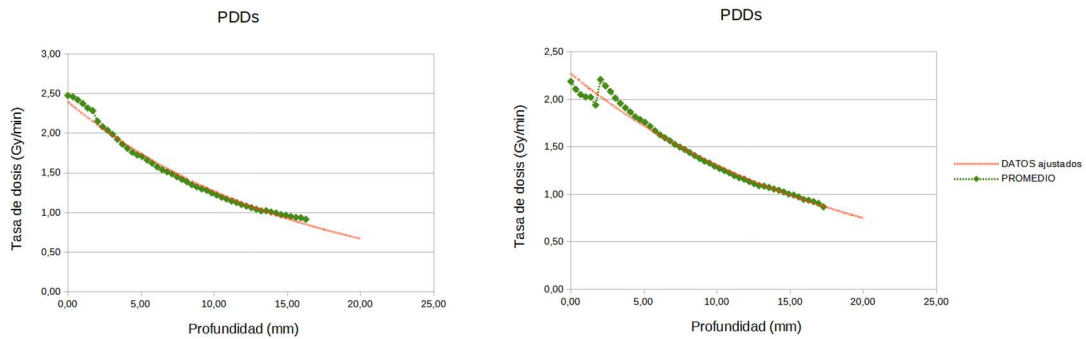


Figura A.27: Ángulo de 70°

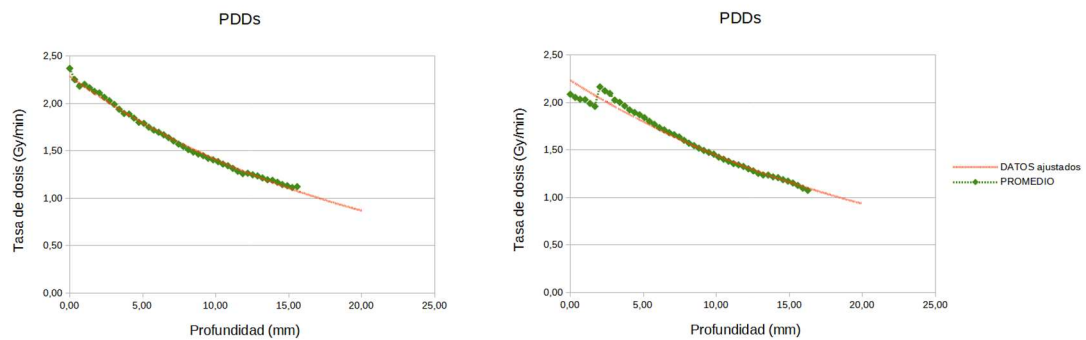


Figura A.28: Ángulo de 90°

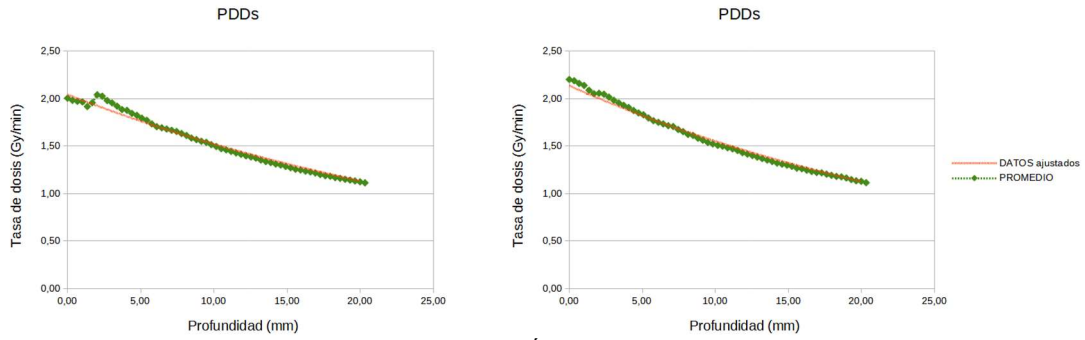


Figura A.29: Ángulo de 130°

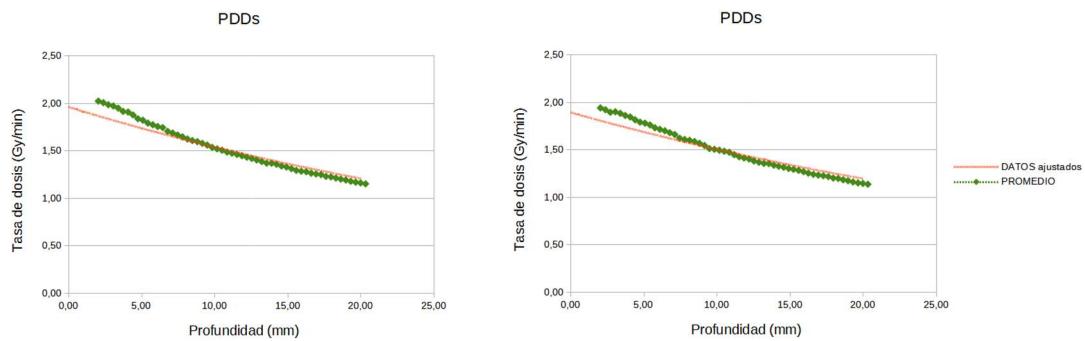


Figura A.30: Ángulo de 180°

SP-45 (1)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,4	0,064	2,3	0,048	2,1	0,032	2	0,024
Tasa de dosis (Gy/min)								
0	2,4		2,3		2,1		2	
5	1,7		1,8		1,8		1,7	
10	1,3		1,4		1,6		1,5	
20	0,7		0,9		1,1		1,2	
Dosis (Gy)								
0	13		12,4		11,6		10,6	
5	9,5		9,7		9,9		9,4	
10	6,9		7,7		8,4		8,3	
20	3,6		4,7		6,1		6,5	

SP-45 (2)								
Profundidad (mm)	70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,8	0,07	2,9	0,059	2,6	0,035	2,2	0,024
Tasa de dosis (Gy/min)								
0	2,8		2,9		2,6		2,2	
5	1,9		2,2		2,1		2	
10	1,4		1,6		1,8		1,7	
20	0,7		0,9		1,3		1,4	
Dosis (Gy)								
0	15		15,7		13,8		11,9	
5	10,5		11,7		11,6		10,6	
10	7,4		8,7		9,7		9,4	
20	3,7		4,9		6,9		7,3	

Tabla A.9: Tasa de dosis y dosis para la segunda serie del aplicador SP-45.

SP-45						
Profundidad (mm)	90 Anterior		90 (1)		90 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,7	0,084	2,3	0,048	2,9
0	2,7		2,3		2,9	
5	1,7		1,8		2,2	
10	1,1		1,4		1,6	
20	0,5		0,9		0,9	
	180 Anterior		180 (1)		180 (2)	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,1	0,041	2	0,024	2,2
0	2,1		2		2,2	
5	1,7		1,7		2	
10	1,4		1,5		1,7	
20	0,9		1,2		1,4	
Tiempo (min)	7,37		7,04		7,18	

Tabla A10.: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

d) Aplicador SP-50:

i) Serie 1:

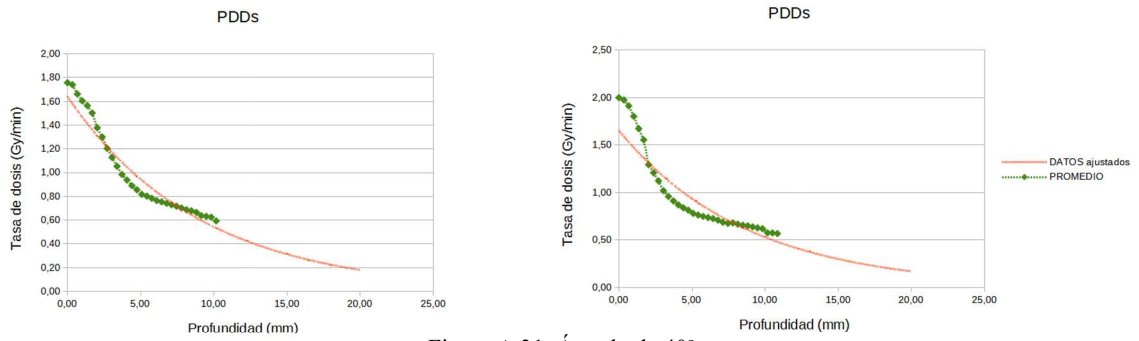


Figura A.31: Ángulo de 40°

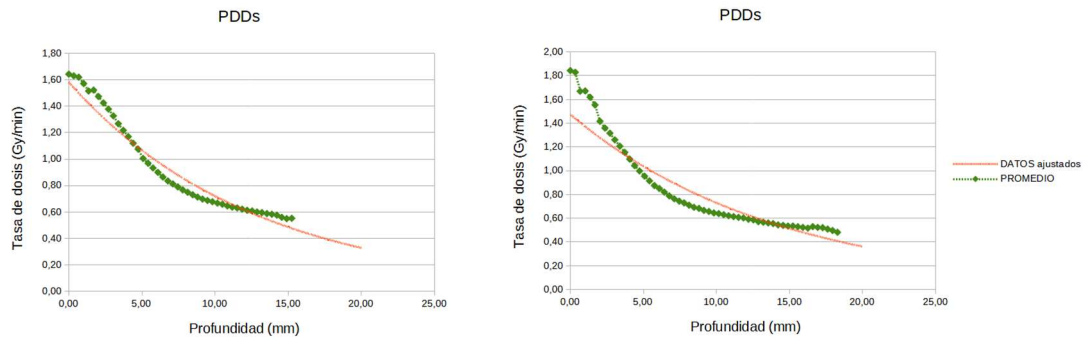


Figura A.32: Ángulo de 50°

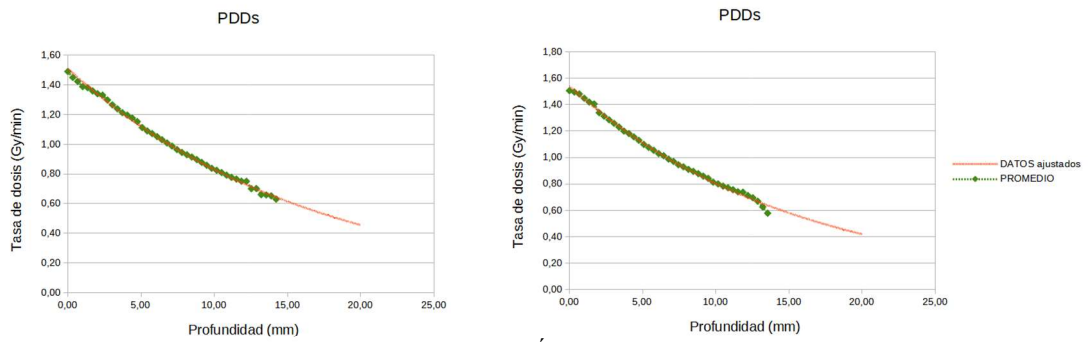


Figura A.33: Ángulo de 70°

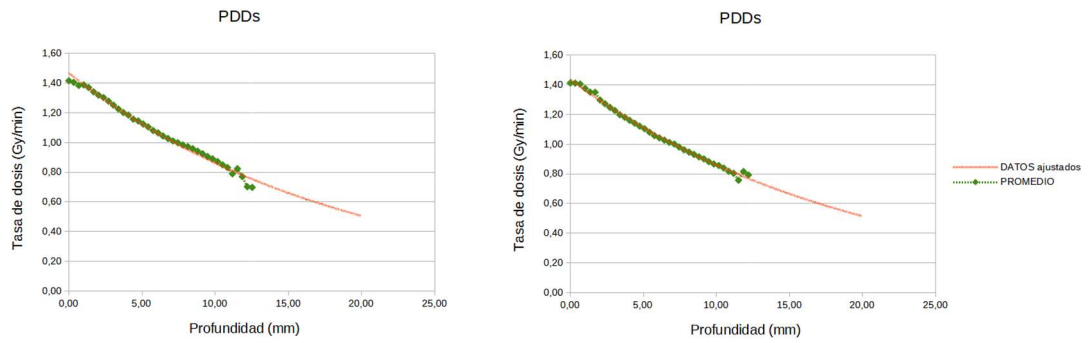


Figura A.34: Ángulo de 90°

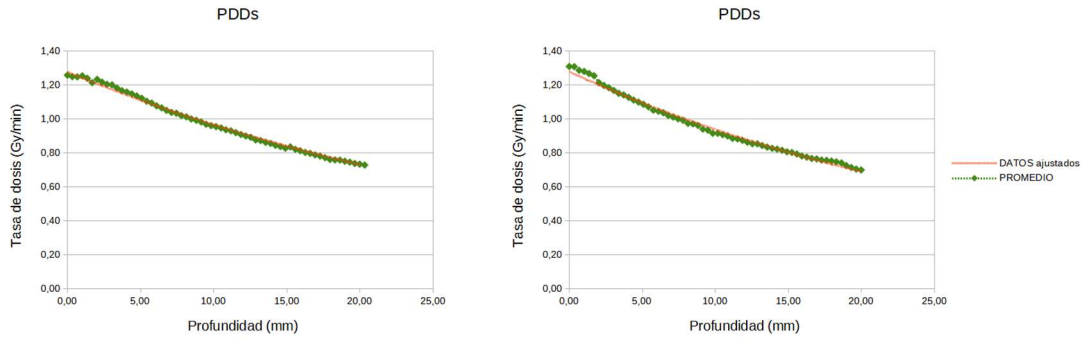


Figura A.35: Ángulo de 130°

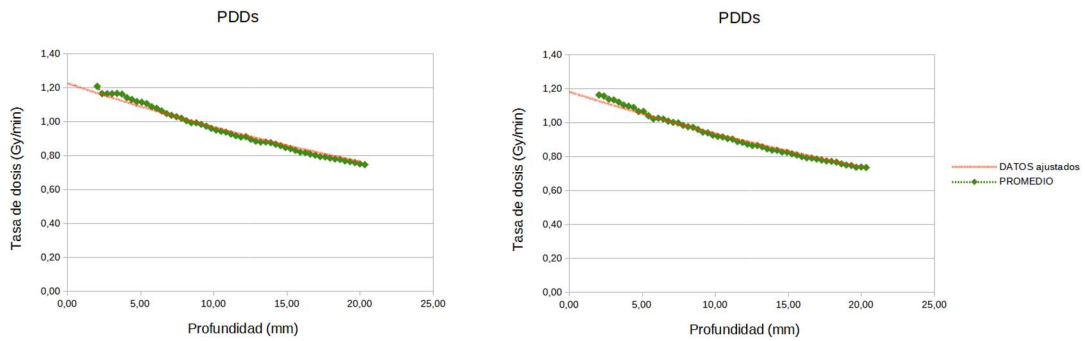


Figura A.36 Ángulo de 180°

SP-50 (1)										
Profundidad (mm)	50		70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	1,6	0,079	1,5	0,06	1,5	0,053	1,3	0,028	1,2	0,024
	Tasa de dosis (Gy/min)									
0	1,6		1,5		1,5		1,3		1,2	
5	1,1		1,1		1,1		1,1		1,1	
10	0,7		0,8		0,9		1		1	
20	0,3		0,5		0,5		0,7		0,8	
	Dosis (Gy)									
0	7,9		7,6		7,4		6,4		6,2	
5	5,4		5,6		5,7		5,6		5,5	
10	3,6		4,2		4,3		4,9		4,9	
20	1,6		2,3		2,5		3,7		3,9	

SP-50 (2)										
Profundidad (mm)	50		70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	1,5	0,07	1,5	0,065	1,4	0,051	1,3	0,031	1,2	0,023
	Tasa de dosis (Gy/min)									
0	1,5		1,5		1,4		1,3		1,2	
5	1		1,1		1,1		1,1		1,1	
10	0,7		0,8		0,9		0,9		0,9	
20	0,4		0,4		0,5		0,7		0,7	
	Dosis (Gy)									
0	8,1		8,4		7,9		7		6,5	
5	5,7		6,1		6,1		6		5,8	
10	4		4,4		4,7		5,1		5,1	
20	2		2,3		2,8		3,8		4,1	

Tabla A.11: Tasa de dosis y dosis para la primera serie del aplicador SP-50.

SP-50						
Profundidad (mm)	<i>90 Anterior</i>		<i>90 (1)</i>		<i>90 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		2,1	0,065	1,5	0,053	1,4
0	2,1		1,5		1,4	
5	1,5		1,1		1,1	
10	1,1		0,9		0,9	
20	0,6		0,5		0,5	
	<i>180 Anterior</i>		<i>180 (1)</i>		<i>180 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		1,7	0,045	1,2	0,024	1,2
0	1,7		1,2		1,2	
5	1,4		1,1		1,1	
10	1,1		1		0,9	
20	0,7		0,8		0,7	
Tiempo (min)	8,78		11,23		11,43	

Tabla A.12: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

e) Aplicador SP-55.

i) Serie 1:

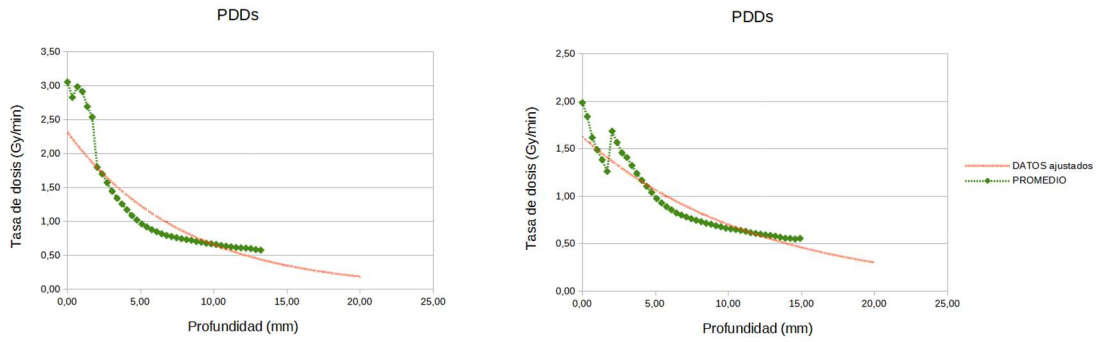


Figura A.37: Ángulo de 40°

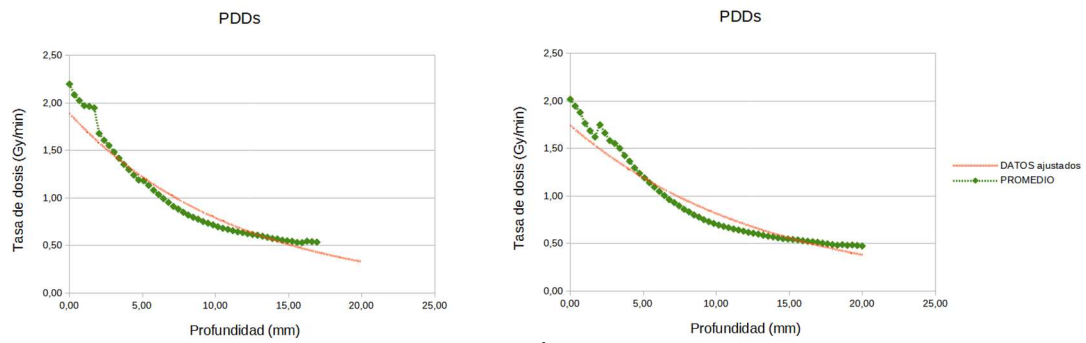


Figura A.38: Ángulo de 50°

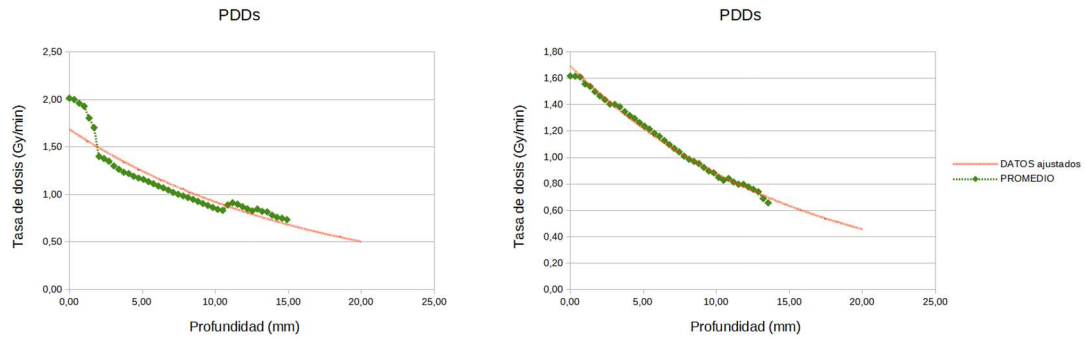


Figura A.39: Ángulo de 70°

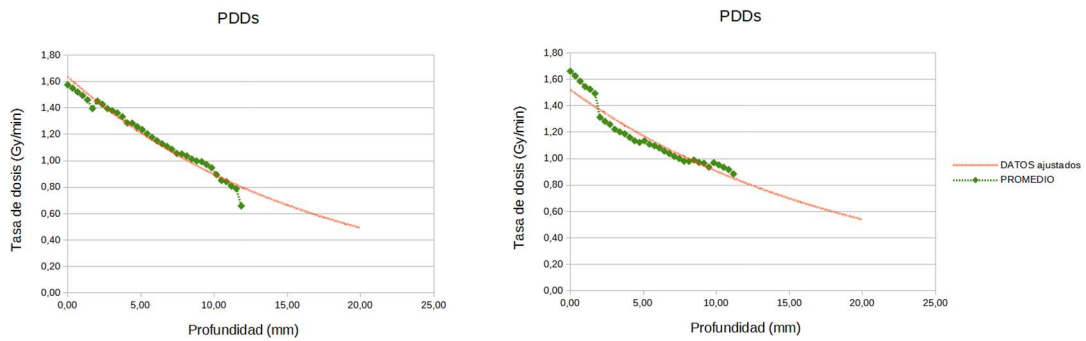


Figura A.40: Ángulo de 90°

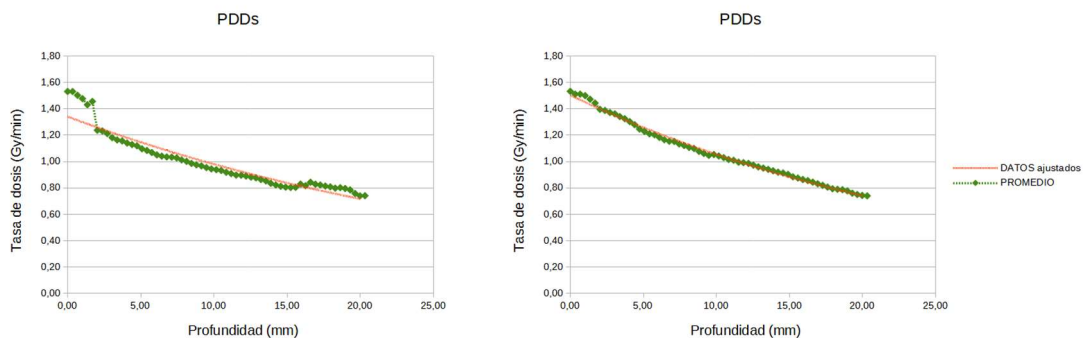


Figura A.41: Ángulo de 130°

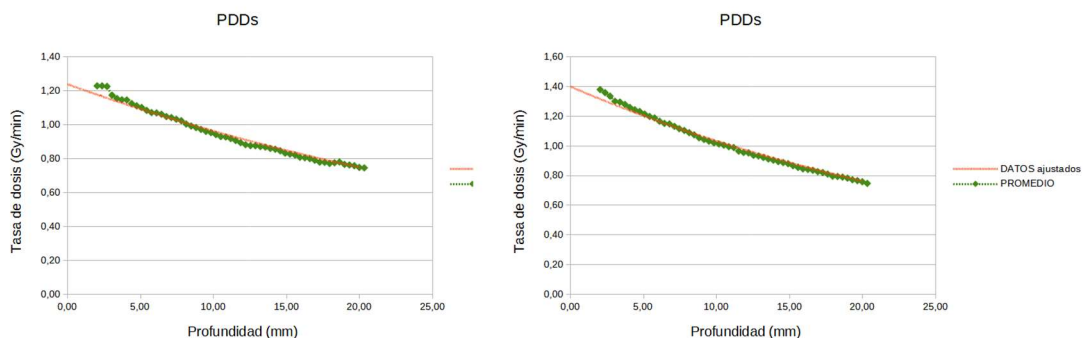


Figura A.42: Ángulo de 180°

SP-55 (1)										
Profundidad (mm)	50		70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	1,9	0,087	1,7	0,06	1,5	0,052	1,3	0,031	1,2	0,025
Tasa de dosis (Gy/min)										
0	1,9		1,7		1,5		1,3		1,2	
5	1,2		1,2		1,2		1,1		1,1	
10	0,8		0,9		0,9		1		1	
20	0,3		0,5		0,5		0,7		0,7	
Dosis (Gy)										
0	10,4		9,3		8,3		7,3		6,8	
5	6,7		6,8		6,4		6,3		6	
10	4,3		5,1		4,9		5,4		5,3	
20	1,8		2,8		2,9		3,9		4,1	

SP-55 (2)										
Profundidad (mm)	50		70		90		130		180	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu
	2,5	0,12	1,9	0,075	1,8	0,074	1,5	0,043	1,4	0,036
Tasa de dosis (Gy/min)										
0	2,5		1,9		1,8		1,5		1,4	
5	1,4		1,3		1,2		1,2		1,2	
10	0,8		0,9		0,9		1		1	
20	0,2		0,4		0,4		0,6		0,7	
Dosis (Gy)										
0	12,6		9,5		9		7,5		7	
5	6,9		6,6		6,2		6,1		5,9	
10	3,8		4,5		4,3		4,9		4,9	
20	1,1		2,1		2,1		3,2		3,4	

Tabla A.13: Tasa de dosis y dosis para la primera serie del aplicador SP-55.

SP-55						
Profundidad (mm)	<i>90 Anterior</i>		<i>90 (1)</i>		<i>90 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		1,8	0,074	1,5	0,052	1,8
0	1,8		1,5		1,8	
5	1,2		1,2		1,2	
10	0,9		0,9		0,9	
20	0,4		0,5		0,4	
	<i>180 Anterior</i>		<i>180 (1)</i>		<i>180 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		1,4	0,036	1,2	0,025	1,4
0	1,4		1,2		1,4	
5	1,2		1,1		1,2	
10	1		1		1	
20	0,7		0,7		0,7	
Tiempo (min)	10,15		10,73		10,15	

Tabla A.14: Comparativa de resultados con la calibración anterior.

ii) Serie 2:

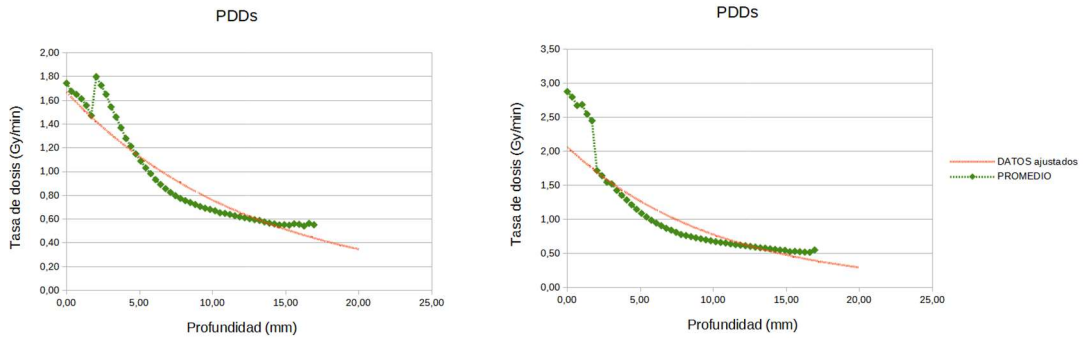


Figura A.43: Ángulo de 40°

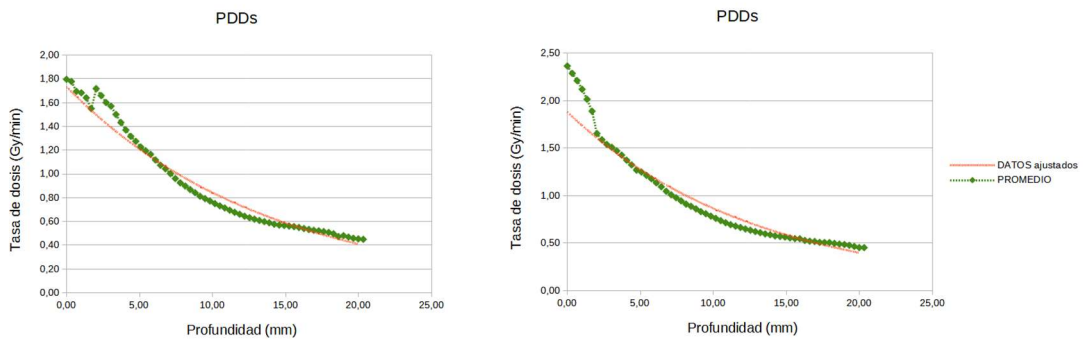


Figura A.44: Ángulo de 50°

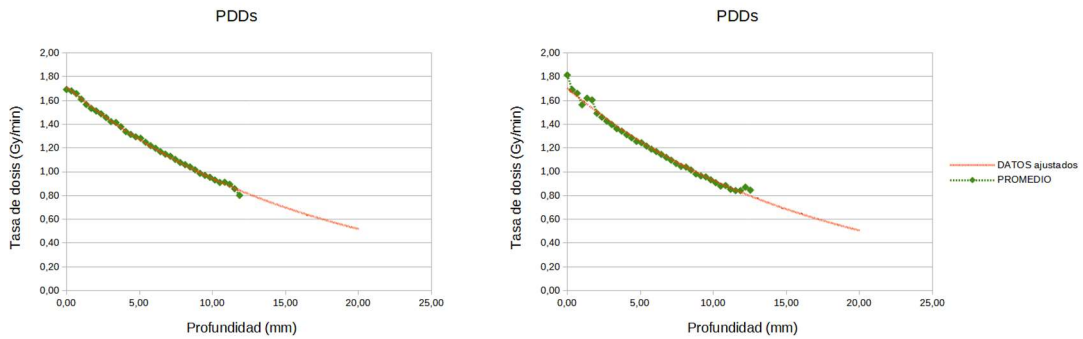


Figura A.45: Ángulo de 70°

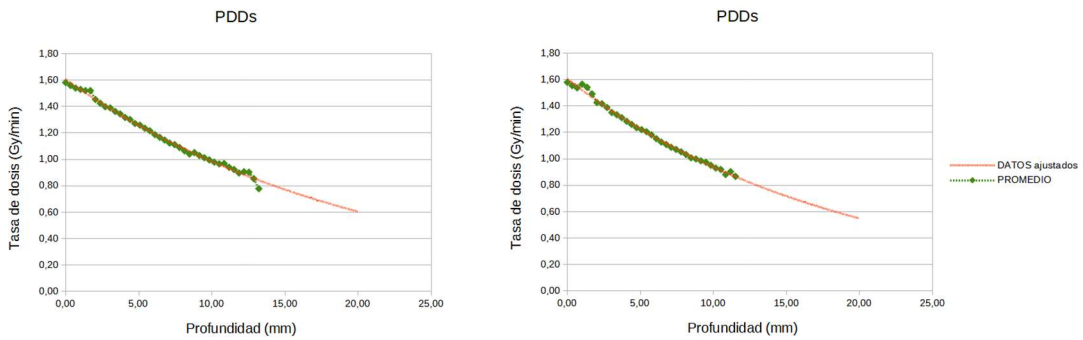


Figura A.46: Ángulo de 90°

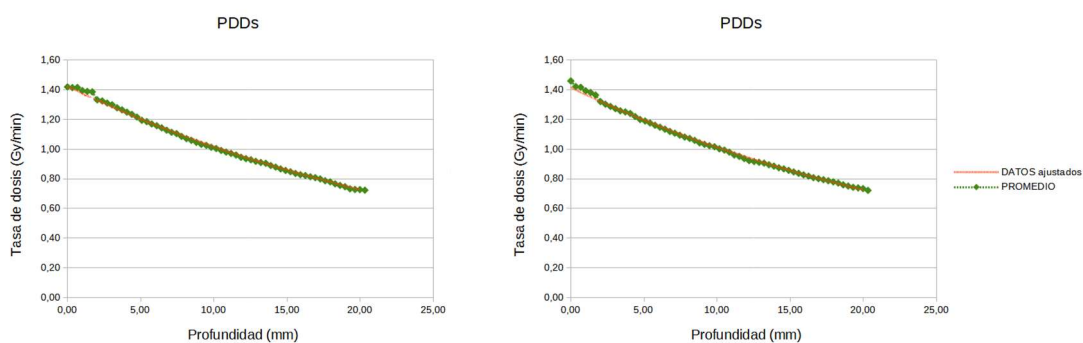


Figura A.47: Ángulo de 130°

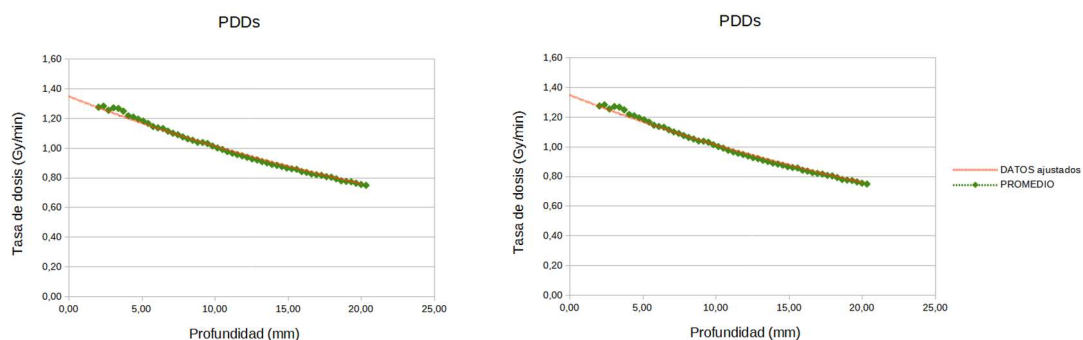


Figura A.48: Ángulo de 180°

SP-55 (1)											
Profundidad (mm)	50		70		90		130		180		
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	
		1,7	0,072	1,7	0,06	1,6	0,049	1,4	0,034	1,4	0,029
Tasa de dosis (Gy/min)											
0	1,7		1,7		1,6		1,4		1,4		
5	1,2		1,3		1,3		1,2		1,2		
10	0,8		0,9		1		1		1		
20	0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		
Dosis (Gy)											
0	9,4		9,3		8,7		7,7		7,4		
5	6,5		6,9		6,8		6,5		6,4		
10	4,6		5,1		5,3		5,5		5,5		
20	2,2		2,8		3,3		3,9		4,1		

SP-55 (2)											
Profundidad (mm)	50		70		90		130		180		
	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	Do	mu	
		1,9	0,078	1,7	0,061	1,6	0,054	1,4	0,034	1,4	0,029
Tasa de dosis (Gy/min)											
0	1,9		1,7		1,6		1,4		1,4		
5	1,3		1,3		1,2		1,2		1,2		
10	0,9		0,9		0,9		1		1		
20	0,4		0,5		0,5		0,7		0,8		
Dosis (Gy)											
0	10,2		9,2		8,7		7,6		7,3		
5	6,9		6,8		6,6		6,4		6,3		
10	4,7		5		5,1		5,5		5,5		
20	2,1		2,7		3		3,9		4,1		

Tabla A.15: Tasa de dosis y dosis para la segunda serie del aplicador SP-55.

SP-55						
Profundidad (mm)	<i>90 Anterior</i>		<i>90 (1)</i>		<i>90 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		1,8	0,074	1,6	0,049	1,6
0	1,8		1,6		1,6	
5	1,2		1,3		1,2	
10	0,9		1		0,9	
20	0,4		0,6		0,5	
	<i>180 Anterior</i>		<i>180 (1)</i>		<i>180 (2)</i>	
	Do	mu	Do	mu	Do	mu
		1,4	0,036	1,4	0,029	1,4
0	1,4		1,4		1,4	
5	1,2		1,2		1,2	
10	1		1		1	
20	0,7		0,8		0,8	
Tiempo (min)	10,15		10,18		10,31	

Tabla A.16: Comparativa de resultados con la calibración anterior.