



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización y gestión segura de elementos activados en ciclotrones médicos en Colombia

Mercy Natalia González Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá D.C., Colombia
2023

Caracterización y gestión segura de elementos activados en ciclotrones médicos en Colombia

Mercy Natalia González Sánchez

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Física Médica

Director(a):
PhD., Hernán Ólaya Dávila

Codirector(a):
PhD., Luis Agulles Pedrós

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de física
Bogotá D.C., Colombia
2023

Dedicatoria

A mi mamá Hermencia Sánchez quién ha sido mi infinita motivación para seguir adelante, la persona que luchó incansablemente por verme una profesional y me guió día a día para ser una gran mujer.

A mi hermano César Manuel por el ánimo que me brinda en cada etapa de mi vida.

A mi familia, por todo el amor incondicional y apoyo emocional.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Mercy Natalia González Sánchez

Fecha: 2023-05-29

Agradecimientos

Al Servicio Geológico Colombiano, en especial al personal de la Instalación Centralizada de Gestión de Desechos Radiactivos y del Grupo de Licenciamiento y Control por su apoyo y gestión.

A Ciclotrón Colombia Medellín y en especial a Laura Puin González, por su generosidad y gestión para permitir la toma de datos asociados a los elementos activados provenientes de la operación de su ciclotrón.

A Tracerlab S.A.S por permitir el ingreso a sus instalaciones y hacer posible la recopilación de datos y análisis de muestras provenientes de la operación de su ciclotrón.

Resumen

Caracterización y gestión segura de elementos activados en ciclotrones médicos en Colombia.

Mediante espectrometría gamma de alta resolución, se realizó la caracterización de aguas recuperadas y algunas piezas activadas como lámina de havar y junta helicoflex, provenientes de la configuración del blanco objetivo para dos ciclotrones médicos ubicados en los departamentos de Cundinamarca y Antioquía. Según resultados provenientes de publicaciones internacionales, no solo las piezas de la configuración del blanco se activan por la interacción de los protones con los distintos materiales y por ello, con el fin de identificar los radionúclidos presentes en las piezas y cuantificar su actividad, nos dimos a la tarea de también caracterizar una columna de QMA y una muestra del residuo del filtro de la bomba de vacío para uno de los ciclotrones.

Los resultados de la identificación de radionúclidos muestran que las aguas recuperadas y las láminas de havar se activan con ^{56}Co y ^{57}Co siendo las láminas de havar las que contienen mayor actividad. Las incertidumbres asociadas a la cuantificación de actividad para cada pieza analizada, se encuentran por debajo del 12 %.

El residuo del filtro de la bomba de vacío del ciclotrón Siemens Hp Eclipse, se activa con ^{65}Zn , este material particulado emisor de radiación ionizante debe ser manipulado con guantes, gafas y mascarilla adecuados.

Adicionalmente, se calcularon las tasas de dosis a las que está expuesto el personal ocupacional cuando se encuentran en actividades de extracción de las piezas del blanco del ciclotrón y cuando realizan traslados a la zona de almacenamiento temporal de los desechos radiactivos dentro de las instalaciones del ciclotrón médico.

Con base en la normatividad nacional e internacional y los resultados obtenidos, se realiza un protocolo como complemento para la gestión de desechos radiactivos en ciclotrones médicos, con el objetivo de guiar a las instalaciones sobre las etapas de gestión, en especial, los tiempos de almacenamiento temporal para las piezas del blanco del ciclotrón activadas y además concientizar sobre la responsabilidad de dar el manejo adecuado a los residuos generados evitando riesgos de irradiación innecesarios al medio ambiente y al personal del público.

Palabras claves: Ciclotrón, radionúclidos, desechos radiactivos, dosis de radiación, espectrometría gamma.

Abstract

Characterization and safe management of elements activated in medical cyclotrons in Colombia.

Using high-resolution gamma spectrometry, the characterization of recovered water and some activated pieces such as havar sheets and helicoflex joint, coming from the configuration of the target target for two medical cyclotrons located in the departments of Cundinamarca and Antioquía, was carried out. According to results from international publications, not only the pieces of the target configuration are activated by the interaction of the protons with the different materials and therefore, in order to identify the radionuclides present in the pieces and quantify the activity, we gave ourselves to the task of also characterizing a QMA column and a sample of the vacuum pump filter residue for one of the cyclotrons.

The results of the identification of radionuclides show that the recovered waters and the havar sheets are activated with ^{56}Co and ^{57}Co , with the havar sheets containing the highest activity. The uncertainties obtained from the quantification of activity for each piece analyzed are below 12%.

The residue from the filter of the vacuum pump of the Siemens Hp Eclipse cyclotron is activated with ^{65}Zn , a particulate material that emits ionizing radiation. It must be handled with suitable gloves, glasses and a mask.

Additionally, the dose rates to which occupational personnel are exposed when they are in activities of extraction of the cyclotron target pieces and when they make transfers to the temporary storage area of radioactive waste within the cyclotron facilities were calculated.

Based on national and international regulations and the results obtained, a protocol is carried out as a complement for the management of radioactive waste in medical cyclotrons, with the aim of guiding the facilities on the management stages, especially storage times. temporary for the activated cyclotron target parts and also raise awareness about the responsibility of giving proper management to the waste generated, avoiding unnecessary irradiation risks to the environment and public personnel.

Keywords: Cyclotron, radionuclides, radioactive waste, radiation dose, gamma spectrometry.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vi
Lista de figuras	xi
Lista de tablas	xiii
Introducción	1
1. Objetivos	4
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivos específicos	4
2. Antecedentes	5
3. Aspectos Generales	8
3.1. Principios físicos de los ciclotrones y su producción	8
3.1.1. Aceleración de radiofrecuencia	10
3.1.2. Campo magnético en trayectoria circular	10
3.1.3. Sistema de vacío	11
3.1.4. Extracción del haz	11
3.1.5. Interacción de partículas cargadas con la materia	12
3.1.6. ^{18}F – FDG radiofármaco producido en ciclotrón para tomografía por emisión de positrones PET	13
3.2. Reacciones nucleares	15
3.3. Decaimientos radiactivos presentados por la producción de radiofármacos en ciclotrones	16
3.3.1. Desintegración partículas beta	16
3.3.2. Captura electrónica	17
3.3.3. Desintegración partículas gamma	18
3.4. Esquemas de desintegración	18
3.5. Espectrometría Gamma	19
3.5.1. Componentes del sistema del detector de HPGe	20
3.5.2. Calibración del detector espectrómetro gamma	21

3.6. Normatividad asociada a la gestión de desechos radiactivos	24
3.6.1. Gestión de desechos radiactivos	25
3.6.2. Protección radiológica de las personas y del medio ambiente	29
4. Protocolo de gestión de desechos radiactivos en ciclotrones médicos	31
4.1. Tratamiento previo	32
4.2. Caracterización y clasificación de los desechos radiactivos	33
4.3. Manipulación en el emplazamiento	35
4.4. Almacenamiento temporal	35
4.5. Recomendaciones en la gestión de desechos	38
4.6. Formato de control de desechos radiactivos	39
5. Metodología	40
5.1. Caracterización de desechos radiactivos	41
5.1.1. Montaje experimental para la obtención de espectros	41
5.1.2. Obtención del espectro gamma	44
5.2. Evaluación de la dosis recibida por los trabajadores ocupacionalmente expuestos	49
6. Resultados y discusión	51
6.1. Identificación y cuantificación de radionúclidos	51
6.2. Evaluación de dosis recibidas por trabajadores ocupacionalmente expuestos .	70
7. Conclusiones	73
A. Anexo: Especificaciones técnicas del blanco del ciclotrón Siemens Hp Eclipse	75
B. Anexo: Especificaciones técnicas del blanco PETtrace 800 - Sco	76
C. Anexo: Especificaciones técnicas del detector HPGe.	77
D. Anexo: Especificaciones técnicas de los monitores de tasa de dosis.	79
Bibliografía	81

Lista de Figuras

3-1.	Esquema del campo eléctrico producido en un ciclotrón [1].	9
3-2.	a) Interacción inelástica de Coulomb con electrones atómicos. b) Interacción elástica de Coulomb con núcleos atómicos. c) Reacciones nucleares no-elástica [2].	12
3-3.	Sistema de procesamiento químico para la unión de $^{18}\text{F} - \text{FDG}$. Tomada en Ciclotrón Colombia, Medellín.	13
3-4.	Esquema de columna de purificación $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ [3].	14
3-5.	Esquema de la aniquilación del positrón con un electrón del organismo. Imagen propia.	15
3-6.	Desintegración beta menos (β^-) del ^{60}Co al ^{60}Ni . [4].	18
3-7.	Desintegración del ^{54}Mn al ^{54}Cr mediante captura electrónica. El ^{54}Mn tiene una vida media de 312,20 días. [4].	19
3-8.	Diagrama de cadena electrónica detector gamma. Imagen propia.	20
3-9.	Esquema de la gaussiana normalizada, donde FWHM es la anchura a media altura del pico, M la altura o amplitud del pico. Imagen propia.	22
4-1.	Diagrama de flujo del proceso de gestión de desechos radiactivos. Basado en [5, 6].	32
4-2.	Bolsas resellables herméticas.	33
4-3.	Viales [7].	33
4-4.	Sección de la generación del desecho radiactivo.	39
4-5.	Sección de almacenamiento temporal del desecho.	39
4-6.	Sección de la evacuación del desecho.	39
5-1.	Montaje experimental para Laminar de Havar 2.	41
5-2.	Montaje para residuo del filtro de bomba de vacío.	41
5-3.	Muestra de columna QMA para separación de impurezas.	43
5-4.	Muestra de agua recuperada 5 ml.	43
5-5.	Muestra de arena - residuo del filtro de la bomba de vacío.	43
5-6.	Junta Helicoflex.	43
5-7.	Ubicación de líneas de referencia sobre el pico del espectro. Fuente: Software Spectraline.	45
5-8.	Calibración por energía. Fuente: Software Spectraline.	46
5-9.	Calibración por energía. Imagen propia.	46

5-10. Calibración por FWHM. Imagen propia.	47
5-11. Equipos medidores de tasa de dosis equivalente ambiental	50
6-1. C1: Lámina de Havar 1, Stracotek.	52
6-2. Lámina de Havar 1. Pico de ^{56}Co	53
6-3. Lámina de Havar 1. Pico de ^{57}Co	53
6-4. C1: Agua recuperada de 10 ml.	54
6-5. Agua 1. Pico de ^{56}Co	55
6-6. Agua 1. Pico de ^{57}Co	55
6-7. C1: Junta Helicoflex diámetro de 2 cm.	56
6-8. Junta Helicoflex. Pico de ^{60}Co	57
6-9. Junta Helicoflex. Pico de ^{54}Mn	57
6-10. Junta Helicoflex. Pico de ^{57}Co	57
6-11. C2: Lámina de Havar 2, Stracotek de 0,5 cm de diámetro.	59
6-12. Lámina de Havar 2. Pico de ^{56}Co	60
6-13. Lámina de Havar 2. Pico de ^{57}Co	60
6-14. C2: Agua recuperada 2.	61
6-15. Agua 2. Pico de ^{56}Co	62
6-16. Agua 2. Pico de ^{57}Co	62
6-17. C2: Columna de Amonio Cuaternario QMA ubicada en el módulo de síntesis.	63
6-18. C2: Residuo de la bomba de vacío del ciclotrón (arena).	65
6-19. Residuo bomba de vacío. Pico de ^{65}Zn	66
6-20. Ciclotrón 1. Representación gráfica de la actividad de radionúclidos presentes en las muestras.	69
6-21. Ciclotrón 2. Representación gráfica de la actividad de radionúclidos presentes en las muestras.	70
A-1. Blanco HP Eclipse, Stracotek [8].	75
B-1. Blanco GE, Stracotek [9].	76
C-1. Espectrometro gamma HPGe.	77

Lista de Tablas

3-1. Energías del protón requeridas para la producción de radionúclidos [10].	8
3-2. Clasificación de desechos radiactivos. Fuente: Resol. MME 180005 de 2010 [11].	27
3-3. Niveles de dispensa para desechos sólidos [12].	28
3-4. Límites de dosis [13].	29
4-1. Relación de concentración de actividad y nivel de dispensa de cada radionúclido.	36
4-2. Evaluación de la condición $C_i/CA < 1$ 3.20.	36
4-3. Tiempo de almacenamiento temporal para los desechos radiactivos en las instalaciones del ciclotrón.	37
5-1. Ciclotrones de Colombia sometidos al estudio	40
5-2. Grupo de muestras para caracterizar	41
5-3. Tabla de constante gamma y periodo de semidesintegración de los radionúclidos presentes en las muestras [14].	49
6-1. Muestras analizadas en ciclotrones médicos.	51
6-2. Datos - Lámina de Havar 1, Stracotek	53
6-3. Datos - Agua recuperada 1.	55
6-4. Datos - Junta Helicoflex, Stracotek.	58
6-5. Datos - Lámina de Havar 2, Stracotek.	60
6-6. Datos - Agua recuperada 2, Stracotek.	62
6-7. Datos - Columna QMA.	64
6-8. Datos - Residuo bomba vacío.	66
6-9. Comparación con los estudios internacionales.	67
6-10. Ciclotrón 1. Actividad de radionúclidos presentes en la muestra.	68
6-11. Ciclotrón 2. Actividad de radionúclidos presentes en la muestra.	68
6-12. Dosis efectiva anual estimada para los TOEs a 20 cm de las piezas emisoras de radiación.	71
6-13. Tasa de dosis equivalente ambiental medidas durante los traslados de piezas al almacenamiento temporal.	72
A-1. Especificaciones técnicas del blanco Stracotek, HP Eclipse [8].	75
B-1. Especificaciones técnicas del blanco Stracotek [9].	76

C-1. Especificaciones técnicas del detector [15].	78
D-1. Especificaciones técnicas del detector Radeye B20 GM [16].	79
D-2. Especificaciones técnicas del detector Graetz X 50 DE - GM [17].	80

Introducción

El ciclotrón es un acelerador de partículas cargadas, en este caso, protones con energías de 11 y 16,5 MeV que interactúan con un blanco objetivo, el cual, contiene isótopos estables para la generación de radionúclidos. La configuración del blanco es específico para cada ciclotrón, los materiales que lo componen permiten reacciones nucleares distintas, debido a los protones y neutrones en el núcleo atómico, y las interacciones con las partículas aceleradas por el ciclotrón. Es por esto, que se producen diferentes radionúclidos que quedarán activados en las piezas de dicho blanco.

La base de datos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) reporta la existencia de 5 ciclotrones [18] médicos en Colombia, así mismo, la autoridad reguladora delegada Servicio Geológico Colombiano reporta las instalaciones autorizadas para el empleo de material radiactivo [19] donde se evidencia cuatro (4) ciclotrones autorizados para operar en el país. Los ciclotrones están dedicados a la producción del radionúclido ^{18}F utilizado en el ámbito de la medicina nuclear específicamente en la tomografía por emisión de positrones, por sus siglas en inglés PET para el diagnóstico o la evaluación de la efectividad del tratamiento de cáncer en pacientes [20].

Este tipo de tecnología requiere de mantenimientos con cierta periodicidad, por lo menos, cada dos veces al año dependiendo la producción del ciclotrón, en este procedimiento se realiza un recambio de algunas piezas que se ven afectadas por el bombardeo de protones. Los residuos producidos deben ser tratados como desechos radiactivos, teniendo en cuenta que las partículas cargadas utilizadas como proyectiles en la colisión con los blancos permite la generación de radionúclidos de diferentes energías y periodos de semidesintegración relativamente largos. El desecho radiactivo no se puede exceptuar con el almacenamiento temporal y necesita ser dispuesto en un área adecuada para la desintegración radiactiva de las piezas activadas y así lograr que la concentración de actividad disminuya por debajo de los valores establecidos para que puedan ser gestionados como residuos ordinarios [5].

En ese sentido, es importante que el ente regulador Colombiano conozca los diferentes elementos que se activan en un ciclotrón, para que se establezcan normas y regulaciones frente al tratamiento y manipulación de los desechos radiactivos generados a partir de su extracción tras el desgaste causado por la irradiación.

Por consiguiente, el Ministerio de Minas y Energía MME de la República de Colombia en la resolución 41178 de 2016, por medio de la cual se modifica y adiciona la resolución 180005 de 2010, por la cual se adopta el reglamento para la gestión de desechos radiactivos en Colombia, en cuanto a manipulación, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento, transporte y disposición final. En esta resolución se encuentran establecidos los niveles de dispensa, valores de concentración de actividad por debajo de los cuales, los desechos son liberados del control regulatorio. Es decir, se utilizan para determinar el momento en que se pueden liberar las piezas activadas del blanco y ser tratadas como residuos ordinarios. Adicionalmente, existe la norma técnica colombiana NTC 3970 de 1996 para el transporte de mercancías peligrosas de material radiactivo que establece requisitos para el transporte terrestre reduciendo los riesgos inherentes de las radiaciones ionizantes que pueden afectar las personas y el medio ambiente [21]. El transporte de material radiactivo se hace cumpliendo los requisitos y condiciones mínimas establecidas en la resolución 181434 de 2002 expedida por el MME donde se reglamenta el programa de protección y seguridad radiológica [13].

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Caracterizar los elementos activados en dos ciclotrones médicos en Colombia mediante la técnica de espectrometría gamma y establecer un protocolo para la gestión integral de los desechos radiactivos.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar los radionúclidos producidos en el blanco del ciclotrón a través de la técnica de espectrometría gamma.
- Determinar la concentración de actividad de los radionúclidos producidos en el blanco del ciclotrón a través de la técnica de espectrometría gamma.
- Estimar las dosis a las que están expuestos los trabajadores en las labores de almacenamiento temporal y transporte de los elementos activados en el ciclotrón médico.
- Realizar un protocolo para la gestión de los elementos activados para su disposición final.

2. Antecedentes

Actualmente, en los centros de medicina nuclear se utiliza un radiofármaco llamado fluorodesoxiglucosa (*FDG*), el cual, se administra una pequeña cantidad de la sustancia al paciente vía intravenosa, pasado un tiempo es captado en el cuerpo por la unión del radiotrazador con una molécula específica, como la glucosa, y esto permite la emisión de positrones. Posteriormente, el paciente es trasladado a un equipo de tomografía por emisión de positrones (por sus siglas en inglés PET) que detecta la radiación gamma producida por la interacción de los positrones con los electrones orbitales de los átomos. El PET es un anillo de detectores que rodea al paciente, mide la dirección e intensidad de los rayos gamma que se utilizan para crear un imagen tridimensional de la distribución del radiofármaco en el cuerpo. Se utiliza para diagnosticar cáncer, evaluar la efectividad de tratamientos, así como para detectar y monitorear la progresión de enfermedades [20].

La mayoría de radionúclidos utilizados en PET son producidos en un ciclotrón médico, un acelerador de partículas que consta de varios componentes principales: el sistema donde ocurre la aceleración de protones o deuterones a altas velocidades y el blanco objetivo compuesto por una serie de piezas de distintos materiales, en especial un recipiente de plata donde permanece el agua enriquecida (^{18}O). Al interactuar el haz de protones con el blanco se produce Flúor 18 (^{18}F), es decir, mediante la reacción nuclear p-n es posible obtener dicho radionúclido. En esta producción se generan diferentes radionúclidos debido a la interacción de los protones con los diferentes materiales que comprenden el blanco del ciclotón. Adicionalmente, en la síntesis del radionúclido con la molécula dexosi-D-glucosa se pueden presentar impurezas en el radiofármaco $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ como Cadmio 107 (^{107}Cd) y/o Cadmio 109 (^{109}Cd) [22].

En el mundo se han realizado varias investigaciones al respecto y han encontrado distintos radionúclidos, en especial se han obtenido resultados horas después del último bombardeo del ciclotrón.

En el año 2007, la Universidad de Palermo Italia realizó una caracterización espectrométrica de rayos gamma de residuos activados en los componentes de los blancos objetivos de un ciclotrón PET, modelo IBA Cyclone 18/9 ubicado en el centro de Medicina Nuclear de Bagheria Italia, utilizado para la producción del radiofármaco $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ (fluorodesoxiglucosa FDG). En este trabajo se determina los radionúclidos producidos en el blanco para las láminas de Havar, Titanio y en la horquilla extractora, para lo cual, se obtiene los siguientes

radionúclidos: ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{52}Mn , ^{51}Cr , ^{48}V , ^{46}Sc [23]. Concluye que la técnica de espectrometría gamma es útil a la hora de evaluar las actividades de radionúclidos con el fin de cumplir requisitos de protección radiológica.

En el año 2009, el Instituto Nacional de Metrología de la Radiación Ionizante en Roma realizó un estudio sobre la medición y evaluación de los riesgos debido a la exposición externa de la radiación e ingesta de elementos activados en el personal ocupacionalmente expuesto dedicado al mantenimiento de ciclotrones productores de Carbono – 11 (^{11}C) y Flúor – 18 (^{18}F), encontrando que los elementos activados durante la irradiación de un ciclotrón autoblandado Siemens Eclipse y un IBA cyclone 18/9 son de diferentes periodos de semidesintegración ($T_{1/2}$). En el estudio se consideran únicamente los elementos con $T_{1/2}$ mayores a 30 días.

En el ciclotrón IBA se encontró que las láminas de vacío contienen ^{56}Co , ^{22}Na , ^{65}Zn , en el ciclotrón Siemens se obtuvo ^{56}Co , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{54}Mn ; en láminas de Havar se generó ^{56}Co , ^{57}Co , ^{99}Tc , ^{52}Mn , ^{58}Co , ^{55}Fe ; en láminas de titanio, ^{49}V ; y en los objetivos de ^{18}F se tiene ^{109}Cd . El personal encargado del mantenimiento se monitorea por medio de dosímetros personales de cuerpo entero y muñeca, mientras hacen actividades de limpieza, recambio de piezas y componentes del ciclotrón. El riesgo de irradiación está relacionado directamente con las tasas de dosis emergentes y no con la generación de radionúclidos, solo se ha detectado un caso de contaminación interna debido a un radioisótopo llamado ^{65}Zn con una actividad de 286 Bq [24].

En el 2019, el Instituto de Química de radiación aplicada en Lodz - Polonia realizó un estudio sobre las impurezas que se pueden originar en la producción de $^{18}\text{F} - \text{FDG}$, puesto que los componentes que posee el objetivo del ciclotrón son una ventana, por lo general de plata donde el agua enriquecida ^{18}O reposa durante la irradiación. La plata natural contiene isótopos estables ^{107}Ag y ^{109}Ag que a partir de su interacción con protones de 11 MeV se producen radionúclidos de Cadmio-107 (^{107}Cd) y Cadmio-109 (^{109}Cd). Los elementos son clasificados como cancerígenos, por tanto, deben ser eliminados del radiofármaco $^{18}\text{F} - \text{FDG}$. La purificación se basa en un conjunto de columnas como por ejemplo resina de intercambio iónico y columnas de aniones de amonio cuaternario por sus siglas en inglés (QMA) [22], que cumplen varias funciones en el proceso de limpieza del radiofármaco.

Uno de los objetivos de este trabajo de referencia fue estimar la efectividad del proceso de purificación del radiofármaco para salvaguardar a los pacientes de posibles inyecciones accidentales con estos radionúclidos peligrosos. El estudio se hizo adquiriendo muestras en las diferentes etapas del procedimiento de producción del radiofármaco, se analizaron columnas de purificación y muestras finales del mismo. Los resultados fueron concentraciones de actividad de ^{107}Cd de hasta 97 veces mayor que la actividad de ^{109}Cd , se midió una actividad promedio de 33,1 kBq y 409 Bq respectivamente. La relación de actividad de ^{107}Cd y ^{109}Cd en las columnas QMA es de 90,9 y en las muestras finales de $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ no se observó impurezas de cadmio. Por tanto, se evidencia que los procedimientos de purificación son

suficientes y efectivos para obtener un radiofármaco seguro de $^{18}\text{F} - FDG$ [22].

En el año 2020 se identifica mediante un espectrómetro de rayos gamma de alta resolución niveles de actividad de radionúclidos producidos en el blanco de un ciclotrón GE MINITRACE ubicado en el Hospital Universitario de Badajoz en el suroeste de España, los componentes estudiados fueron la lámina de Havar, lámina de titanio y sello helicoflex [25]. Se seleccionaron dos grupos de muestras: 1. Conjunto de piezas de repuestos que contenía lámina de Havar, lámina de titanio y el sello helicoflex; 2. tres (3) láminas de Havar extraídas en tres años consecutivos. Las mediciones se realizaron en un detector de Germanio Hiperpuro HP-Ge 4 años después de tomar las muestras con el fin de identificar radionúclidos con periodos de semidesintegración largos, para ello, la metodología fue ubicar dichas muestras a diferentes distancias de la superficie del detector, teniendo en cuenta, el tiempo transcurrido después del final de bombardeo así poder disminuir el tiempo muerto en las mediciones. Se realizó la calibración de eficiencia para cada geometría de las muestras y su respectiva distancia para determinar las incertidumbres derivadas de la calibración, las cuales, fueron por debajo del 2% [25]. Finalmente, los espectros de rayos gamma fueron analizados en el software Genie 2000 donde se encuentra que la lámina de Havar del primer grupo contiene seis (6) radionúclidos ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{95}Tc , ^{183}Re , mientras que una de las láminas de Havar del segundo grupo contenía cuatro (4) radionúclidos ^{60}Co , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{54}Mn . Las concentraciones de actividad para los elementos activados se observan en mayor cantidad en la lámina Havar del grupo 1, debido a la dependencia del tiempo de enfriamiento después del último bombardeo, pues la lámina de Havar del primer grupo se analizó con apenas 160 días de decaimiento y el grupo dos con un tiempo de aproximadamente 2000 días. Además, se evidencian líneas gamma que no son lo suficientemente notorias en el espectro, pero que corresponden a la presencia de un radioisótopo con actividades bajas pero que su periodo de semidesintegración es largo, por tanto, una apreciación relevante en este estudio es que no solo se puede medir justo después de la última irradiación (o bombardeo), sino que es óptima la medición con tiempos mayores de enfriamiento o de decaimiento para identificar estos radionúclidos y sus concentraciones de actividad. En la lámina de Titanio se presenciaron seis (6) radionúclidos ^{56}Co , ^{57}Co , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{58}Co , ^{48}V , ^{75}Se y para el sello helicoflex se detectaron tres (3) radionúclidos ^{60}Co , ^{58}Co , ^{51}Cr , estos son producidos por interacciones nucleares de protones y neutrones secundarios con isótopos de Hierro Fe y Níquel Ni contenidos en la muestra [25].

Adicionalmente, evalúan las tasas de dosis a las que están expuestos trabajadores encargados de realizar el recambio de los blancos objetivos del ciclotrón mediante el cálculo de tasa de dosis efectiva de fotones para cada una de las actividades determinadas, considerando las muestras como una fuente puntual a cierta distancia. Los resultados muestran que las tasas de dosis son mayores en la lámina de Titanio, pero son de 0.25 mSv al año, valor por el cual está por debajo de los límites de dosis establecidos en el documento de la Comisión Internacional de Protección Radiológica ICRP No. 103 [25].

3. Aspectos Generales

En este capítulo se tratarán los aspectos teóricos mas relevantes en la producción del radiofármaco $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ dentro del ciclotrón médico. En cuanto a, reacciones nucleares que se generan tras la interacción de las partículas primarias y secundarias con los átomos de los materiales presentes en el blanco del ciclotrón. También es pertinente conocer los tipos de decaimientos radiactivos que ocurren de radionúclido padre a radionúclido hijo para determinar el tratamiento que se le debe dar a los desechos radiactivos.

La técnica más apropiada para la identificación de radionúclidos presentes en las piezas del blanco del ciclotrón es la espectrometría gamma con detector de germanio hiperpuro de alta resolución [26], por ello este trabajo se enfoca en la caracterización de los elementos activados del blanco del ciclotrón mediante espectrometría gamma.

3.1. Principios físicos de los ciclotrones y su producción

Los ciclotrones médicos producen radionúclidos emisores de positrones se originan con base a la energía del haz de protones capaz de provocar reacciones nucleares requeridas para su rendimiento práctico [27]. En la tabla 3-1 se indica la energía necesaria del haz para la producción de ciertos radionúclidos usados en medicina nuclear.

Tabla 3-1.: Energías del protón requeridas para la producción de radionúclidos [10].

Energía del protón (MeV)	Radionúclidos
0–10	F-18, O-15
11–16	C-11, F-18, N-13, O-15, Na-22, V-48
17–30	I-124, I-123, Ga-67, In-111, C-11, F-18, N-13, O-15, Na-22, V-48, Tl-201
30	I-124, I-123, Ga-67, In-111, C-11, F-18, N-13, O-15, Sr-82, Ge-68, Na-22, V-48

El ciclotrón es un dispositivo desarrollado por E. Lawrence y Livingston en 1931 usado para acelerar partículas cargadas como protones o deuterones. Las partículas energizadas son usadas para bombardear núcleos causando reacciones nucleares, una partícula cargada puede ser acelerada a alta energía con la ayuda de un campo magnético [10]. El ciclotrón está

compuesto por dos semicilindros huecos hechos de metales llamados Dees ubicados cara a cara con un espacio entre ellos, estos Dees están conectados a terminales de una fuente de voltaje alterno, por tanto, cada semicilindro toma su polaridad (+) o (-) [28].

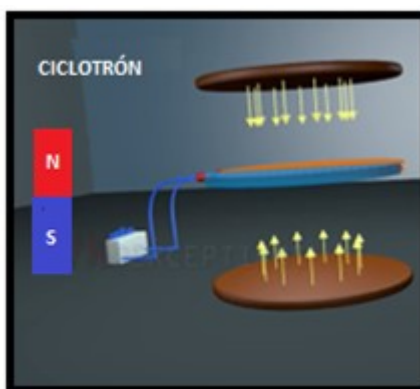


Figura 3-1.: Esquema del campo eléctrico producido en un ciclotrón [1].

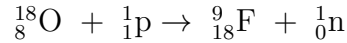
Dentro del espacio de los semicilindros se crea un campo eléctrico que permite la aceleración de las partículas cargadas. Los Dees están sometidos a un electroimán de alta potencia por encima y por debajo creando un campo magnético \vec{B} perpendicular al campo eléctrico \vec{E} , como lo muestra la figura 3-1, todos los componentes están dentro de una caja al vacío para evitar la interacción de las partículas con moléculas de aire u otros contaminantes.

Un ion de hidrógeno se ubica entre los semicilindros [29], allí actúa una fuerza en dirección al campo eléctrico \vec{E} . Debido a esta fuerza, el ión se acelera y la velocidad aumenta hasta ingresar a uno de los semicilindros en esta zona solo está presente el campo magnético luego el ión se mueve con velocidad constante y perpendicular al plano que contiene \vec{v} y \vec{B} . Allí experimenta una fuerza que proporciona la fuerza centrípeta y hace que su movimiento tome una trayectoria circular hasta llegar al espacio entre los Dees, donde interactúa nuevamente con el campo eléctrico adquiriendo mayor velocidad. El oscilador cambia la polaridad de los semicilindros [28].

Cuando el ión vuelve a estar bajo la influencia del campo eléctrico se acelera a una velocidad mayor que la anterior, permitiendo viajar en una trayectoria circular cada vez más grande, por lo tanto, el ión aumenta su velocidad y por supuesto aumenta el radio del recorrido. Por último, cuando el ión no tiene más espacio dentro de los Dees interactúa con un sistema de extracción que es una lámina de carbono, la cual, arranca los dos electrones orbitales dejando pasar únicamente el protón. Como la polaridad del haz cambia, la partícula se desvía y sale expulsada por una ventana con energía alta que permite la interacción con el objetivo o blanco del ciclotrón [28]. El protón choca con el oxígeno 18 (^{18}O) y por su gran energía la reacción convierte el ^{18}O en ^{18}F por medio de la reacción (p,n) desprendiéndose un neutrón

en el proceso.

Este tipo de reacción se representa por:



3.1.1. Aceleración de radiofrecuencia

Se producen gradientes de campo eléctrico cuando el campo de radiofrecuencia se acopla a los semicilindros (Dees). En cada par, uno de los Dees está a potencial de tierra y el otro a un voltaje más alto. La ganancia de energía de una partícula que pasa por el espacio entre los Dees donde se genera el campo eléctrico depende de la carga, la amplitud de la diferencia de potencial, la relación de fase de la partícula con el campo eléctrico y la longitud de camino entre los electrodos [10]. El tiempo para que la partícula cargada cruce el espacio entre los semicilindros y sea acelerada está dada por:

$$\frac{1}{\omega} = \frac{r}{v} \quad (3.1)$$

Donde, ω es la frecuencia orbital, r radio en el plano mediano, v velocidad orbital.

3.1.2. Campo magnético en trayectoria circular

Una partícula que se desplaza en un campo magnético experimenta una fuerza, la cual, es perpendicular a la dirección de su movimiento [30]. Se expresa por:

$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (3.2)$$

En cada momento el campo magnético actúa cambiando la dirección del vector velocidad, por tanto, la partícula sigue una trayectoria circular. Sabemos que, fuerza es igual a masa por aceleración. En el movimiento circular uniforme, la aceleración es el cuadrado de la velocidad angular por radio del giro ($a = \omega^2 r$) y $v = \omega r$. Entonces, se obtiene;

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Puesto que la fuerza magnética proporciona la fuerza centrípeta [30], tenemos:

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

El radio de la órbita de una partícula en un campo magnético se define por:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$r = p / [qB_z(r)] \quad (3.3)$$

Donde, r es el radio de la partícula en el plano medio, p momento de la partícula, $B_z(r)$ Inducción magnética en el plano mediano en el radio r , q es la carga de la partícula.

Las partículas oscilan alrededor de la órbita, teóricamente la frecuencia es constante, pero en la práctica la frecuencia disminuye con el radio por los aumentos de masa relativistas y porque disminuye la intensidad del campo magnético con el radio [10].

3.1.3. Sistema de vacío

El vacío dentro del ciclotrón debe mantenerse a un nivel bastante alto para que las partículas tengan un camino libre medio lo suficientemente largo como para ser aceleradas de manera efectiva. Existen tres tipos principales de bombas de vacío comúnmente utilizadas para ciclotrones. La primera es la bomba de difusión de aceite, la segunda es la bomba turbomolecular y la tercera es la bomba criogénica [10].

- Difusión de aceite: Una de sus desventajas es que el vapor de aceite puede entrar en el ciclotrón y hacer que se acumulen depósitos de carbón en algunas superficies.
- Bomba turbomolecular: Poseen velocidad de bombeo más altas, su desventaja es que puede causar daños en las paletas por la producción de ráfagas de aire.
- Criobombas: son bombas de vacío de atrapamiento de gas, es decir, las sustancias gaseosas se unen a las superficies frías dentro de la bomba por medio de criabsorción o criocondensación. Con el fin de producir vacío alto, las superficies frías deben enfriarse. Estas bombas se regeneran debido a que los gases que se han acumulado durante el bombeo se van eliminando cuando se apaga la unidad del compresor y se calientan los paneles criogénicos.

3.1.4. Extracción del haz

Consiste en la inserción de un dispositivo electrostático en el radio que se requiere para obtener una energía específica y el haz se desvía de la trayectoria circular normal. Por tanto, el haz se dirige hacia la ventana de salida del tanque de vacío y luego incide en un objetivo conectado al tanque. Debido a la desviación se pierde un 30 % a 40 % del haz por las colisiones con materiales circundantes que producen dos efectos:

- Baja eficiencia en la producción del haz
- Activación de los componentes del ciclotrón debido a la interacción de partículas dentro del tanque del ciclotrón.

3.1.5. Interacción de partículas cargadas con la materia

Es importante tener en cuenta que cuando los protones interaccionan con la materia son dirigidos a un blanco objetivo para obtener el radionúclido requerido. La interacción de los protones con la materia se da por varios mecanismos (se observan en la figura 3-2) los más predominantes son:

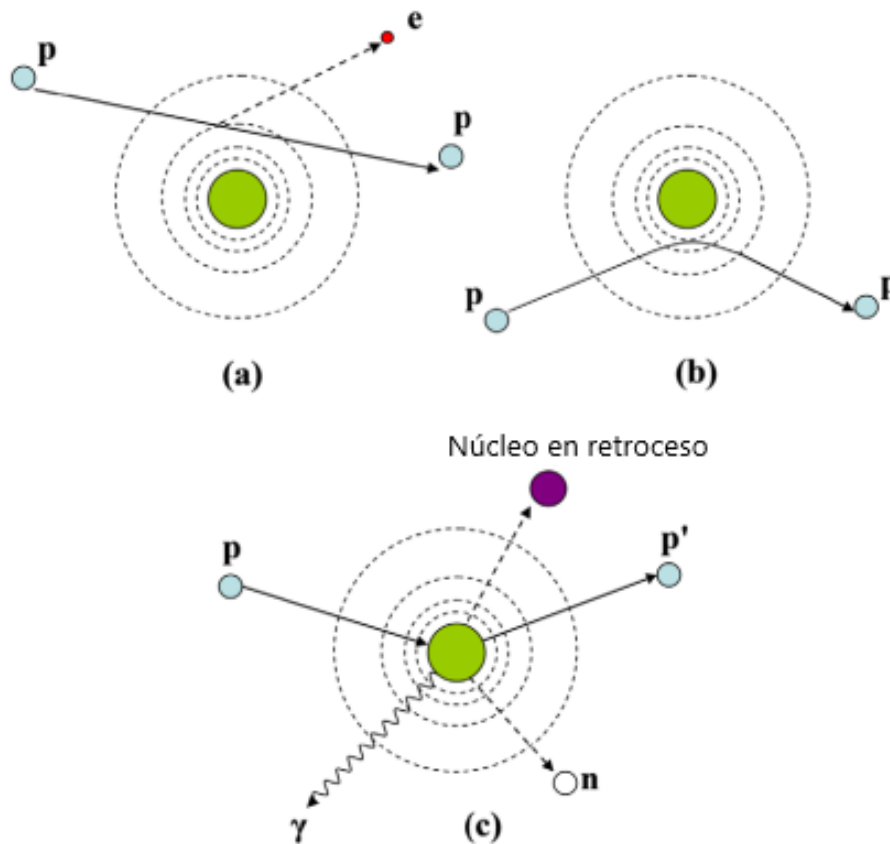


Figura 3-2.: a) Interacción inelástica de Coulomb con electrones atómicos. b) Interacción elástica de Coulomb con núcleos atómicos. c) Reacciones nucleares no-elástica [2].

- **Dispersión inelástica de Coulomb con electrones atómicos:** Produce la radiación que es utilizada para tratamiento de cáncer, en este caso los protones pierden continuamente energía cinética [2]
- **Dispersión elástica de Coulomb con núcleos atómicos:** Ocurre cuando el protón pasa cerca del núcleo atómico donde experimenta una interacción repulsiva, debido a la gran masa del núcleo, lo cual desvía el protón de su trayectoria rectilínea.

- **Reacciones nucleares no-elástica:** Este tipo de interacción el protón ingresa directamente al núcleo y puede emitir un protón, un deuterón o partículas alfa y la interacción de estas partículas hace que se produzcan partículas no cargadas como neutrones o rayos gamma. [31] La mayoría de neutrones producidos se dan por la interacción nuclear de protones.

3.1.6. ^{18}F – FDG radiofármaco producido en ciclotrón para tomografía por emisión de positrones PET

En medicina nuclear, el radiofármaco más utilizado en PET es el ^{18}F -FDG, el cual, es producido en ciclotrones médicos. Su ventaja es detectar alteraciones celulares funcionales antes de que ocurran alteraciones estructurales. Este tipo de técnica sirve para estudiar cualquier tipo de tumor puesto que proporciona información metabólica, en comparación con otras técnicas diagnósticas que no pueden detectar estas lesiones y proporcionan información estructural o anatómico.

El radiofármaco se produce por la unión del radionúclido ^{18}F con una molécula biológica llamada dexosi-D-glucosa un derivado de la glucosa en el que se reemplaza el grupo hidroxilo del carbono 2 por un átomo de flúor para obtener el trazador ^{18}F – FDG [32].

Según Magdalena Długosz-Lisiecka [22] y Chaves, J Carbajo [3], se utiliza un módulo de procesamiento químico para la síntesis de ^{18}F – FDG como el que se observa en la figura 3-3. La solución radiactiva que contiene el flúor-18 (^{18}F) pasa a través de una resina de intercambio iónico, proceso que se basa en cargas eléctricas para realizar la separación del flúor y el ^{18}O .



Figura 3-3.: Sistema de procesamiento químico para la unión de ^{18}F – FDG. Tomada en Ciclotrón Colombia, Medellín.

Después, el flúor se eluye en el recipiente de reacción donde se lleva a cabo la síntesis con carbonato de potasio y el agua se elimina mediante destilación. Durante el paso de marcación, el flúor reacciona con un precursor orgánico que al ser calentado con ácido, produce una mezcla de reacción cruda de $^{18}\text{F} - \text{FDG}$. Por último, esta mezcla pasa por columnas de Aniones de Amonio Cuaternario (por sus siglas en ingles QMA) para la purificación del radiofármaco, con el fin de separar impurezas químicas, obteniendo el vial del producto final (ver esquema de purificación figura 3-4).

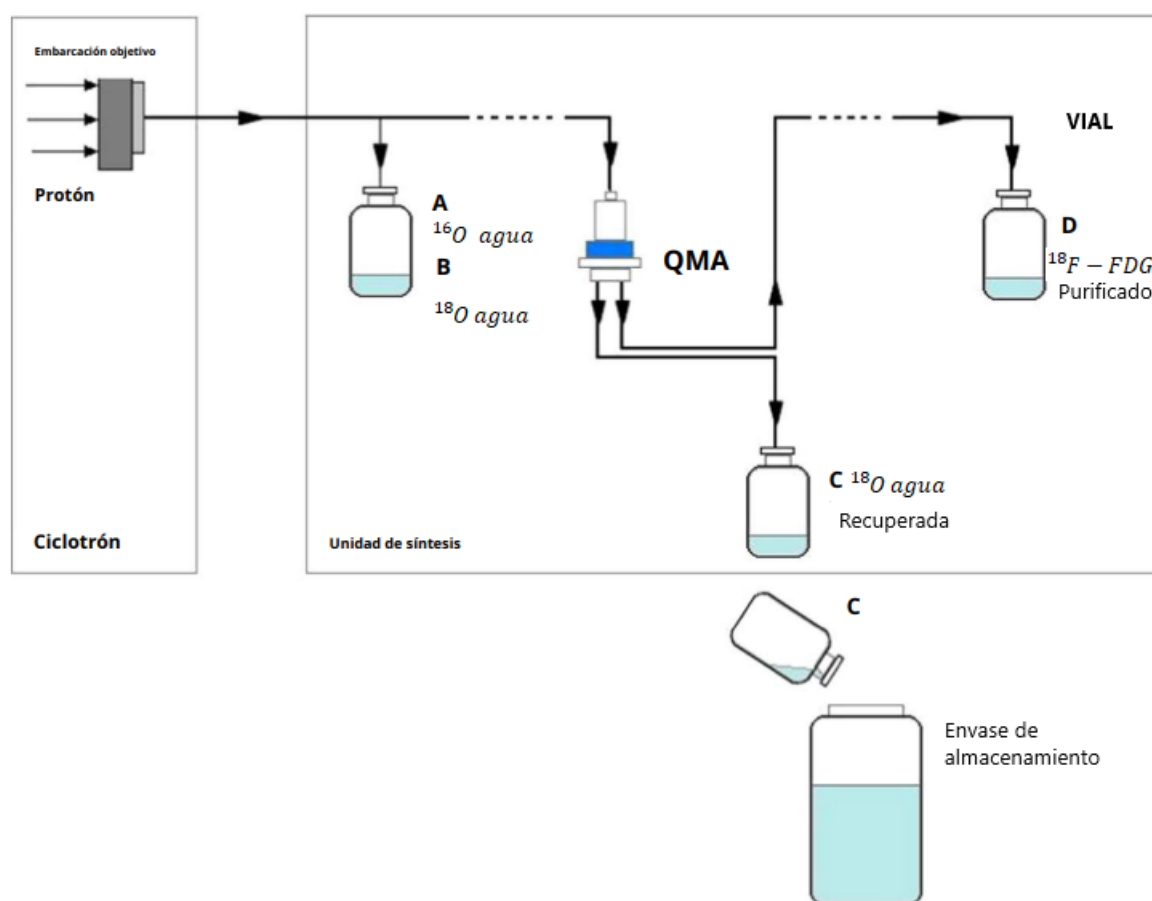


Figura 3-4.: Esquema de columna de purificación $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ [3].

El ^{18}F tiene un periodo de semidesintegración de 109,7 minutos, la energía del positrón emitido es 0,64 MeV, implica menor dosis de radiación al paciente y permite imágenes de alta resolución. Principalmente, es utilizado para la evaluación del metabolismo celular de la glucosa, permite su empleo en oncología, cardiología y neurología [20].

La $^{18}\text{F} - \text{FDG}$ es captada en células con altos niveles de glucosa. Aquellas células que proliferan, tienen una elevada síntesis de proteínas y ADN requieren de más glucosa. De acuerdo

a lo anterior, el radiofármaco se capta más en células tumorales que en células normales y dependiendo del nivel de captación se tiene un índice del grado de malignidad.

La detección de un radionúclido (^{18}F) emisor de positrones se da por su aniquilación con un electrón del medio, produciendo dos rayos gamma γ en direcciones opuestas con energías de 511 keV (ver figura 3-5), los cuales, inciden en un par de detectores ubicados uno frente al otro (gantry del tomógrafo completo de detectores enfrentados) y a la salida producen señales eléctricas que son analizadas para ser mostradas en un monitor de TV y obtener información de la distribución del radiofármaco en el cuerpo del paciente [20].

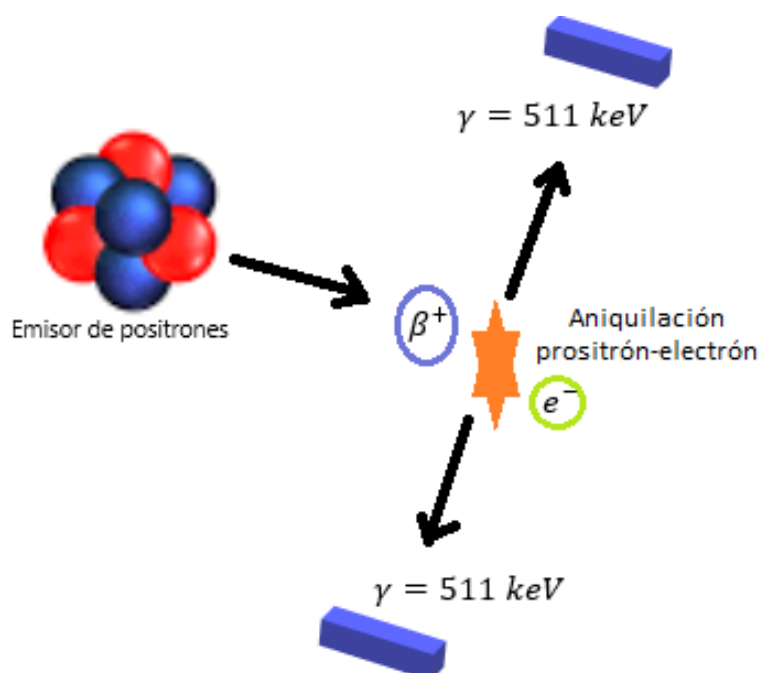


Figura 3-5.: Esquema de la aniquilación del positrón con un electrón del organismo. Imagen propia.

3.2. Reacciones nucleares

En este trabajo se empleará la nomenclatura de las reacciones nucleares de acuerdo a la recomendada por Bas Andreu, Teresa [33]:

$$A(a,b)B$$

Donde, A es el blanco objetivo, a es la partícula incidente, B el producto y b la partícula emitida. Dentro de la producción de radiofármacos utilizados en medicina nuclear por el bombardeo de partículas cargadas a los materiales que componen el blanco objetivo, se obtienen

varias reacciones nucleares (p, n) , (p, α) , (n, p) , (p, Xn) , (p, Xp) , etc. Es decir, se producen varios radionúclidos por las interacciones de protones. Las partículas bombardeadas penetran el blanco y son frenadas, por tanto, la sección eficaz es diferente para cada perfil del blanco [34].

Los radionúclidos producidos en un ciclotrón son ^{15}O , ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N [35], se dan debido a la aceleración de partículas cargadas y su interacción con el material, para lo cual, deben tener la suficiente energía para provocar la reacción nuclear específica [33]. Esto va a depender de:

- La sección eficaz de la reacción de interés.
- La energía de la partícula incidente con el objetivo de superar las fuerzas de repulsión del núcleo.
- Espesor del blanco objetivo entre mayor concentración de radionúclidos, mayor probabilidad para que se produzca la reacción.

Los ciclotrones de Antioquia y Cundinamarca usan haces de energías de 11 MeV y 16,5 MeV, respectivamente. Se dedican a la producción de radionúclidos utilizados en la técnica de tomografía por emisión de positrones PET, en especial, Flúor-18 un radiofármaco que involucra una reacción de tipo (p, n) . A partir de ello, se van a producir diferentes reacciones que van a generar otros radionúclidos y éstos van a dar lugar a otro tipo de reacciones [33]. El ^{18}F se obtiene de la irradiación de agua enriquecida, en un pequeño volumen de titanio, el cual, está diseñado para llevar a cabo la reacción de producción $^{18}\text{O} (p, n) ^{18}\text{F}$. Para minimizar la producción de ^{13}N se emplea agua enriquecida (^{18}O) al 95 % [34].

3.3. Decaimientos radiactivos presentados por la producción de radiofármacos en ciclotrones

Los radionúclidos activados en las piezas del blanco de los ciclotrones pueden desintegrarse mediante diferentes mecanismos, como la emisión de partículas beta o gamma. Cada radionúclido se representa mediante 3.4 donde X es el símbolo del elemento químico, Z es el número atómico y A es el número másico, indican el número de protones y el número de protones más neutrones en el núcleo, respectivamente.

$${}^A_Z\text{X} \tag{3.4}$$

3.3.1. Desintegración partículas beta

- Desintegración beta menos (β^-):

Es la emisión de un electrón y un antineutrino electrónico (e) por parte del núcleo padre para transformarse en el núcleo hijo, debido al exceso de neutrones. Se convierte en un núcleo con un número atómico Z más alto y el número másico A no cambia, por tanto, los núcleos padre e hijo son isóbaros.

Esta transformación nuclear se representa como:

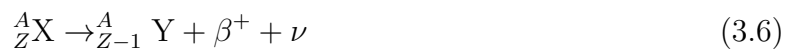


El alcance de las partículas beta menos es de varios metros en el aire, y debido a su bajo peso comparado con las partículas alfa, su poder de ionización es menos intenso, siendo fácilmente absorbidas por la materia. El poder de penetración depende de su energía y de la densidad del absorbedor.

- Desintegración beta más ($\beta+$):

Es la emisión de un positrón, el cual, es la antipartícula del electrón y un neutrino de electrón. Corresponde a la conversión de un protón en un neutrón, de manera que se emite la partícula beta más y un neutrino, en algunos casos el núcleo residual emite radiación electromagnética. La partícula se convierte en un núcleo con un número atómico más bajo y no cambia el número másico (A).

Se representa por:



Ejemplo: Decaimiento del ${}^{18}\text{F}$



El positrón puede seguir existiendo solo mientras tenga energía, si se encuentra en reposo e interactúa con un electrón cercano se producen dos fotones de 511 keV expulsados desde el centro de la reacción en 180° [36].

3.3.2. Captura electrónica

Es un proceso donde el núcleo de un átomo captura un electrón de la capa K o L, se representa similar a la desintegración $\beta+$ de la siguiente manera:



Como producto de dicha captura, un protón se transforma en neutrón. Por tanto, el número atómico se reduce en uno, mientras que el número de neutrones aumenta en uno, lo que resulta en un nuevo elemento químico con un número atómico menor.

La vacante en K o L es ocupada por un electrón de los orbitales atómicos exteriores provocando la emisión de radiación X característica [36].

3.3.3. Desintegración partículas gamma

Ocurre cuando un núcleo atómico emite un fotón gamma de alta energía, a partir de un estado excitado a uno de menor energía, concepto conocido como transición isomérica.

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z Y + \gamma \tag{3.9}$$

Cuando existe des-excitación nuclear por la emisión del fotón gamma, se produce una vacante, la cual es ocupada por un electrón de la capa más externa y la transición de energía hace que se emita rayos X, este suceso se le llama conversión interna.

El fotón gamma es una onda electromagnética que viaja a la velocidad de la luz y tiene una energía muy alta, lo que le permite penetrar a través de la materia y producir daño en los tejidos biológicos.

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z Y + e_K \tag{3.10}$$

3.4. Esquemas de desintegración

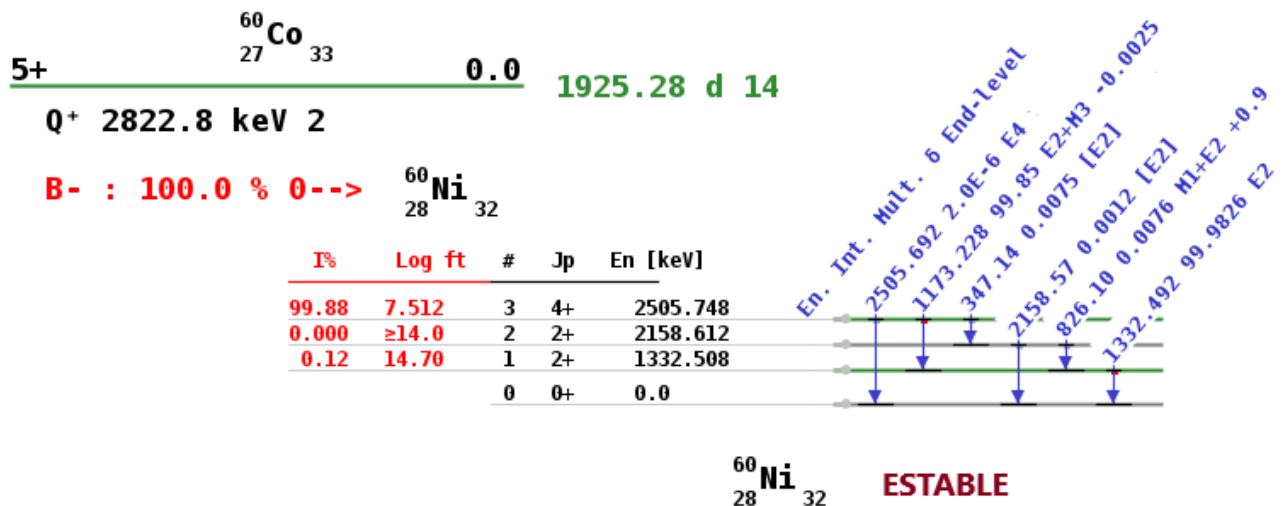


Figura 3-6.: Desintegración beta menos (β^-) del ${}^{60}\text{Co}$ al ${}^{60}\text{Ni}$. [4].

El ${}^{60}\text{Co}$ es uno de los radionúclidos que se activa en el blanco del ciclotrón, con una vida media de 1925,28 días. ${}^{60}\text{Co}$ decae 100 % por desintegración β^- al isótopo estable níquel-60

(^{60}Ni) desde el cual emite dos fotones de rayos gamma de 1,17 MeV y 1,33 MeV para alcanzar el estado fundamental del Niquel (ver figura 3-6).

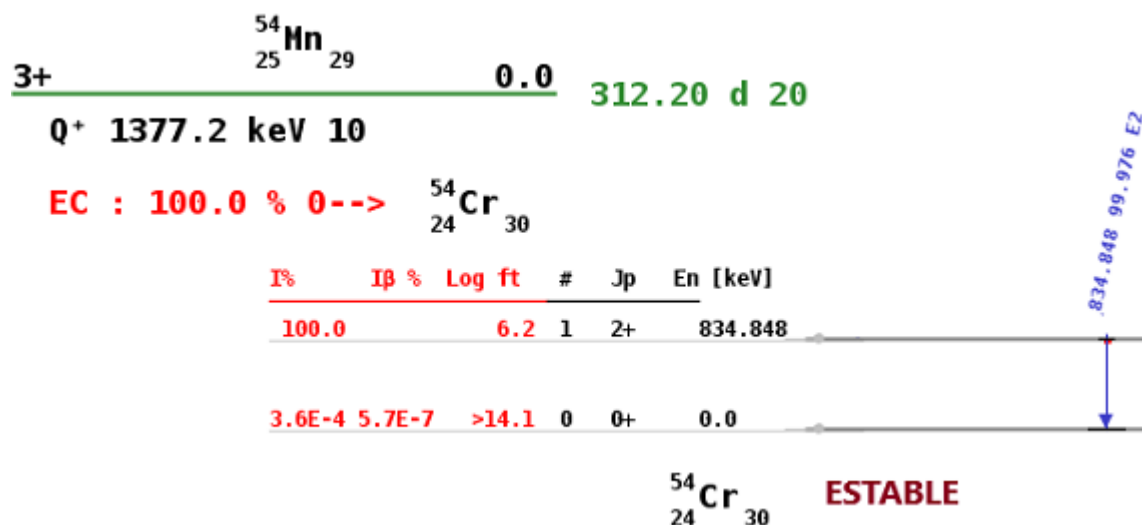


Figura 3-7.: Desintegración del ^{54}Mn al ^{54}Cr mediante captura electrónica. El ^{54}Mn tiene una vida media de 312,20 días. [4].

El ^{54}Mn decae por captura electrónica directamente al nivel excitado de 834,84 keV (+2) de ^{54}Cr y por captura electrónica muy débil y transiciones beta mas ($\beta+$) al estado fundamental (0+) de ^{54}Cr [37].

3.5. Espectrometría Gamma

Los estudios internacionales [22, 23, 24, 25] revelan que la técnica adecuada para evaluar los diferentes tipos de radionúclidos producidos en el blanco objetivo de ciclotrones es la espectrometría gamma de alta resolución. La utilización de un detector de germanio hiperpuro (HPGe) portátil para realizar mediciones “in situ” permite determinar las concentraciones de actividad de radionúclidos presentes [38].

Este tipo de detectores permiten la identificación y cuantificación de elementos activados en el blanco objetivo. A través de la obtención de espectros de energía es posible conocer los radionúclidos presentes en la producción del radiofármaco ^{18}F – *FDG*. Los factores que determinan el espectro son:

- Tipo de detector
- Energía de la radiación
- Tamaño del detector
- Materiales que rodean el detector

La calidad de los resultados obtenidos va a depender de la calidad del espectro, las incertidumbres asociadas a las mediciones, la eficiencia del detector. Es importante tener presente que de acuerdo con la resolución de energía del detector vamos a poder discriminar en el espectro los picos generados por la detección de fotones gamma.

3.5.1. Componentes del sistema del detector de HPGe

El espectrómetro de germanio hiperpuro (HPGe) es un detector semiconductor de radiación gamma, altamente utilizado debido a la mayor resolución que ofrece en comparación con otros detectores como los de NaI(Tl) [39]. Para lograr la máxima eficiencia, los detectores de HPGe deben operar a temperaturas muy bajas, por lo tanto, el cristal de germanio que se encuentra sellado en una cámara de vacío al interior, debe ponerse en contacto térmico con nitrógeno líquido para asegurar un correcto funcionamiento.

Cuando la radiación ionizante (rayos gamma) ingresa al volumen sensible del detector, la energía es absorbida y convertida en carga eléctrica. El detector de rayos gamma posee una cadena electrónica (el diagrama se observa en la figura 3-8) para el camino y las transformaciones que sigue la señal eléctrica conformada por una fuente de alto voltaje, un preamplificador, un convertidor análogo a digital y el sistema informático para la formación del espectro de radiación gamma [26].

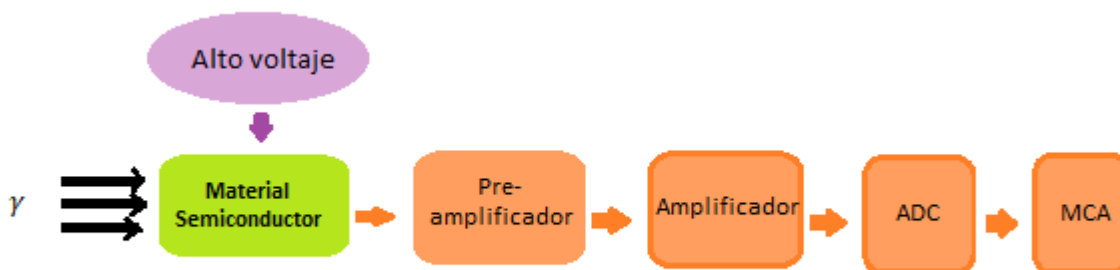


Figura 3-8.: Diagrama de cadena electrónica detector gamma. Imagen propia.

Inicialmente, el material semiconductor absorbe los fotones gamma generando pares electrón-hueco, los cuales viajan hacia los electrodos bajo la influencia del campo eléctrico, luego son recogidos por el **preamplificador** y allí son convertidos en un pulso de voltaje [40]. El **amplificador** cambia la forma del pulso y aumenta su tamaño. La señal producida se convierte en un valor digital gracias a un **Convertor Análogo a Digital** (ADC por sus siglas en inglés), que cambia la escala completa de la señal de entrada en diferentes canales desde 256 hasta 16284 en potencias de dos [41]. Después, el **Analizador Multicanal** (MCA

por sus siglas en ingles) clasifica los pulsos por su altura y hace un conteo del número de pulsos dentro de los intervalos de altura. Las alturas de los pulsos son proporcionales a las energías de la radiación incidente sobre el detector, por tanto, la información transportada por los pulsos es la cantidad de energía absorbida de rayos gamma y se reúne en el espectro de rayos gamma [40].

3.5.2. Calibración del detector espectrómetro gamma

La calibración del detector gamma permite interpretar el espectro de rayos gamma en términos de energía y cantidad de radionúclido. Hay tres parámetros importantes que se deben ajustar para la obtención de espectros, los cuales son:

- Calibración de energía
- Calibración ancho de pico a media altura (Full Width at Half Maximum por sus siglas FWHM) y,
- Calibración por eficiencia.

Actualmente, el análisis de espectros se hace mediante un software que permiten realizar las calibraciones correspondientes y así tener confiabilidad en los resultados.

Consideraciones generales para el análisis de los picos que comprenden el espectro gamma

Sabemos que la forma de los espectros gamma construidos en una medición toman la forma de una gaussiana y ésta puede estar sobre un fondo que debe ser restado (ver figura 3-9), por tanto, es necesario recordar la expresión teórica de la Gaussiana, es decir, normalizada:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{(-\mu-x)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.11)$$

donde, σ es la desviación estándar, μ es el valor en la coordena x que coincide con el valor máximo del pico.

La **amplitud del pico, M** es:

$$M = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (3.12)$$

Se debe tener en cuenta que, la altura del pico esta relacionada con el tamaño de la muestra, en el caso experimental, el área bajo la curva de la gaussiana que corresponde a la intensidad del pico es [41]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} M\sqrt{2\pi}\sigma G(x)dx = M\sqrt{2\pi}\sigma \int_{-\infty}^{+\infty} G(x)dx = M\sigma\sqrt{2\pi} \quad (3.13)$$

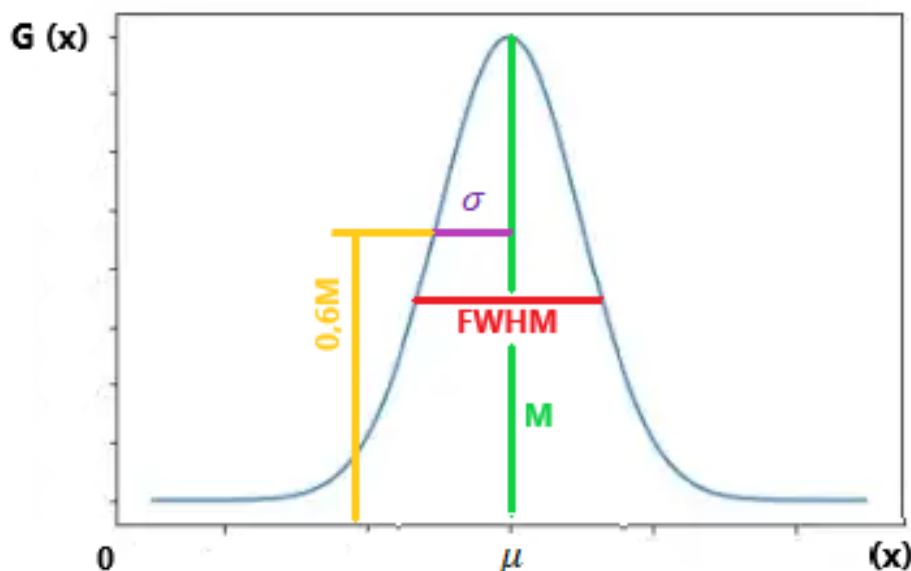


Figura 3-9.: Esquema de la gaussiana normalizada, donde FWHM es la anchura a media altura del pico, M la altura o amplitud del pico. Imagen propia.

Calibración por energía:

La idea principal de esta calibración es encontrar una relación entre la posición del pico (canales) en el espectro y la energía de rayos gamma correspondiente. Por tanto, se realiza una medición de un espectro de una fuente conocida y se compara la posición del pico medido con la energía. Es importante, que las energías de calibración abarquen el rango en que se utilizará el espectrómetro y el tiempo para la obtención de estos espectros debe ser suficiente para obtener una buena precisión estadística de los picos [40].

La calibración se enfoca en proporcionar una lista de picos de calibración en canales y su respectivo valor de energía. Por lo general, esta relación se ajusta a una recta (ver ecuación 3.14), la intención es que la calibración sea lineal:

$$E(keV) = B_1(keV) + G \times C(\text{Canales}) \quad (3.14)$$

Donde, $B_1(keV)$ es el intercepto de la recta con el eje Y, G es la pendiente de la calibración lineal y C la posición del canal.

Actualmente, existen programas para el análisis de espectros gamma capaces de buscar los picos, medir la posición del pico en canales y relacionar energía/canal. En algunas ocasiones, es necesario hacer la calibración de manera manual para que el programa pueda encontrar los picos.

Calibración de ancho de pico a media altura FWHM:

Este parámetro es de vital importancia para la medición del área bajo la curva del pico y para el ajuste correspondiente. El objetivo principal es determinar el ancho de un pico a media altura en función de la energía [40]. La función que mejor se ajusta a la variación de FWHM con la energía es una raíz cuadrática [40]. El ancho de pico a media altura en canales se puede estimar de la siguiente manera:

- Ubicar la mitad de la altura del pico, teniendo presente el fondo,

La mitad de la altura está en $= \frac{1}{2}M + (B_0)$, donde, B_0 es el fondo.

- Luego, para conocer la anchura a esa altura se hace la diferencia entre los dos valores de la coordenada x que interceptan con el valor de la altura.

Ahora, la idea es encontrar el FWHM en unidades de energía entonces podemos usar el coeficiente G de la calibración de energía-canales para encontrar la relación de FWHM (canales) y FWHM (keV);

$$FWHM(keV) = G \times FWHM(canales) \quad (3.15)$$

y como mencionamos anteriormente para encontrar la relación entre la energía teórica y ancho de pico del espectro graficamos estos parámetros y por lo general se ajustan a una raíz cuadrática [40] de la forma:

$$FWHM(keV) = C_0 + C_1\sqrt{E(keV)} \quad (3.16)$$

Calibración por eficiencia:

La eficiencia del detector depende directamente de la energía del radionúclido, es importante que la calibración cubra el rango de energía para el cual se utilizará el detector [42].

En espectrometría gamma la intención es relacionar el pico del espectro con la cantidad de radiactividad. Es por esto, que se necesita asociar el área del pico a una energía particular, con el número de rayos gamma emitidos por la fuente y tener en cuenta la geometría de la misma [40].

La eficiencia total se define según [42] y [40] como:

$$\varepsilon(E) = \frac{\text{número de cuentas colectadas en el fotopico}}{\text{fotones de energía } E \text{ emitidos por la fuente}}$$

$$\varepsilon(E) = \frac{I(E)}{N_{emit}(E)} \quad (3.17)$$

El número de fotones de energía E emitidos por una fuente durante un tiempo determinado t esta dado por:

$$N_{emit}(E) = A \times b(E) \times t$$

donde, A es la actividad de la fuente en el momento de la medición dada por:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-(\ln(2) \cdot t)/T_{1/2}} \quad (3.18)$$

A_0 es la actividad inicial de la fuente,

λ es la constante de desintegración, es decir, la probabilidad de que un átomo se desintegre en la unidad de tiempo,

$T_{1/2}$ es el periodo de semidesintegración (tiempo que tarda una muestra radiactiva en reducirse a la mitad),

t es el tiempo de medición del espectro,

$b(E)$ es la probabilidad de emisión de un rayos gamma, es decir, el porcentaje de los decaimientos radiactivos que van del estado base al primer estado excitado del núcleo hijo, en los cuales se emite rayos gamma.

La **eficiencia relativa** tiene en cuenta el cambio de la eficiencia entre una energía y otra tomando los datos de cada energía en un mismo tiempo t. Entonces se determina a partir de:

$$\varepsilon(E) = \frac{I(E)}{A \times b(E)} \quad (3.19)$$

Actualmente, los fabricantes de los programas para el análisis de espectros gamma estan proporcionando datos de calibración técnicos con cada detector asociado, con el fin de disminuir estos procesos de calibraciones manuales para garantizar la confiabilidad de los resultados.

3.6. Normatividad asociada a la gestión de desechos radiactivos

El OIEA contiene una colección de normas de seguridad para la gestión de desechos radiactivos que sirve como guía para tomar acciones que permitan una gestión segura [5].

El Ministerio de Minas y Energía (MME) en su resolución 180005 de enero de 2010 [11], modificada por la resolución 41178 de 2016 adopta las normas para la gestión de desechos radiactivos en Colombia.

La operación de un ciclotrón genera desechos radiactivos, es por ello que en esta sección realizaremos una descripción de los aspectos importantes que involucran la seguridad del Trabajador Ocupacionalmente Expuesto (TOE) y del medio ambiente [13] en las etapas de gestión.

3.6.1. Gestión de desechos radiactivos

Definiciones

En el reglamento de la gestión de desechos radiactivos [11] se encuentran descritos los términos utilizados para la interpretación y aplicación del mismo. A continuación, se define cada etapa del proceso de gestión:

- **1. Tratamiento:** Operaciones que se realizan para mejorar la seguridad del medio ambiente y del personal expuesto.
- **2. Caracterización los desechos:** Determinación de las propiedades físicas, químicas y radiológicas de los desechos para saber el acondicionamiento y el almacenamiento que se debe realizar para luego la disposición final.
- **3. Acondicionamiento:** Actividades que se deben realizar para ubicar los desechos radiactivos en bultos adecuados para la manipulación, almacenamiento o transporte del mismo.
- **4. Almacenamiento temporal:** Es un zona determinada dentro de la instalación para el aislamiento seguro de los desechos radiactivos, con el objetivo de proteger al medio ambiente y a los seres humanos.
- **5. Disposición final:** Es la etapa de finalización del control regulatorio de los desechos, el momento donde se pueden abandonar el objeto o el líquido como desecho ordinario.

Aspectos importantes en la gestión de desechos radiactivos

Según la resolución 180005 de 2010 del MME [11], los desechos radiactivos se clasifican, de acuerdo a, su periodo de semidesintegración y concentración de actividad en la tabla 3-2 se puede identificar la clase y grupo.

Las instalaciones que utilizan radiaciones ionizantes y generan desechos radiactivos se comprometen con la implementación de acciones para disminuir la generación de desechos radiactivos.

Inicialmente, se recopilan y segregan los desechos radiactivos dependiendo de los siguientes aspectos:

- Radiactivos y no radiactivos
- Concentración de actividad de los desechos
- Periodo de semidesintegración inferiores a 100 días.
- Forma física y química: Líquido o sólido
- Desechos peligrosos no radiológicos

Es importante caracterizar los desechos radiactivos para determinar la concentración de actividad de los radionúclidos presentes en las piezas del blanco de un ciclotrón, y poder dar un tratamiento de manera correcta. Por tanto, las instalaciones generadoras de estos desechos pueden contar con la tecnología y el personal competente para realizar la caracterización, sin embargo, sino se cuenta con estos recursos es posible contratar el servicio de caracterización. Una de las empresas capacitadas para el ejercicio es la Instalación Centralizada de Gestión de Desechos Radiactivos ubicada en el Servicio Geológico Colombiano [6].

El almacenamiento de los desechos debe ser en contenedores específicos que deben identificarse para su almacenamiento, manipulación y transporte. Por lo menos, debe llevar una etiqueta con la siguiente información:

- Número de identificación
- Radionúclidos presentes
- Actividad en unidades de Bq
- Tasa de dosis en la superficie
- Cantidad (peso)
- Persona responsable de la actividad

Tabla 3-2.: Clasificación de desechos radiactivos. Fuente: Resol. MME 180005 de 2010 [11].

<i>Grupo</i>	<i>Clase</i>	<i>Descripción</i>	<i>Método de gestión</i>
1	Desechos exentos	Materiales que tienen radionúclidos donde las concentraciones de actividad se encuentran por debajo de los niveles de dispensa.	No aplica porque el material queda fuera del control regulatorio.
2	Desechos de muy corta vida	Materiales que tienen radionúclidos de muy corto periodo de semidesintegración, con concentraciones de actividad por encima de los niveles de dispensa.	Almacenamiento temporal (años), hasta que la actividad llegue por debajo de los niveles de dispensa.
3	Desechos de nivel muy bajo	Materiales que tienen radionúclidos con periodo de semidesintegración corto y altos en concentración de actividad; y radionúclidos con periodo de semidesintegración largo pero con niveles bajos de actividad.	Almacenamiento en una zona de aislamiento y confinamiento.
4	Desechos de nivel bajo	Materiales que tienen radionúclidos donde las concentraciones de actividad están por encima de los niveles de dispensa. radionúclidos con periodo de semidesintegración corto y altos niveles de actividad y rasuñidos de periodos de semidesintegración largo pero con niveles relativamente bajos de actividad.	Almacenamiento en condiciones robustas de aislamiento y confinamiento, por un tiempo de hasta cientos de años.
5	Desechos de nivel intermedio	Materiales con radionúclidos con periodo de semidesintegración largo, emisores de partículas alfa en concentraciones superiores a las de los desechos de nivel bajo.	Almacenamiento en zonas con profundidad entre unas decenas y unos cientos de metros.
6	Desechos de nivel alto	Materiales que contienen radionúclidos con periodos de semidesintegración cortos y largos que generen cantidades significativas de calor, debido al proceso de decaimiento radiactivo.	Almacenamiento con el más alto grado de confinamiento y aislamiento de la biósfera. Ubicación de los desechos en varios cientos de metros, en zonas geológicamente estables.

Los desechos sólidos deben ir en bolsa de plástico resistente y sellante. Los desechos líquidos deben estar en recipientes o viales, teniendo en cuenta, las características químicas y radiológicas.

En una instalación generadora de desechos radiactivos es primordial implementar registros técnicos para el control de la gestión, ya que permite llevar seguimiento a cada uno de las etapas y definir su fecha de evacuación a partir de cálculos de actividad del radionúclido. La liberación de los desechos al medio ambiente se debe hacer mediante previa autorización del ente regulador para garantizar que los materiales a liberar cumplan con los niveles de dispensa.

El método adecuado para la gestión de desechos radiactivos es la concentración y retención de los radionúclidos, más que su dispersión en el medio ambiente. La liberación de desechos radiactivos en el aire, agua y suelo se debe hacer bajo los límites autorizados [5].

Dispensa de los desechos radiactivos

Los niveles de dispensa de algunos radionúclidos que pueden estar activados en las piezas del blanco de un ciclotrón se disponen en la tabla 3-3. Esto se define como el valor de concentración de actividad establecido por el ente regulador [11], por debajo del cual los materiales radiactivos pueden ser evacuados como un residuo convencional.

Tabla 3-3.: Niveles de dispensa para desechos sólidos [12].

<i>Radionúclido</i>	<i>Nivel de dispensa para cantidades moderadas menores a 3 toneladas (Bq/g)</i>
Co-60	10
Co-56	10
Co-57	100
Co-58	10
Mn-54	10
V-48	1
Zn-65	10
F-18	10
Cd-109	10000

Los niveles de dispensa de cantidades grandes de desechos radiactivos se puede encontrar en la Guía de seguridad N° RS-G-1.7 del Organismo Internacional de Energía Atómica [43].

Los materiales que contengan una mezcla de radionúclidos de origen artificial deben cumplir [5] la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{CA} \leq 1 \quad (3.20)$$

donde, C_i es la concentración de actividad del radionúclido i , CA es el nivel de dispensa (en Bq/g) del radionúclido presente en el material, y n es el número de radionúclidos.

3.6.2. Protección radiológica de las personas y del medio ambiente

El personal capacitado para realizar recambios o mantenimientos está expuesto a la radiación ionizante emitida por las piezas activadas, debido al bombardeo de protones y su interacción con los diferentes materiales. Es importante velar por la protección radiológica de los trabajadores ocupacionalmente expuestos TOEs y para ello se debe estudiar y aplicar las recomendaciones del sistema global de protección radiológica [44].

En el marco de la protección radiológica en seres humanos que laboran en instalaciones generadoras de desechos radiactivos, sabemos que, se exigen pautas para el control de la exposición a radiación y dentro de estas se encuentra los tres principios: Justificación, optimización y límites de dosis (ver tabla 3-4) especificados en la ICRP 103 de 2007 [44]. Por tanto, las etapas de la gestión de desechos radiactivos deben optimizarse al máximo para evitar exposiciones adicionales a los TOEs y siempre tener presente las restricciones de dosis.

Tabla 3-4.: Límites de dosis [13].

<i>Magnitud</i>	<i>TOE</i>	<i>Público</i>
Dosis efectiva	20 mSv por año*	1 mSv en un año
Dosis equivalente anual en:		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	-

*Promedio en un periodo de cinco años consecutivos.

Estimar las tasas de dosis de radiación a la que está expuesta un TOE en el mantenimiento de un ciclotrón médico es primordial para garantizar que se cumple con el principio de optimización de la protección radiológica donde las exposiciones a la radiación deben ser niveles tan bajos como sea razonablemente posible (As Low As Reasonably Achievable por sus siglas ALARA) [45], y por supuesto cumplir con el principio de la aplicación de límites de dosis establecidos en la normatividad colombiana [13].

Las **magnitudes físicas** dosimétricas en la protección radiológica son:

Dosis absorbida:

Se define como el cociente entre la energía media impartida por la radiación ionizante y la masa [44], expresado por:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (3.21)$$

La unidad al Sistema Internacional de la dosis absorbida es $\frac{J}{kg}$ o también llamado Gray (*Gy*).

Dosis equivalente

Se define como la dosis absorbida promedio en el volumen de un órgano o tejido $D_{T,R}$, debido al tipo y energía de la radiación se simboliza con la letra R. Expresada por:

$$H_T = \sum W_R D_{T,R} \quad (3.22)$$

donde, W_R es el factor de ponderación para la radiación del tipo R, estos factores se encuentran en [44]. La unidad de dosis equivalente es el $\frac{J}{kg}$ o también llamado (*Sv*).

Dosis efectiva

Definida como la suma ponderada de las dosis equivalentes a los tejidos, expresada por:

$$E = \sum W_T \sum W_R D_{T,R} \quad (3.23)$$

donde, W_T es el factor de ponderación para el tejido T, la unidad de dosis efectiva es el Sievert (*Sv*). Se debe tener en cuenta que, la dosis efectiva y la dosis equivalente no son medibles. Para la exposición ocupacional sus valores son determinados a partir de coeficientes que las relacionan con magnitudes medibles [44].

En ese sentido, la evaluación de la dosis efectiva o dosis equivalentes medias en órganos o tejidos se hace utilizando magnitudes operacionales, las cuales son: Equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$, equivalente de dosis personal que es el equivalente de dosis en tejido a una profundidad apropiada en Cristalino, manos/pies y para dosis efectiva. Para la evaluación de dosis de exposición individual a la radiación por emisión de radiación externa se utilizan dosímetros personales ubicados en la superficie del torso.

En este trabajo, la magnitud operacional utilizada en protección radiológica que se mide o estima para evaluaciones prospectivas de la dosis a la que se encuentra expuesta los TOEs es: Magnitud operacional/Equivalente de Dosis Ambiental.

4. Protocolo de gestión de desechos radiactivos en ciclotrones médicos

La resolución 41178 de 2016, "por medio de la cual se modifica y adiciona la resolución número 180005 de 2010, por la cual se adopta el reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia", exige que los elementos fuera de uso emisores de radiación provenientes de las aplicaciones médicas deben ser gestionados, es decir, se deben recolectar, segregar, caracterizar, acondicionar, clasificar, almacenar, transportar y evacuar, de acuerdo con los requerimientos prescritos en el reglamento [11].

Además existen varias normas de seguridad del OIEA para la gestión de desechos radiactivos, este protocolo se basa también en esas recomendaciones internacionales para la gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación [5].

Los ciclotrones generan desechos radiactivos durante el recambio del blanco y mantenimiento, debido a que las piezas del blanco sufren desgastes o averías en su material por el bombardeo de partículas cargadas y deben ser reemplazadas por nuevas. De acuerdo, a la operatividad del ciclotrón se aumenta la frecuencia de estos recambios, y se vuelve una obligación estudiar la composición física, química y radiológica del desecho radiactivo para determinar el acondicionamiento y almacenamiento que se le debe dar a los materiales, con el fin de obtener una buena y adecuada gestión de los desechos radiactivos [25].

Un protocolo de gestión de desechos radiactivos para instalaciones como ciclotrones debe contener principalmente las siguientes etapas: el tratamiento previo de cada elemento, caracterización, clasificación y almacenamiento temporal.

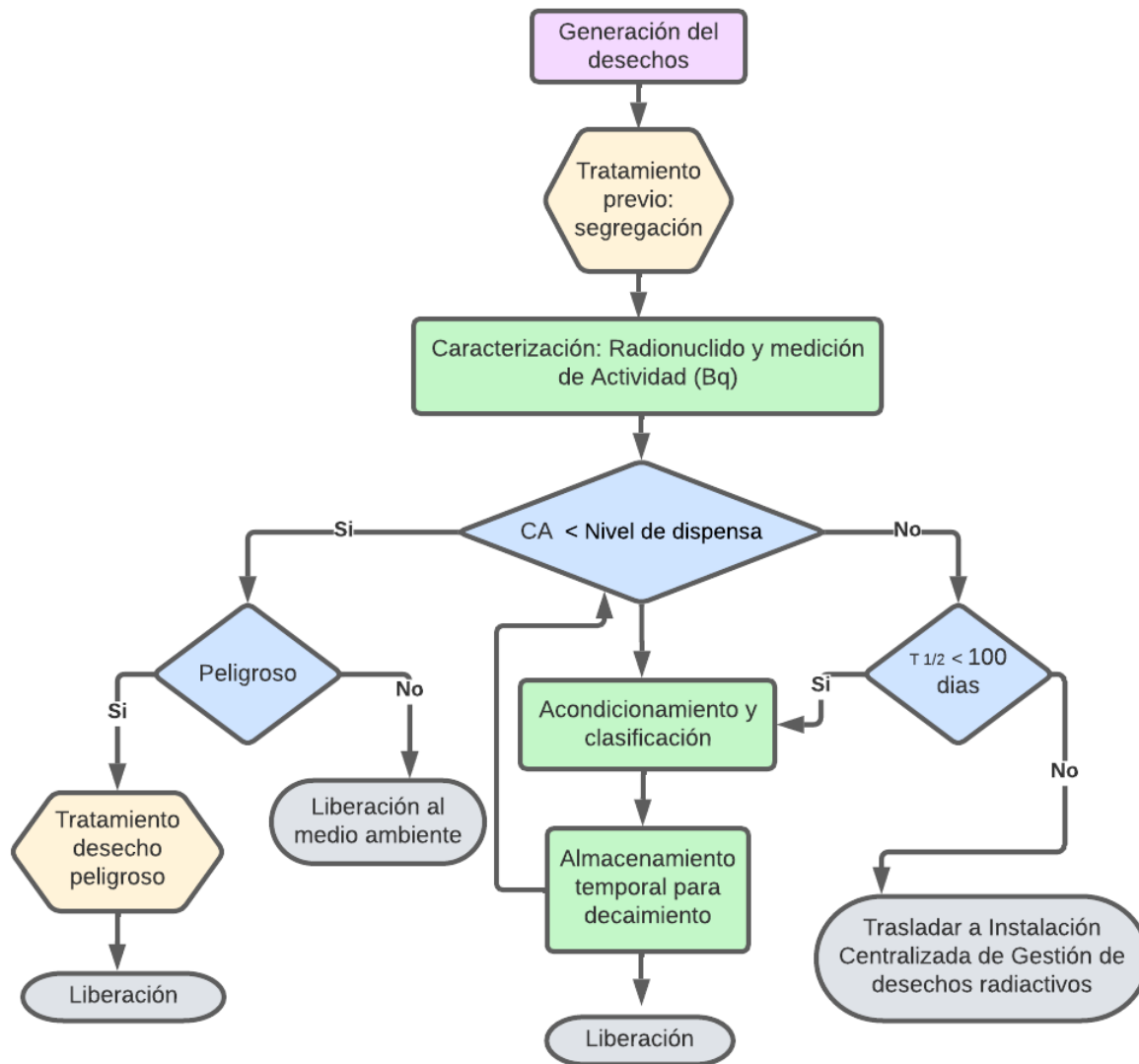


Figura 4-1.: Diagrama de flujo del proceso de gestión de desechos radiactivos. Basado en [5, 6].

4.1. Tratamiento previo

El objetivo de esta etapa es recoger y segregar los diferentes tipos de desechos radiactivos, con el fin de minimizar el volumen, el costo, la complejidad y los riesgos que implican la gestión en las otras etapas [5].

El tratamiento previo del desecho se hace con base en acciones que garanticen la seguridad del personal ocupacionalmente expuesto y el medio ambiente.

Al generarse desechos radiactivos, primero es necesario hacer la recopilación y luego segregación por tipo de pieza del blanco del ciclotrón, se debe hacer una descontaminación superficial al objeto y empaclar en bolsas herméticas. En el caso de desechos líquidos, es importante envasar en recipientes adecuados y herméticos para evitar derrames radiactivos.



Figura 4-2.: Bolsas resellables herméticas.



Figura 4-3.: Viales [7].

Los materiales utilizados para la recogida y segregación deben ser compatibles con los desechos radiactivos, es decir, deben asegurar la contención del material y ofrecer protección a los trabajadores frente a los riesgos químicos o físicos. En el caso de bolsas resellables o recipientes utilizados para la segregación del desecho debe estar correctamente identificado y etiquetados con la siguiente información:

- Tipo de blanco (modelo)
- Identificación del desecho radiactivo (piezas o residuos del ciclotrón)
- Fecha de último bombardeo o de la extracción del residuo.
- Cantidad, masa o volumen según aplique

4.2. Caracterización y clasificación de los desechos radiactivos

Una vez segregados los desechos radiactivos, se recomienda caracterizar cada uno para conocer sus características físicas, químicas y radiológicas; con el fin de llevar a cabo una gestión segura y correcta de los mismos. Es bastante importante, realizar la caracterización de desechos radiactivos para identificar sus propiedades radiológicas porque permite definir la clasificación de los desechos radiactivos y diferenciar los que deben ser almacenados temporalmente dentro de la instalación generadora de estos desechos.

- Las buenas prácticas en la clasificación de los desechos radiactivos de un ciclotrón deben estar basadas en los siguientes factores:

Caracterización física y química, teniendo en cuenta, las recomendaciones de Perdigón L [46],

Actividad y radionúclido presente,

Periodo de semidesintegración de los radionúclidos presentes: para menores de 100 días y mayores de 30 años [5],

Riesgos no radiológicos por ejemplo: tóxicos, infecciosos, genotóxicos entre otros.

En los ciclotrones médicos es necesario disponer los desechos radiactivos en diferentes contenedores de almacenamiento, de acuerdo a los factores mencionados anteriormente. El contenedor debe ser un blindaje específico, generalmente, el material utilizado es plomo para disminuir la intensidad de la radiación ionizante y debe cumplir las condiciones del programa de protección radiológica.

- Los contenedores de almacenamiento debe poseer una etiqueta, por lo menos con los siguientes datos:

Identificación de los desechos radiactivos (piezas o residuos del ciclotrón),

Contenido de radionúclidos presentes en los desechos y actividad en Bq,

Tasa de dosis máxima en contacto y a 1 m de distancia con la fecha de la medición,

Peso de los elementos desmontados,

Nombre de la persona responsable en la actividad.

- Los desechos radiactivos deben permanecer en la instalación siempre y cuando el periodo de semidesintegración de los radionúclidos presentes sea menor a 100 días [11]. De lo contrario, deben ser trasladados a la Instalación Centralizada de Gestión de Desechos Radiactivos (ICGDR) bajo los lineamientos de la resolución 181682 de 2005 [47] o en la norma que lo modifique. Por consiguiente, la ICGDR de Colombia define unos criterios de aceptación del bulto a recepcionar que se deben cumplir a cabalidad. De no ser así, la instalación generadora de los desechos radiactivos debe hacerse responsable y tener la capacidad a nivel de infraestructura para almacenar temporalmente estos desechos radiactivos por el tiempo suficiente hasta que los niveles de concentración de actividad lleguen por debajo de los niveles de dispensa establecidos en el apéndice I de la resolución 18005 de 2010 de MME [11].

Los desechos radiactivos caracterizados en este trabajo se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Contenedor 1: Láminas de havar

- Contenedor 2: Junta Helicoflex
- Contenedor 3: Aguas recuperadas
- Contenedor 4: Residuo de la bomba de vacío

4.3. Manipulación en el emplazamiento

La manipulación y traslado de los desechos radiactivos en el emplazamiento para llevar a cabo, las etapas de recopilación, segregación, caracterización y almacenamiento se deben realizar bajo las siguientes recomendaciones:

- Traslados en contenedores o sobreenvases que se descontaminen fácilmente [5];
- Bajo los lineamientos de la resolución 181434 de diciembre de 2002 "por la cual se adopta el reglamento de protección y seguridad radiológica."

4.4. Almacenamiento temporal

La etapa del almacenamiento temporal de los desechos radiactivos tiene como objetivo velar por la protección del medio ambiente y vigilancia radiológica a TOEs.

La evaluación del almacenamiento temporal recae en los métodos que se deben aplicar para determinar concentraciones de actividad de los radionúclidos presentes en cada desecho radiactivo y encontrar la relación con el nivel de dispensa establecido en la normatividad nacional e internacional vigente. Adicionalmente, es indispensable determinar el tiempo necesario que debe permanecer el desecho dentro de la instalación del ciclotrón para definir la fecha aproximada para su liberación y finalización del control regulatorio.

En esta sección discutiremos, el tiempo necesario que debe transcurrir algunas piezas del blanco del ciclotrón dentro de la instalación y posteriormente ser gestionada como residuo ordinario.

La estimación del tiempo de almacenamiento temporal esta directamente relacionado con la concentración de actividad de los desechos, y su nivel de dispensa. En la siguiente tabla 4-1, se calcula los parámetros importantes según la ecuación 3.20 para cada radionúclido.

En cada pieza del blanco del ciclotrón se tiene una mezcla de radionúclidos, por tanto, en la tabla 4-2 se determina la condición entre actividad y nivel de dispensa para la mezcla. Así definir, si el desecho está listo para ser evacuado.

Tabla 4-1.: Relación de concentración de actividad y nivel de dispensa de cada radionúclido.

<i>Pieza del blanco</i>	<i>Radionúclido</i>	<i>Niveles de dispensa (Bq(g))</i>	<i>Actividad* (Bq)</i>	<i>Masa (g)</i>	<i>Concentración de actividad (Bq(g))</i>	<i>Ci/CA</i>
Lámina de Havar 1	Co-56	10	13100	1	13100	1310,0
	Co-57	100	59800	1	59800	598,0
Agua recuperada 1	Co-56	10**	1030	10	103	10,3
	Co-57	100**	2860	10	286	2,9
Junta Helicoflex	Co-60	10	201	0,3	60,3	6,0
	Co-57	100	720	0,3	216	2,2
	Mn 54	10	860	0,3	258	25,8
Residuo del filtro de la bomba de vacío	Zn-65	10	6010	100	60,1	6,0

*Medidas realizadas por un espectrómetro gamma del SGC (ver caracterización de las muestras en el capítulo 6).

**Niveles de exención genéricos [48].

Tabla 4-2.: Evaluación de la condición $Ci/CA < 1$ 3.20.

<i>Pieza del blanco</i>	<i>Lámina de Havar 1</i>	<i>Agua recuperada 1</i>	<i>Junta Helicoflex</i>	<i>Residuo del filtro de la bomba de vacío</i>
Suma $Ci/CA < 1$	1908	13	34	6

Los desechos radiactivos de la tabla 4-2 se encuentran por encima de los niveles de dispensa, es necesario calcular el tiempo de almacenamiento temporal que deben permanecer estas piezas dentro de las instalaciones del ciclotrón, mientras ocurre su decaimiento radiactivo. A partir de la ecuación 3.18 se obtiene dicho tiempo:

$$t = - \left(\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \right) \ln \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (4.1)$$

donde, $T_{1/2}$ es el periodo de semidesintegración del radionúclido (ver tabla 5-3), A_0 la con-

centración de actividad calculada del radionúclido y A es el nivel de dispensa en (Bq/g).

En la tabla 4-3 se muestra el tiempo de almacenamiento temporal de las piezas del blanco en el ciclotrón previo a la evacuación del elemento como un residuo convencional. El tiempo se calcula para cada radionúclido contenido en la pieza y se identifica el tiempo mayor de almacenamiento en cada uno.

Tabla 4-3.: Tiempo de almacenamiento temporal para los desechos radiactivos en las instalaciones del ciclotrón.

<i>Pieza del blanco</i>	<i>Lámina de Havar 1</i>	<i>Agua recuperada 1</i>	<i>Junta Helicoflex</i>	<i>Residuo del filtro de la bomba de vacío</i>
Tiempo de almacenamiento temporal (días)	2547	495	4148	631

Las láminas de Havar deben permanecer dentro de un blindaje de plomo adecuado para disminuir la intensidad de la radiación y además debe encontrarse dentro de un contenedor asignado como la zona específica para almacenar los desechos radiactivos. El tiempo de almacenamiento temporal de la lámina de Havar 1 es de aproximadamente 7 años previo a su evacuación como residuo fuera del control regulatorio.

El tiempo de almacenamiento temporal del agua recuperada 1 también es de aproximadamente 1,4 años previo a su evacuación como residuo fuera del control regulatorio.

La Junta Helicoflex registra concentración de actividad significativa, además de mantenerse dentro de bolsas resellables con su respectiva etiqueta que lo identifica; deben disponerse dentro de un blindaje de plomo. El tiempo de almacenamiento temporal de la Junta Helicoflex es de aproximadamente 11 años previo a su evacuación como residuo fuera del control regulatorio.

El residuo del filtro de la bomba de vacío debe permanecer por 2 años en el almacenamiento temporal. Conveniente que se deposite en bolsas resellable hermética porque su contextura tiende a ser arcilloso, sabemos que este desecho se activa con ^{65}Zn (ver la caracterización en el capítulo 6). Por tanto, se debe manipular con guantes, gafas y mascarilla adecuada para este tipo de material particulado. El objetivo es evitar inhalaciones de este residuo nocivo durante las etapas de tratamiento, clasificación y almacenamiento temporal.

Algunas piezas que conforman el blanco del ciclotrón deben ser reemplazadas con una periodicidad de alrededor de 6 meses. Por tanto, es necesario llevar un contenedor de blindaje específico para estas piezas, así se puede gestionar de una manera más rápida y adecuada. La idea principal es evitar contaminación cruzada entre piezas y retirar del control regulatorio las que cumplen con valores por debajo de los niveles de dispensa.

4.5. Recomendaciones en la gestión de desechos

- El personal encargado de realizar la gestión de desechos radiactivos debe ser una persona capacitada.
- La gestión segura de desechos radiactivos generados en ciclotrones médicos se lleva a cabo con un control y seguimiento riguroso a cada elemento.
- Por lo general, la zona que se asigna para posicionar los contenedores de desechos radiactivos es la parte subterránea dentro de la sala principal, a un lado de donde se posiciona el ciclotrón.
- Realizar el almacenamiento temporal de los desechos radiactivos en diferentes empaques y blindajes para evitar contaminación entre piezas. Esto permite gestionar los desechos en un tiempo no tan lejano y poder ser evacuados.
- Incorporar al sistema de vigilancia radiológica un dosímetro de área (pasivo o activo) ubicado en la zona de almacenamiento temporal de desechos radiactivos de la instalación.
- Al disminuir la producción de desechos radiactivos se reducirá las tasas de dosis en los fosos o contenedores subterráneos de cada instalación. Es importante segregar los desechos para reducir el volumen y facilitar la gestión.
- Las etapas de la gestión de desechos radiactivos tanto localmente como en un almacenamiento especializado se deben realizar de manera articulada, con el fin de tener un programa de gestión integral de desechos radiactivos.
- El transporte de los desechos radiactivos fuera del emplazamiento debe estar sujeto a la norma técnica colombiana NTC 3970 [21] donde se establecen requisitos para el transporte de materiales radiactivos y por la norma actual que reglamenta el transporte Seguro de Materiales Radiactivos y la seguridad física en el transporte donde se deroga la resolución MME 181682 de 2005 [49].
- Antes de transportar los desechos radiactivos desde el emplazamiento a la Instalación Centralizada de Gestión de Desechos Radiactivos (ICGDR) se debe confirmar, si ese tipo de desechos son aceptados en el lugar. La aceptación se hace bajo los lineamientos,

requisitos y procedimientos establecidos por la ICGDR del Servicio Geológico Colombiano.

4.6. Formato de control de desechos radiactivos

En las figuras 4-4 a 4-6 se muestra una recomendación para llevar seguimiento a los desechos radiactivos generados en los ciclotrones.

GENERACIÓN											
FECHA	ORIGEN	ID	ISOTOPOS	CLASE	CARACTERÍSTICA	CONTENEDOR	TASA DE DOSIS (uSv/h)	MASA (g)	Actividad Inicial (Bq)	Concentración (Bq/g)	Responsable

Figura 4-4.: Sección de la generación del desecho radiactivo.

ALMACENAMIENTO				
Ubicación	Tiempo de almacenamiento (días)	Fecha de evaluación	Tiempo transcurrido (días)	LISTO para ser evacuado

Figura 4-5.: Sección de almacenamiento temporal del desecho.

EVACUACIÓN						
Fecha salida	Tiempo transcurrido (días)	Concentración estimada (Bq/g)	Nivel de dispensa establecido en la norma (Bq/g)	Ruta de evacuación	Responsable de la estimación	Firma autorización de descarga (OPR)

Figura 4-6.: Sección de la evacuación del desecho.

5. Metodología

Los ciclotrones médicos requieren recambios periódicos de algunas piezas del blanco, debido al desgaste producido por el bombardeo de protones para la producción de radiofármacos. Es necesario conocer los componentes radiológicos de los elementos que quedan fuera de uso en estos recambios para gestionar correctamente los desechos radiactivos. Por supuesto, es importante y primordial conocer las dosis recibidas por el personal capacitado dedicado a realizar estos mantenimientos.

Los componentes radiológicos se conocen mediante caracterización de los desechos radiactivos por espectrometría gamma. Se caracterizó algunas piezas que pertenecen al ensamble del blanco objetivo para dos ciclotrones de Colombia productores del radiofármaco $^{18}\text{F} - \text{FDG}$, los cuales se relacionan en la tabla 5-1.

Tabla 5-1.: Ciclotrones de Colombia sometidos al estudio

Departamento	Fabricante	Modelo	Energía (MeV)
Cundinamarca	GE	PETtrace 800	16,5
Antioquia	Siemens	HP Eclipse	11

GE = General Electric

El equipo utilizado para la caracterización fué un espectrómetro gamma marca Nitro Spec detector de germanio hiperpuro (las especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo C) recomendado por su alta resolución que permite obtener espectros gamma de buena calidad. La técnica de espectrometría gamma permite identificar los radionúclidos presentes en las piezas y cuantificar los niveles de actividad. Las piezas de la configuración del blanco que se estudian en este trabajo son:

- Ciclotrón 1 (GE): Lámina de havar, agua con impurezas, Junta Helicoflex.
- Ciclotrón 2 (Siemens): Lámina de havar, agua con impurezas, columnas QMA, residuo del filtro de la bomba de vacío.

5.1. Caracterización de desechos radiactivos

5.1.1. Montaje experimental para la obtención de espectros

El procedimiento de medición se realizó dentro de cada instalación con un espectrómetro portátil, las muestras o piezas de la configuración de los blancos se seleccionaron a partir de los últimos recambios del blanco del ciclotrón. En la tabla 5-2 se identifica cada una de las muestras:

Tabla 5-2.: Grupo de muestras para caracterizar

<i>Ciclotrón 1: General Electric, Fecha de medición: 01/12/2022</i>			
Muestra	Distancia Muestra - detector (cm)	Diámetro o cantidad de Muestra	Fecha del último bombardeo
Lámina de Havar 1	400	2 cm	02/11/2022
Agua recuperada 1	10	10 ml	27/11/2022
Junta Helicoflex	10	2 cm	30/01/2021
<i>Ciclotrón 2: Siemens, Fecha de medición: 04/11/2022</i>			
Lámina de Havar 2	100	2 cm	22/10/2022
Agua recuperada 2	10	5 ml	28/10/2022
QMA	10	1,8 cm	03/11/2022
Residuo del filtro de la bomba de vacío	10	100 gr	03/01/2022

El espectrómetro se posiciona en una superficie plana de tal forma que la ventana del detector sea paralela a la superficie de mayor dimensión de la pieza respectiva como se muestra en la figura 5-1 y 5-2 a una distancia de la muestra.

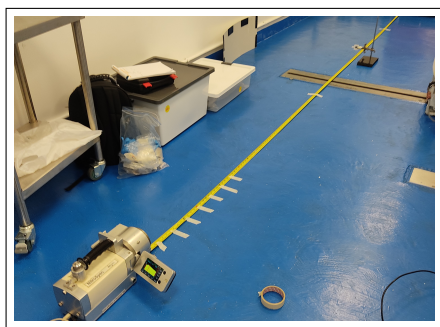


Figura 5-1.: Montaje experimental para Lámina de Havar 2.



Figura 5-2.: Montaje para residuo del filtro de bomba de vacío.

La distancia entre la muestra y la superficie del detector se determina a partir del tiempo transcurrido desde el final del bombardeo y su tasa de dosis en contacto, con el fin de disminuir el tiempo muerto en las mediciones con una tolerancia $< 10\%$ y evitar que el espectrómetro se sature. El tiempo muerto se define como el periodo en el que se está procesando un pulso y no permite detección del próximo [50].

El tipo de muestras analizadas se describen a continuación:

- **Láminas de Havar:** También denominadas ventanas hacen parte de la configuración del blanco del ciclotrón de Cundinamarca y Antioquía son dispositivos ubicados a la entrada del blanco recibe el impacto directo del haz de protones y del campo secundario de neutrones generados por la reacción de producción del ^{18}F , poseen un tamaño de aproximadamente de 2 cm de diámetro.
- **QMA:** Las columnas son utilizadas para la purificación del radiofármaco y poseen una forma cónica con una altura de 4 cm como se observa en la figura 5-3.
- **Agua enriquecida recuperada:** En el proceso de purificación del radiofármaco ^{18}F – *FDG* se separa las impurezas y el agua recuperada es almacenada en un recipiente y contenedor específico. La muestra de agua es extraída de un recipiente con la ayuda de una jeringa a un vial de vidrio de 5 ml como se muestra en la figura 5-4.
- **Arena:** Se toma una muestra de 100 gr en una bolsa resellable de forma rectangular como se observa en la figura 5-5. El compuesto químico de la arena es desconocida.
- **Junta Helicoflex:** Es una pieza específica que sirve de sellado entre la lámina de havar y el blanco del ciclotrón 1, su forma es helicoidal de color dorado como se observa en la figura 5-6.



Figura 5-3.: Muestra de columna QMA para separación de impurezas.

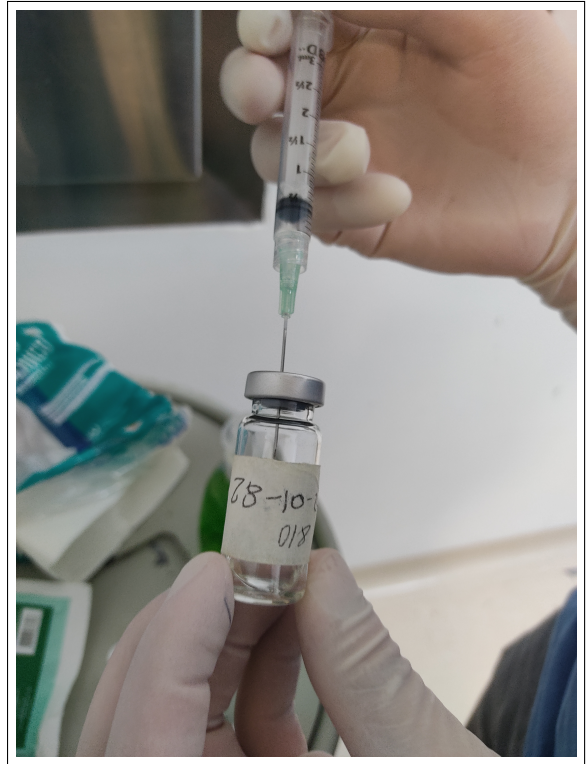


Figura 5-4.: Muestra de agua recuperada 5 ml.

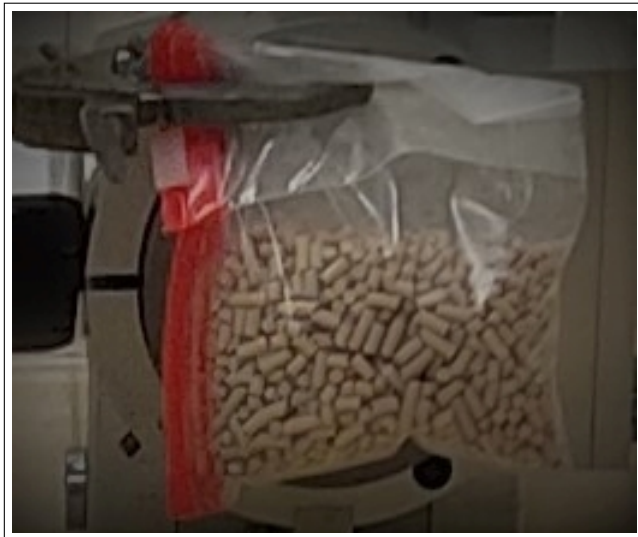


Figura 5-5.: Muestra de arena - residuo del filtro de la bomba de vacío.

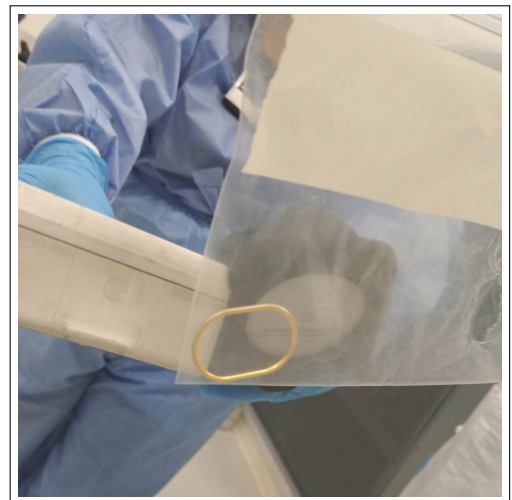


Figura 5-6.: Junta Helicoflex.

5.1.2. Obtención del espectro gamma

Los espectros son analizados en el software Spectraline [51] donde se establecen los parámetros de la pieza que se va a inspeccionar:

- Fecha de medición de la muestra
- Material de la muestra
- Distancia entre la muestra y el detector
- Tiempo de medición de la muestra

Inicialmente, se establecen los parámetros del espectro restando el fondo en canales en el modo iterativo ubicado en la barra del programa "procesando - restar fondo", o automáticamente cuando se procesa el espectro.

El procesamiento del espectro se realiza buscando los picos de manera automática, se evalúa cada pico encontrado para la identificación y cuantificación del respectivo radionúclido.

Antes del análisis de los espectros, se ejecutan las respectivas calibraciones primero por energía, seguido por FWHM, y por último eficiencia. A continuación, se describe el procedimiento para el análisis de los espectros de energía, con el fin de comprender los aspectos importantes que se deben tener en cuenta dentro del análisis y así obtener mediciones confiables.

Calibración por energía

Mencionamos en la sección 3.5.2 sobre la calibración del espectrómetro, el objetivo es asociar la energía máxima con su posición en canales. Se inicia correlacionando la posición de los picos con las energías de la biblioteca del software Spectraline [51].

La calibración se ejecuta de la siguiente manera:

- Identificar los intervalos del espectro que contienen información mediante la búsqueda automática de picos.
- Mediante la lista de librería de radionúclidos que posee Spectraline se arrastran los picos de energía de referencia ubicando cada uno en el pico de espectro obtenido según corresponda (ver figura 5-7).

Cuando son varios archivos de espectros se abre una lista y es posible seleccionar uno a uno para asociar los picos de energía.

Si solo se tiene un espectro para la calibración y el número de líneas de referencia es pequeño se puede realizar una subcalibración para obtener una curva de calibración precisa.

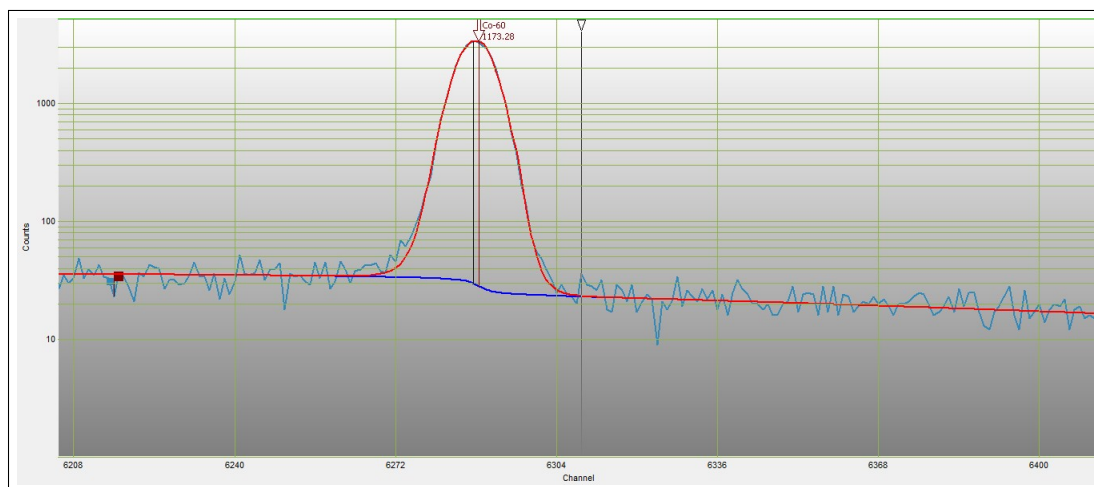


Figura 5-7.: Ubicación de líneas de referencia sobre el pico del espectro. Fuente: Software Spectraline.

En el caso, de que el pico de referencia no exista dentro de la librería se puede ingresar manualmente en la ventana de calibración de energía y asociarlo al valor de pico requerido.

- A continuación, se ejecuta el procedimiento donde se arroja una tabla con su respectiva gráfica que muestra la relación entre energía (keV) y energía (canales) como se observa en las figuras 5-8 y 5-9.
- Guardar todos los espectros usados en el procedimiento para obtener los resultados de la calibración por energía en un archivo .cen.
- En la barra de herramientas en configuración se carga el archivo de calibración por energía.

Calibración por FWHM

Sabemos que esta etapa de calibración se realiza para relacionar el pico FWHM (keV) con su energía como se define en la sección 3.5.2.

La calibración se ejecuta en la barra de herramientas de FWHM seleccionando los espectros con los que se realizó la calibración de energía. Establecer los siguientes parámetros:

- Establecer el grado del polinomio de aproximación en el rango de 0 a 4 como mejor se ajuste.
- Ingresar el nivel de error para los resultados de calibración. El procedimiento de calibración no utiliza la línea del espectro, si su error absoluto excede dicho nivel. El software Spectraline establece un valor predeterminado que es el valor máximo del

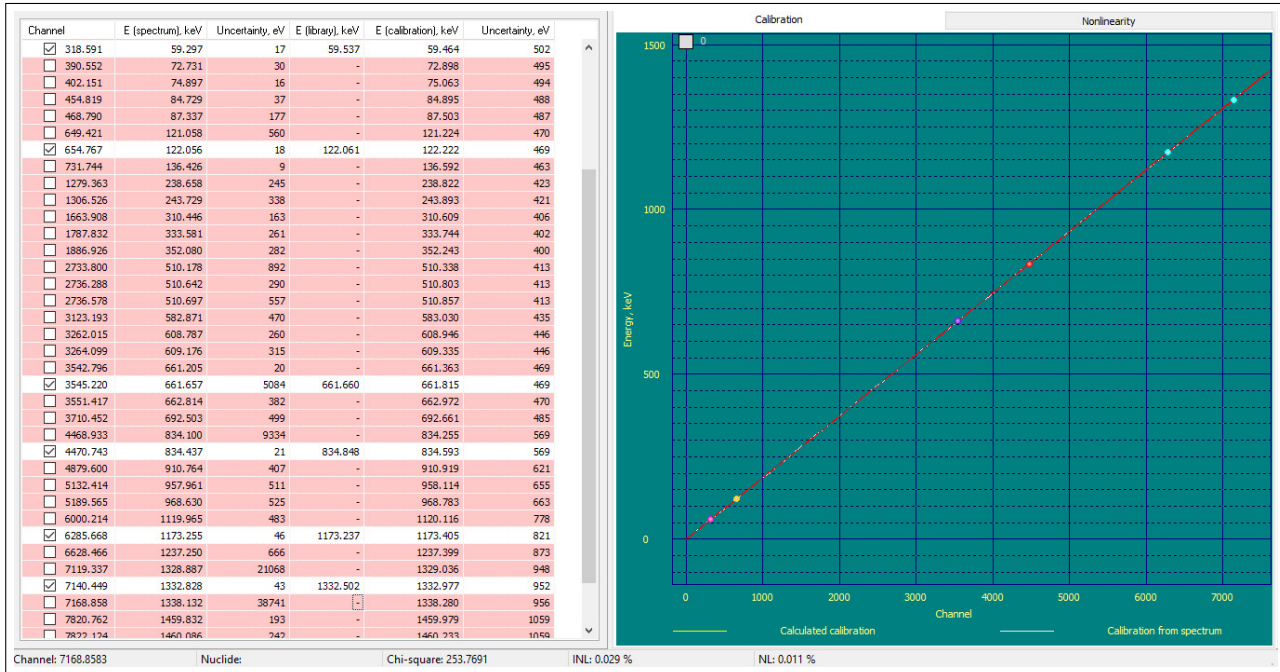


Figura 5-8.: Calibración por energía. Fuente: Software Spectraline.

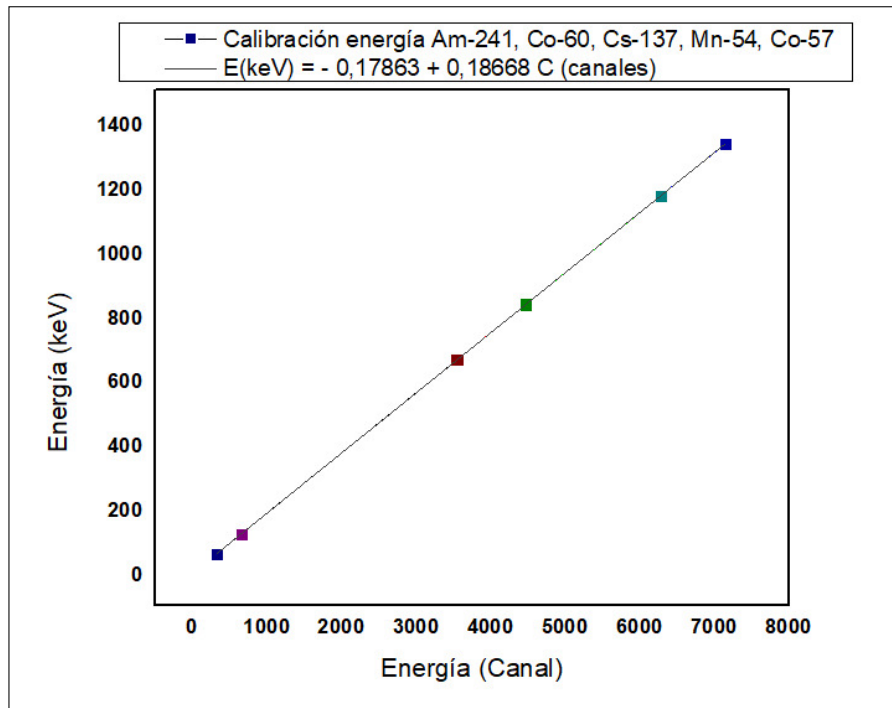


Figura 5-9.: Calibración por energía. Imagen propia.

error absoluto de FWHM calculado de todas las líneas de los espectros seleccionados en la calibración y el valor máximo del error absoluto de FWHM de todas las líneas

de referencia utilizadas.

- Una vez se da la orden de calibrar, el programa brinda la información en una tabla de datos con los valores FWHM de referencia y FWHM de los picos del espectro seleccionado. Los resultados de la calibración se muestran en una gráfica de FWHM en función de la energía del pico como se observa en la figura 5-10.

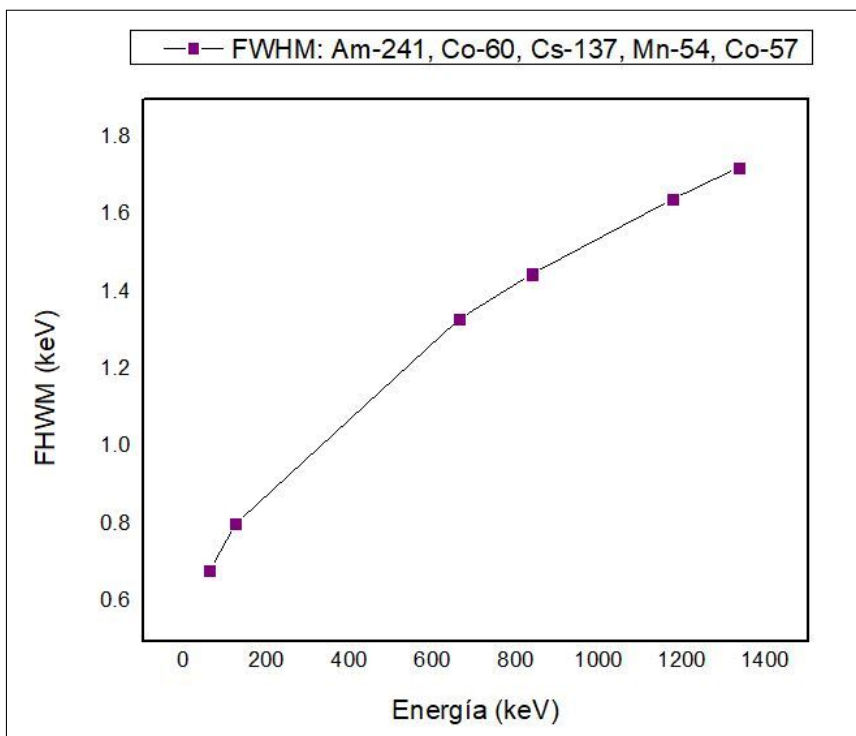


Figura 5-10.: Calibración por FWHM. Imagen propia.

- Si los resultados no son satisfactorios se puede cambiar el grado del polinomio y eliminar las líneas con gran error.
- Por último, se debe aplicar la calibración a los espectros utilizados y se guarda en un archivo .cfw.

Calibración del patrón

El espectro de la fuente más común se utiliza en esta calibración, la idea es:

- Buscar los picos en el espectro,
- Seleccionar los picos de forma individual con una intensidad suficientemente fuerte,
- Establecer un marcador para la zona de pico y obtener la curva del espectro.

La zona seleccionada del parámetro debe ser lo suficientemente amplia para una mejor aproximación del espectro fuera del área del pico.

El método de aproximación es el parámetro principal de esta calibración se debe seleccionar el método de cálculo en la lista desplegable. El método Log Spline permite resultados satisfactorios se basa en la distribución de Gauss, la función de análisis se usa para la aproximación. Se puede utilizar en espectrometría gamma de semiconductores con estadísticas pequeñas, sino se requiere una alta precisión de medición [51].

En la ventana de edición del patrón se puede ajustar los puntos específicos y límites máximos del pico. El grado de la aproximación de Spline del área de pico se recomienda en 4. El **número de puntos suaves** para la aproximación del área de pico debe ser un valor mayor o igual al grado de Spline se recomienda que sea 3. "Las estadísticas se consideran satisfactorias, si el error relativo del área del pico es superior a 1 % [51]".

Los siguientes parámetros se utilizan para el procesamiento de picos fuera del área de picos seleccionados:

- El grado del polinomio de fondo debe estar dentro del rango de -1 a 5. El polinomio de fondo no se usa en el procedimiento de aproximación si el valor ingresado es -1.
- El grado del polinomio Compton se ingresa en "grado escalonado", el rango de valores recomendados es de -1 a 3. Por lo general, se establece el grado del fondo compton en 0 cuando el valor de la energía supera los 200 keV.
El polinomio compton no se usa en el procedimiento de aproximación si el valor ingresado es -1.

En la ventana de la edición del patrón se muestran sus parámetros: posición del pico (canales), FWHM, la relación entre el fondo Compton aproximado en el pico máximo y el área del pico (step). Los valores reales se encuentran entre un paréntesis, el valor que lo acompaña es el calculado de posición y FWHM del patrón de pico.

Recomendación: Realizar el cálculo del patrón varias veces para lograr la estabilización de los resultados, ya que la calibración del patrón es iterativo.

Si, la cantidad de la aproximación es mala se puede volver a calcular el patrón con otros parámetros aumentando el grado del polinomio de fondo o el grado de fondo Compton. Es mejor utilizar el método Gauss para espectros estrechos, de lo contrario los resultados de este método pueden ser malos.

El cálculo del patrón de picos puede ser ejecutada, una vez se hayan ajustado los parámetros de la calibración, posteriormente se debe guardar el archivo en formato .cpt y cargar dicho archivo en la ventana de parámetros de configuración.

Calibración por eficiencia

Es una calibración que el programa realiza de manera propia, una vez se realiza la calibración por energía y por FWHM.

Esta etapa se debe ejecutar y aplicar al espectro que se quiere analizar para poder obtener los resultados correspondientes.

5.2. Evaluación de la dosis recibida por los trabajadores ocupacionalmente expuestos

La estimación de las tasas de dosis efectiva de los trabajadores ocupacionalmente expuestos se realiza a partir de:

$$\dot{X} = \Gamma \frac{A}{d^2} \tag{5.1}$$

donde,

A, es la actividad de cada radionúclido

d, la distancia entre el TOE y la fuente

Γ , es la constante de tasa de dosis relacionada a la actividad de una fuente puntual isotrópica que depende de los coeficientes de absorción en aire para fotones de Energía E y de la probabilidad de emisión del fotón [14].

La constante Γ de algunos radionúclidos se encuentran en la siguiente tabla 5-3:

Tabla 5-3.: Tabla de constante gamma y periodo de semidesintegración de los radionúclidos presentes en las muestras [14].

<i>Radionúclido</i>	<i>T_{1/2}</i> <i>(días)</i>	<i>Constante Γ</i> <i>(C m²/kg MBq s)</i>
Co-56	77,236	$3,46 \times 10^{-12}$
Co-57	271,74	$1,09 \times 10^{-13}$
Mn-54	312,20	$8,97 \times 10^{-13}$
Co-60	1925,28	$2,50 \times 10^{-12}$
Zn-65	243,93	$5,94 \times 10^{-13}$

Las dosis recibidas por los trabajadores ocupacionalmente expuestos son estimadas a partir de los valores de actividad más altas en las piezas analizadas, además se considera que el tiempo para las actividades de extracción y manipulación de los desechos radiactivos es de aproximadamente 2 h y los recambios se hacen 3 veces en el año.

Adicionalmente, se realiza una evaluación de las tasas de dosis a 10 cm de distancia entre el desecho radiactivo y el TOE cuando se encuentran en las etapas de almacenamiento temporal y manipulación en el emplazamiento. Los monitores de tasa de dosis utilizados en este estudio son un RADEYE B-20 y un GRAETZ X 50 DE (ver ficha técnica en el anexo D) mostrados en la figura 5-11.



Figura 5-11.: Equipos medidores de tasa de dosis equivalente ambiental

6. Resultados y discusión

6.1. Identificación y cuantificación de radionúclidos

Las muestras que fueron objeto de estudio en este trabajo son las más comunes en recambios por desgaste en el blanco del ciclotrón médico.

Se analizaron siete muestras, algunas de ellas corresponden a la configuración del blanco del ciclotrón, y otras se escogieron por estudios donde han evidenciado la presencia de material radiactivo, como: columnas QMA y residuos del filtro de la bomba de vacío.

La adquisición de cada espectro se realizó a un distancia específica, teniendo en cuenta, que el tiempo muerto no sea mayor al 10 %, según recomendaciones de Vargas, M Jurado [25]. En la tabla 6-1 se encuentran las 7 muestras con sus respectivos parámetros de medición.

Tabla 6-1.: Muestras analizadas en ciclotrones médicos.

<i>Ciclotrón 1: General Electric, Fecha de medición: 01/12/2022</i>			
Muestra	Distancia Muestra - detector (cm)	Tiempo muerto (%)	Fecha del último bombardeo
Lámina de Havar 1	400	21,6	02/11/2022
Agua recuperada 1	10	1,3	27/11/2022
Junta Helicoflex	10	2,2	30/01/2021
<i>Ciclotrón 2: Siemens, Fecha de medición: 04/11/2022</i>			
Lámina de Havar 2	10	0,6	01/07/2022
Agua recuperada 2	10	0,4	30/09/2022
QMA	10	0,9	03/11/2022
Residuo del filtro de la bomba de vacío	10	0,5	03/01/2022

Los espectros obtenidos en el ciclotrón 1 son los siguientes:

- Lámina de Havar 1, Stracotek

En la figura 6-1 se tiene el espectro gamma para la lámina de Havar del ciclotrón 1, luego de un tiempo de decaimiento de 30 días desde su último bombardeo.

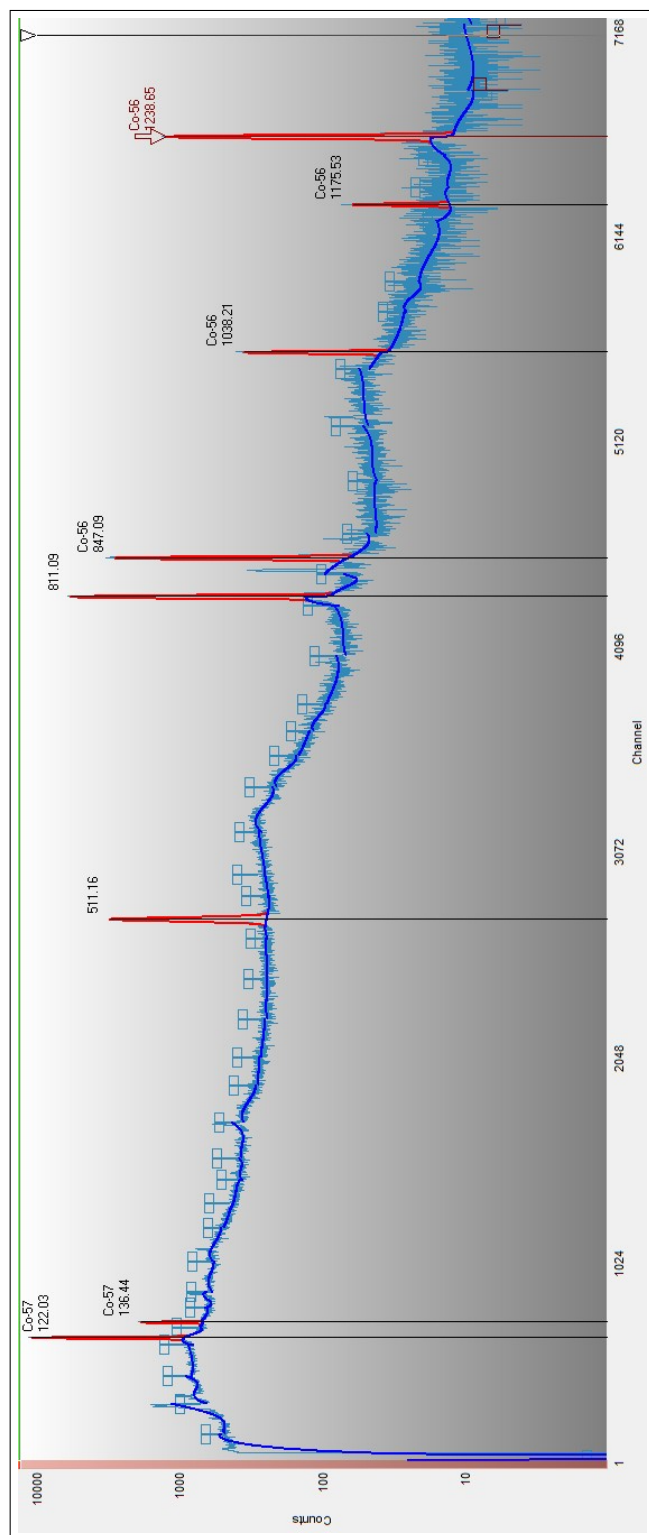


Figura 6-1.: C1: Lámina de Havar 1, Stracotek.

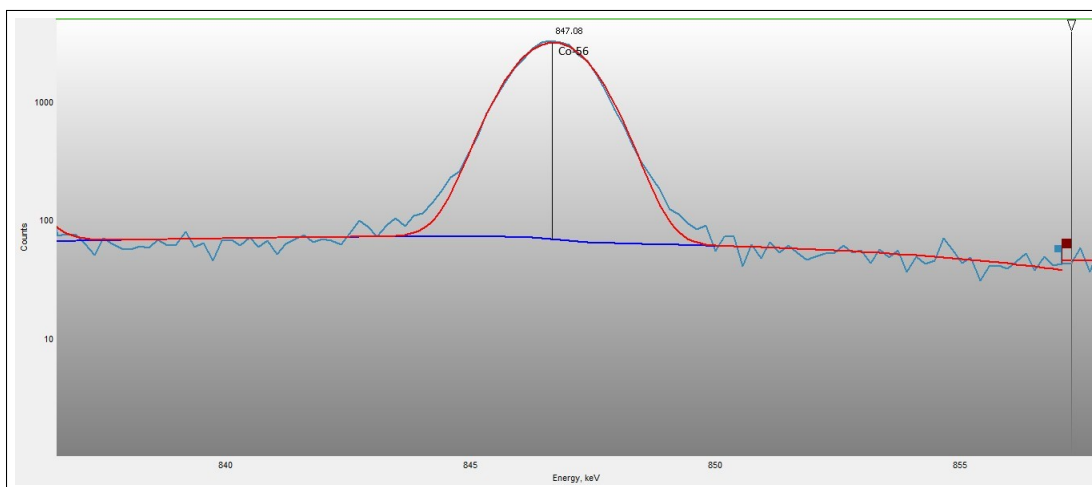


Figura 6-2.: Lámina de Havar 1. Pico de ^{56}Co .

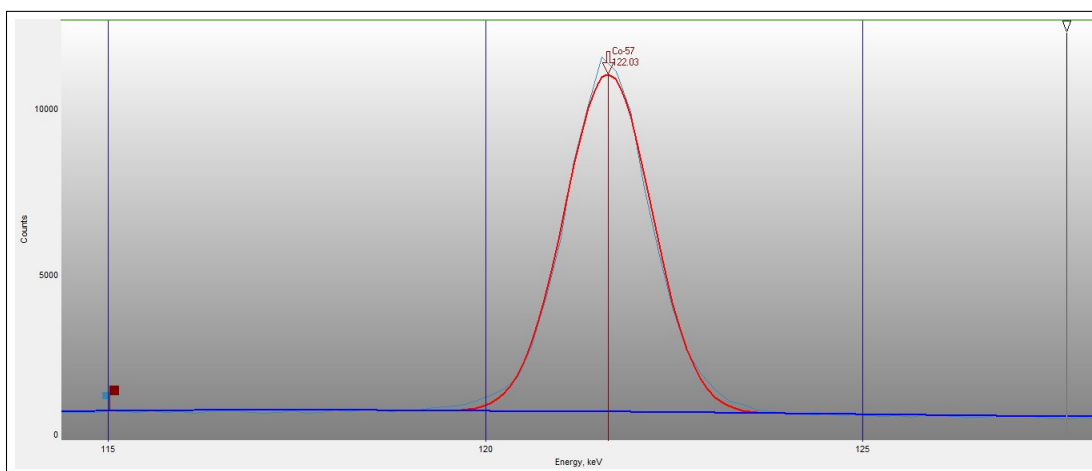


Figura 6-3.: Lámina de Havar 1. Pico de ^{57}Co .

Tabla 6-2.: Datos - Lámina de Havar 1, Stracotek

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Co-56	4540,21(10)	847,08(2)	1,85	29854(1149)
Co-57	654,43(3)	122,03(1)	1,33	77868(1418)

Se observa la presencia de dos radionúclidos ^{57}Co y ^{56}Co . En este espectro se marca un pico de 511.15 keV que indica la aniquilación entre protón-electrón. El radionúclido de ^{56}Co muestra tres de sus líneas de emisión gamma. Estos radionúclidos son comunes en su interacción con los protones por la composición del material, según Vargas, M Jurado [25] contiene Co, Cr, Ni, W, Mo, entre otros. Las figuras 6-2 y 6-3 muestran los picos individuales del espectro para las líneas de emisión gamma con mayor probabilidad del radionúclido ^{56}Co de 846,768

keV y ^{57}Co de 122,061 keV. En la tabla 6-2 se puede evidenciar que el radionúclido de ^{57}Co es el que posee mayor área de pico.

■ Agua recuperada 1

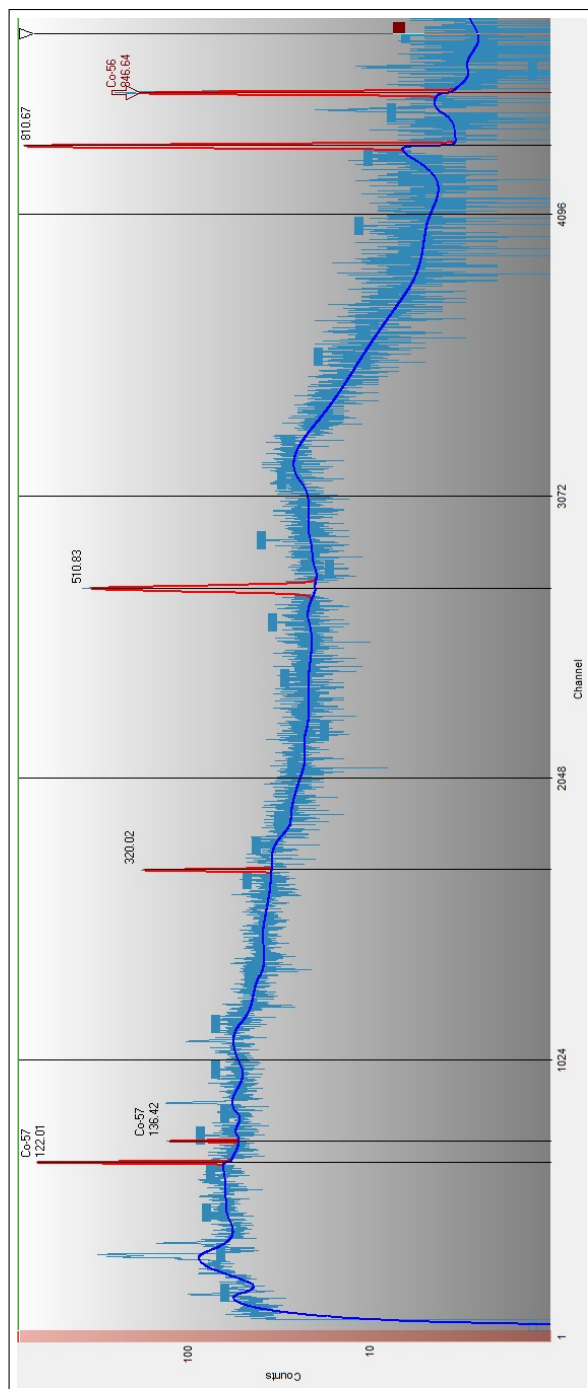


Figura 6-4.: C1: Agua recuperada de 10 ml.

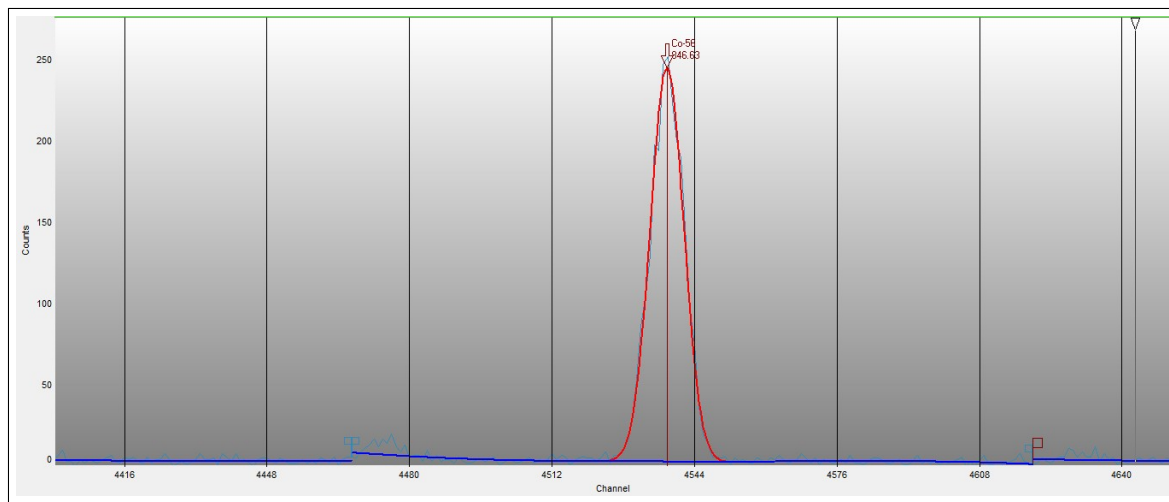


Figura 6-5.: Agua 1. Pico de ^{56}Co .

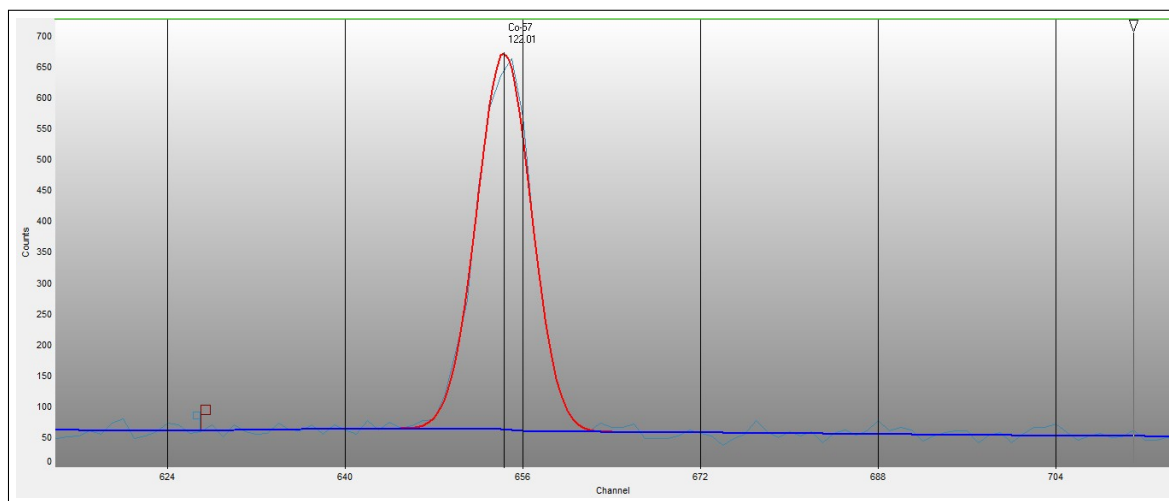


Figura 6-6.: Agua 1. Pico de ^{57}Co .

Tabla 6-3.: Datos - Agua recuperada 1.

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Co-56	4537,82(16)	846,64(3)	1,58	1622(90)
Co-57	654,31(5)	122,01(1)	1,04	3645(136)

En la figura 6-4 se muestra el espectro de rayos gamma para el agua recuperada del ciclotrón 1, se identifican los radionúclidos de ^{57}Co (122,061 keV) y ^{56}Co (846,678 keV). En el espectro se identifican notablemente las líneas de emisión gamma de mayor probabilidad para el ^{56}Co que son: 846,768 keV y 1238,286 keV. Las figuras 6-5 y 6-6 muestran los picos individuales del espectro para las líneas de emisión gamma con mayor probabilidad del radionúclido

^{56}Co y ^{57}Co . En la tabla 6-3 se puede evidenciar que el radionúclido de ^{57}Co es el que posee mayor área de pico.

■ Junta Helicoflex, Stracotek

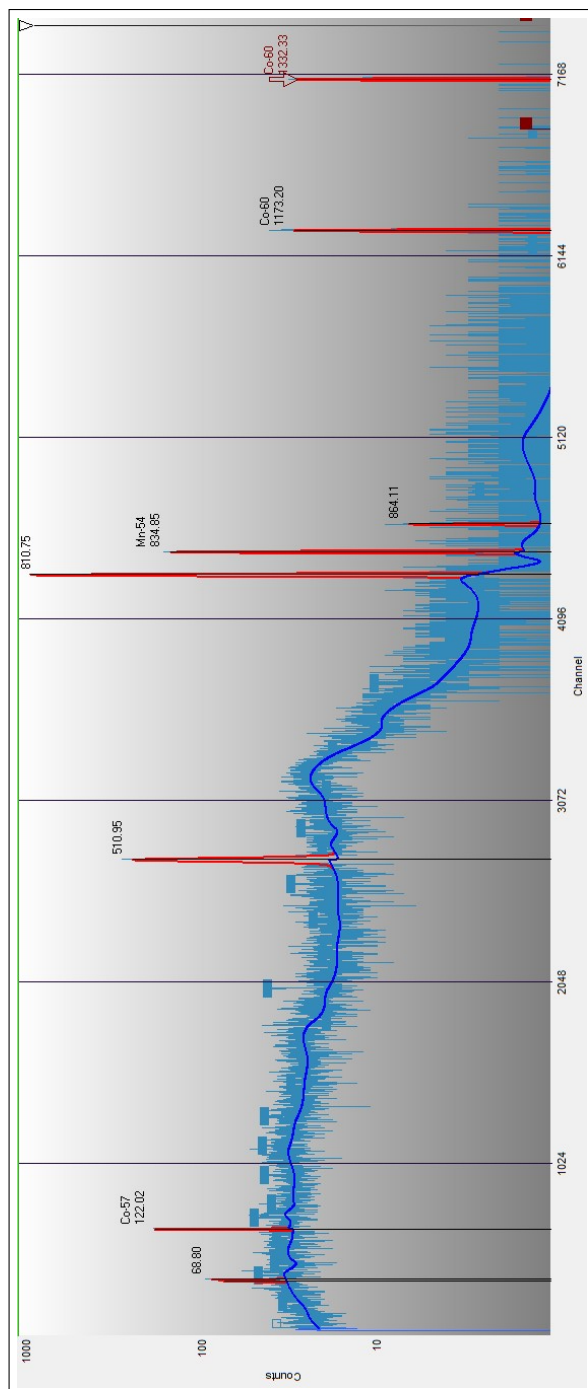


Figura 6-7.: C1: Junta Helicoflex diámetro de 2 cm.

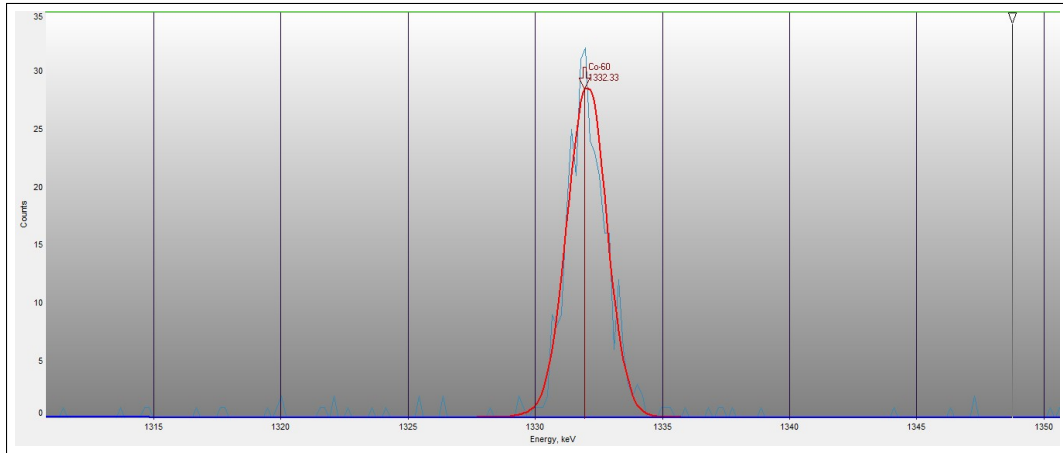


Figura 6-8.: Junta Helicoflex. Pico de ^{60}Co .

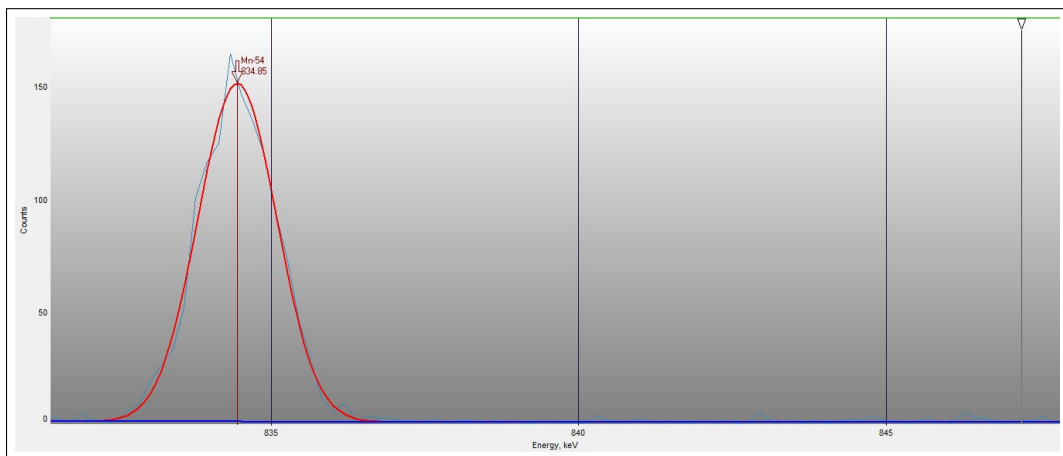


Figura 6-9.: Junta Helicoflex. Pico de ^{54}Mn .

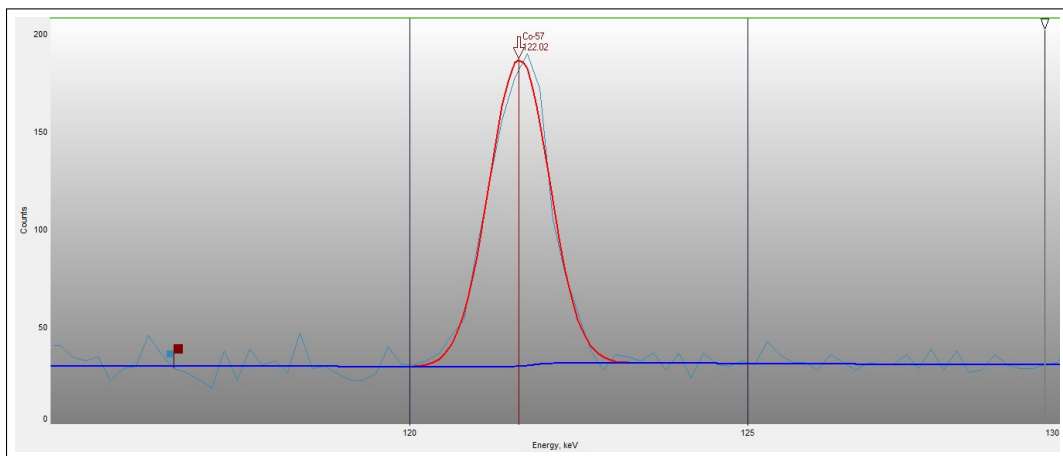


Figura 6-10.: Junta Helicoflex. Pico de ^{57}Co .

Tabla 6-4.: Datos - Junta Helicoflex, Stracotek.

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Co-60	7140,79(25)	1332,33(5)	1,76	297(25)
Co-60	6287,96(27)	1173,20(5)	1,72	298(25)
Mn-54	4474,64(10)	834,85(2)	1,49	1282(72)
Co-57	654,36(10)	122,02(2)	1,02	925(71)

En la figura 6-7 se muestra el espectro correspondiente a una Junta Helicoflex que se encuentra dentro de la configuración del blanco marca Stracotek (ver especificaciones del blanco en el anexo B), donde se identifican los radionúclidos de ^{57}Co (122,061 keV), ^{60}Co , y ^{54}Mn (834,848 keV). En el caso, de ^{60}Co se pueden evidenciar claramente las dos líneas de emisión gamma con probabilidades del 99,9 % sus valores de energía de 1173,23 keV y 1332,49 keV. Los picos de los tres radionúclidos se observan por separado en las figuras 6-8 a la 6-10. En la tabla 6-4 se observa que el área de pico más grande corresponde al radionúclido de ^{54}Mn .

Los espectros obtenidos en el ciclotrón 2 son los siguientes:

▪ Lámina Havar 2, Stracotek

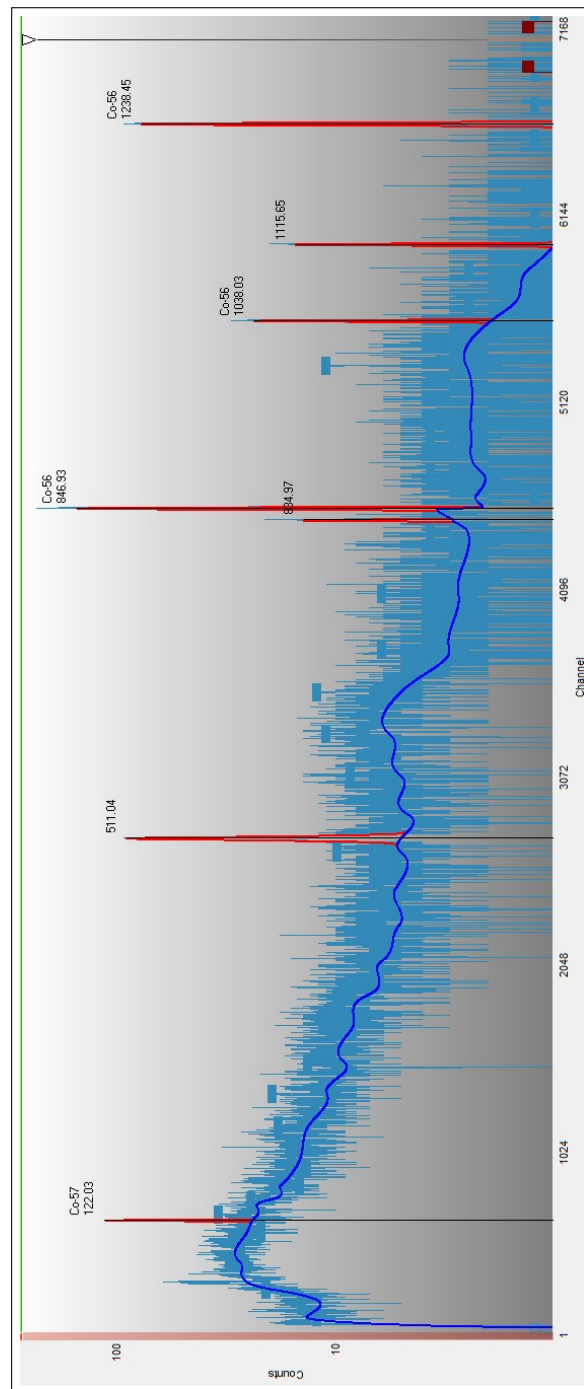


Figura 6-11.: C2: Lámina de Havar 2, Stracotek de 0,5 cm de diámetro.

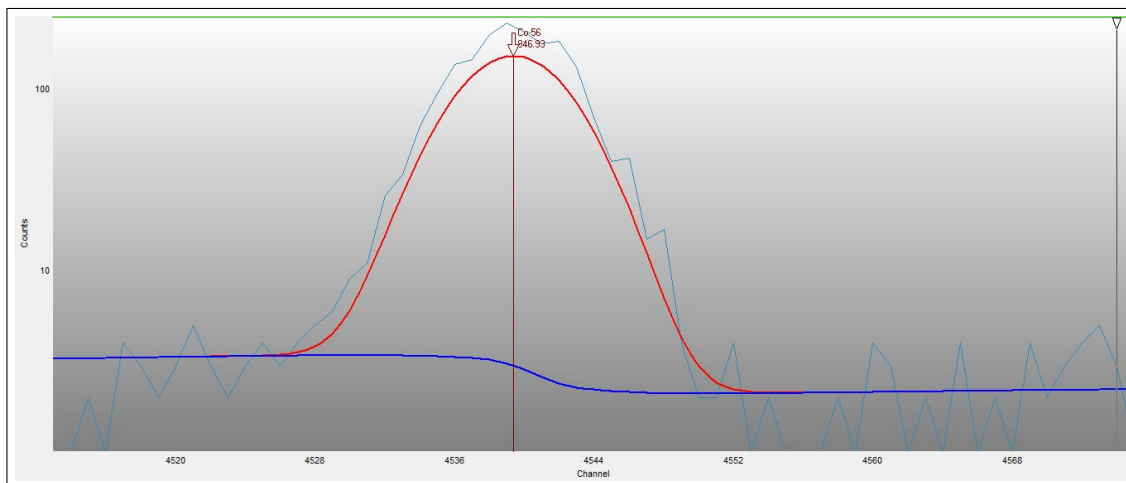


Figura 6-12.: Lámina de Havar 2. Pico de ^{56}Co .

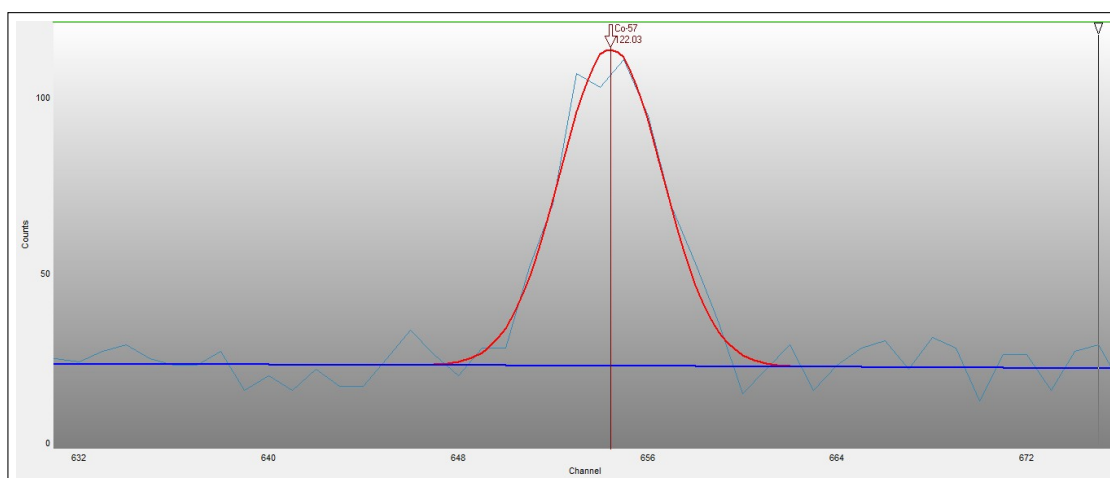


Figura 6-13.: Lámina de Havar 2. Pico de ^{57}Co .

Tabla 6-5.: Datos - Lámina de Havar 2, Stracotek.

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Co-56	4539,37(14)	846,93(3)	1,44	1244(62)
Co-57	654,45(91)	122,03(54)	0,93	487(59)

En el espectro de la figura 6-11, se evidencia que la lámina de Havar 2 de la misma marca del ciclotrón 1 contiene ^{56}Co y ^{57}Co , se observa la línea de emisión gamma de 846,92 keV y 122,04 keV, respectivamente. Las láminas de Havar analizadas tanto en el ciclotrón 1 como en el ciclotrón 2 contienen ^{56}Co y ^{57}Co , cabe resaltar que existe diferencias en la referencia de los blancos (ver anexo A y B).

En la tabla 6-5 se observa mayor área de pico para el radionúclido de ^{56}Co .

■ Agua recuperada 2

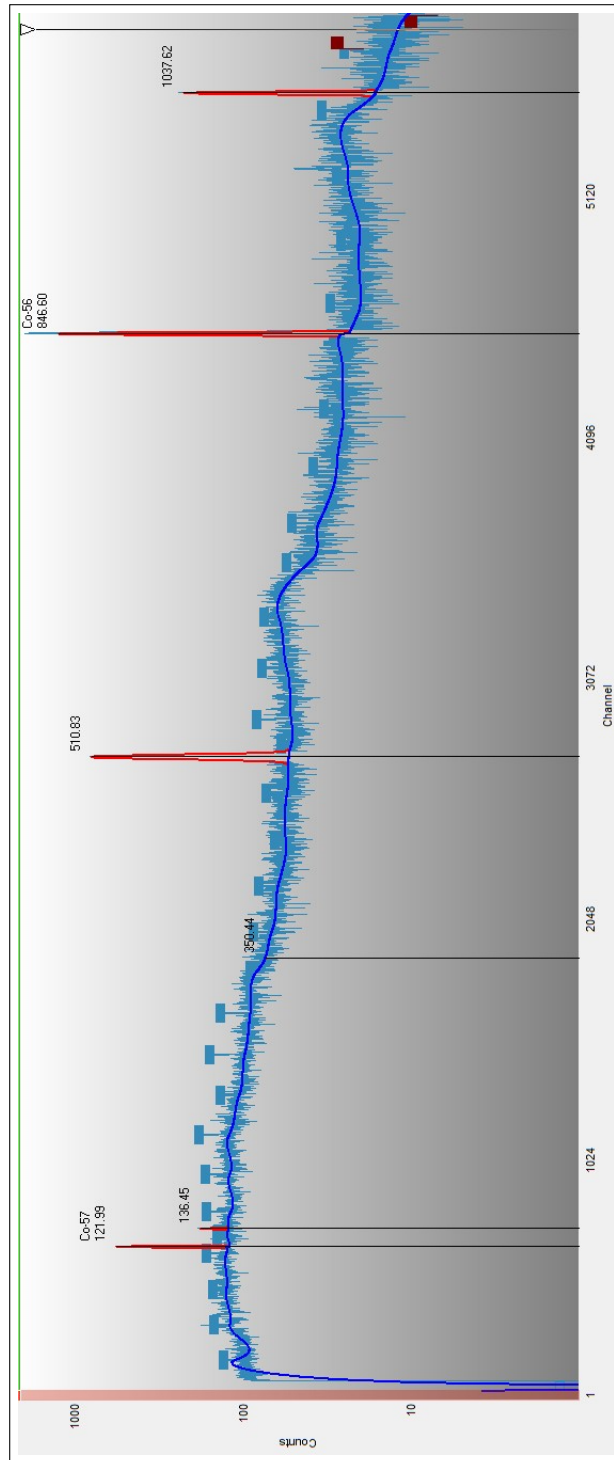


Figura 6-14.: C2: Agua recuperada 2.

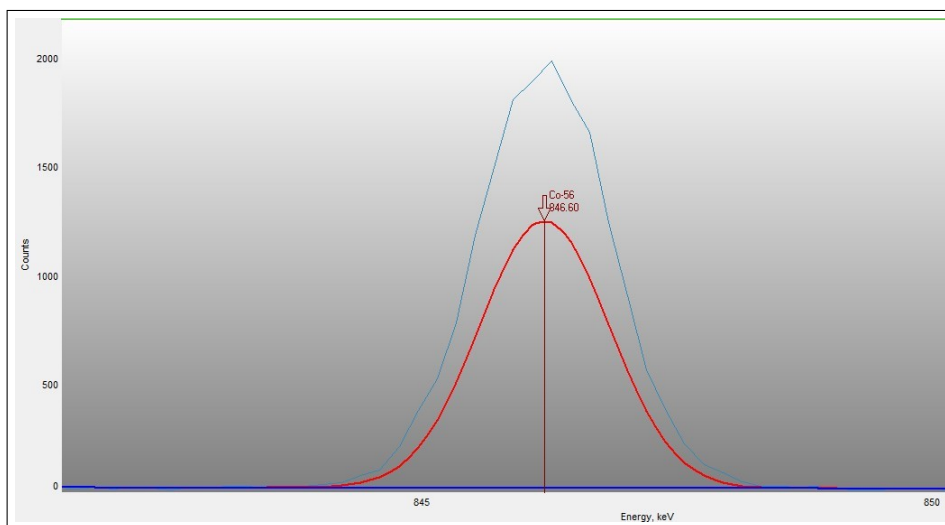


Figura 6-15.: Agua 2. Pico de ^{56}Co .

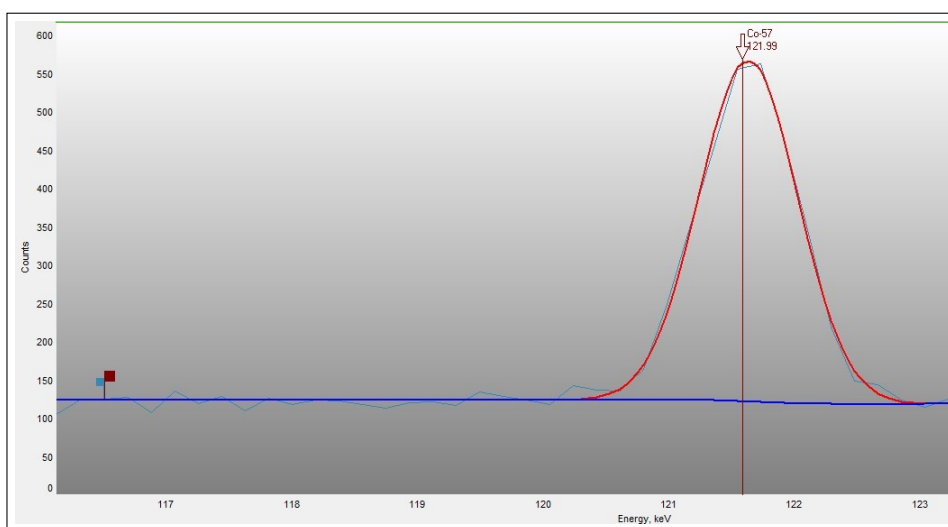


Figura 6-16.: Agua 2. Pico de ^{57}Co .

Tabla 6-6.: Datos - Agua recuperada 2, Stracotek.

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Co-56	4537,62(17)	846,60(3)	1,49	12173(251)
Co-57	654,23(6)	121,99(1)	0,91	2346(119)

La figura 6-14 muestra el espectro correspondiente a 5 ml de agua recuperada del ciclotrón 2 donde se identifican los radionúclidos de ^{56}Co y ^{57}Co , también fueron detectados en la muestra de agua del ciclotrón 1. Los picos de los dos radionúclidos se observan por separado en las figuras 6-15 y 6-16. En la tabla 6-6 se observa que el área de pico más grande

corresponde al radionúclido de ^{56}Co .

- Columna QMA

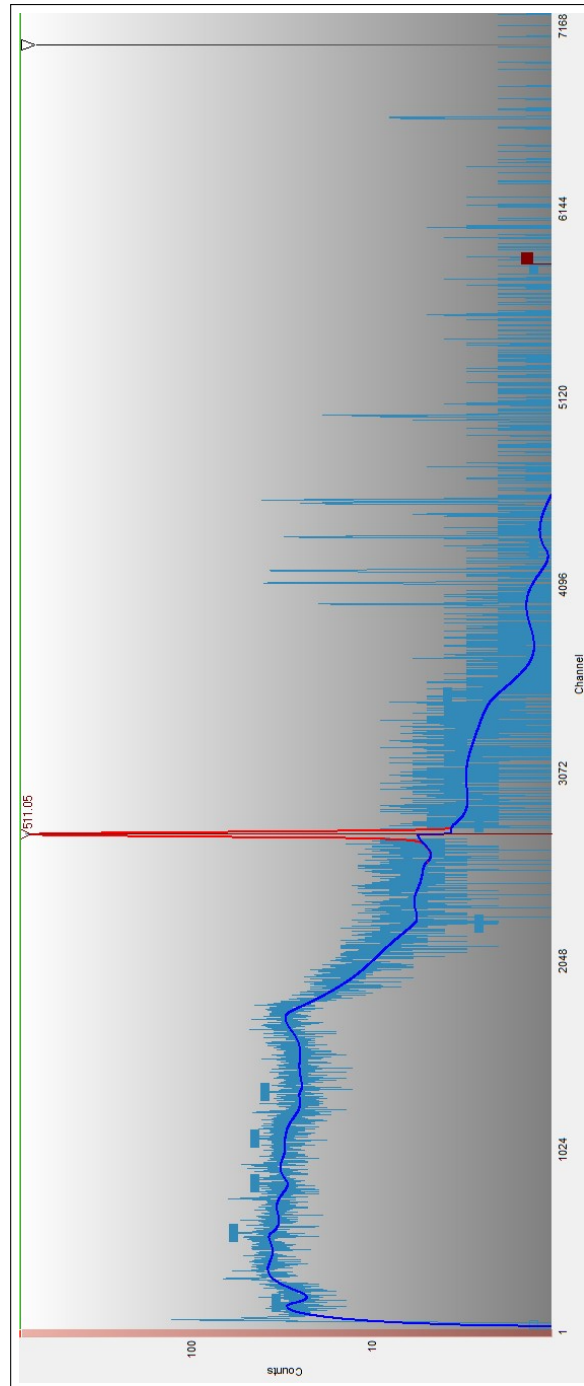


Figura 6-17.: C2: Columna de Amonio Cuaternario QMA ubicada en el módulo de síntesis.

Tabla 6-7.: Datos - Columna QMA.

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Aniquilación	2739,33(3)	511,05(1)	1,12	11657(215)

El espectro mostrado en la figura 6-17 corresponde a la muestra de la columna QMA extraída el 03/11/2022 (final de su uso) y analizada el 04/11/2022 es uno de los elementos dentro del sistema de síntesis del ^{18}F para la eliminación de impurezas del radiofármaco. Cabe señalar que este elemento no hace parte de la configuración directa del blanco del ciclotrón, pero sí, corresponde al proceso para la producción del $^{18}\text{F} - \text{FDG}$. Por tanto, es importante su análisis para conocer los radionúclidos que se pueden activar y contaminar el radiofármaco puro. En el espectro se evidencia un pico de 511,05 keV, sin embargo, no corresponde a la identificación de un radionúclido; esto permite confirmar que la columna QMA se encuentra libre de radionúclidos. En ese sentido, este desecho no ingresa al control regulatorio y puede ser liberado.

- Residuo del filtro de la bomba de vacío

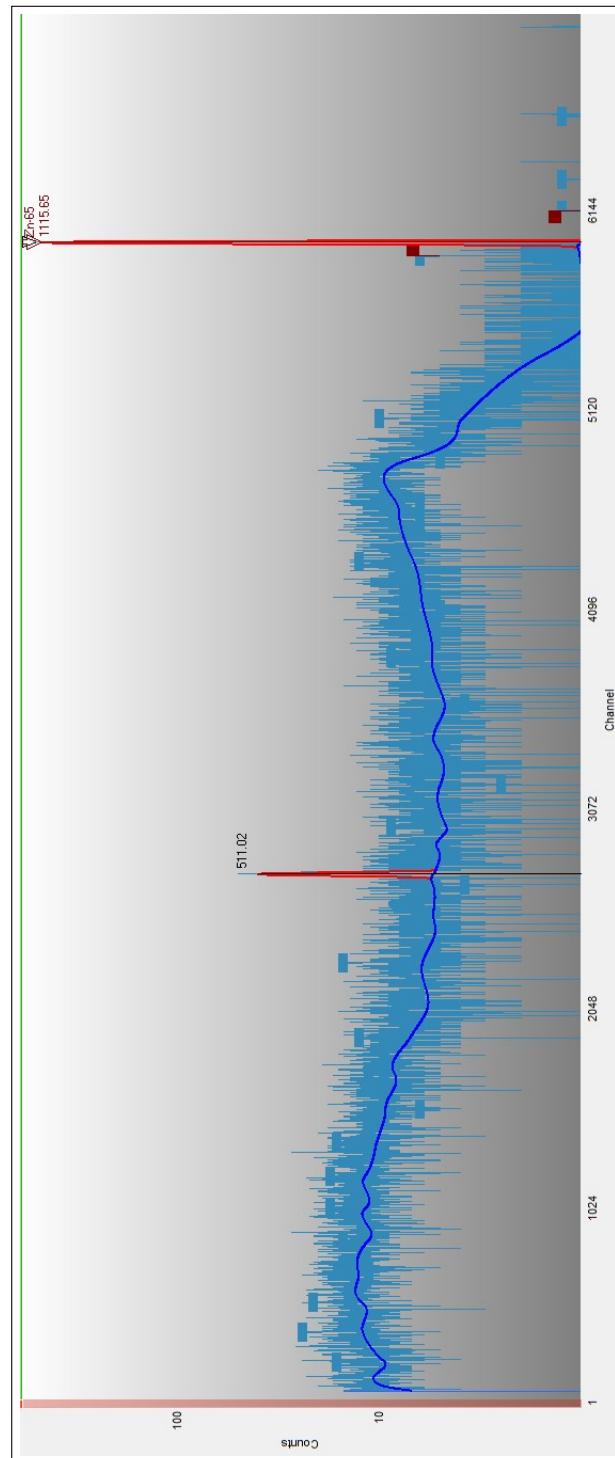


Figura 6-18.: C2: Residuo de la bomba de vacío del ciclotrón (arena).

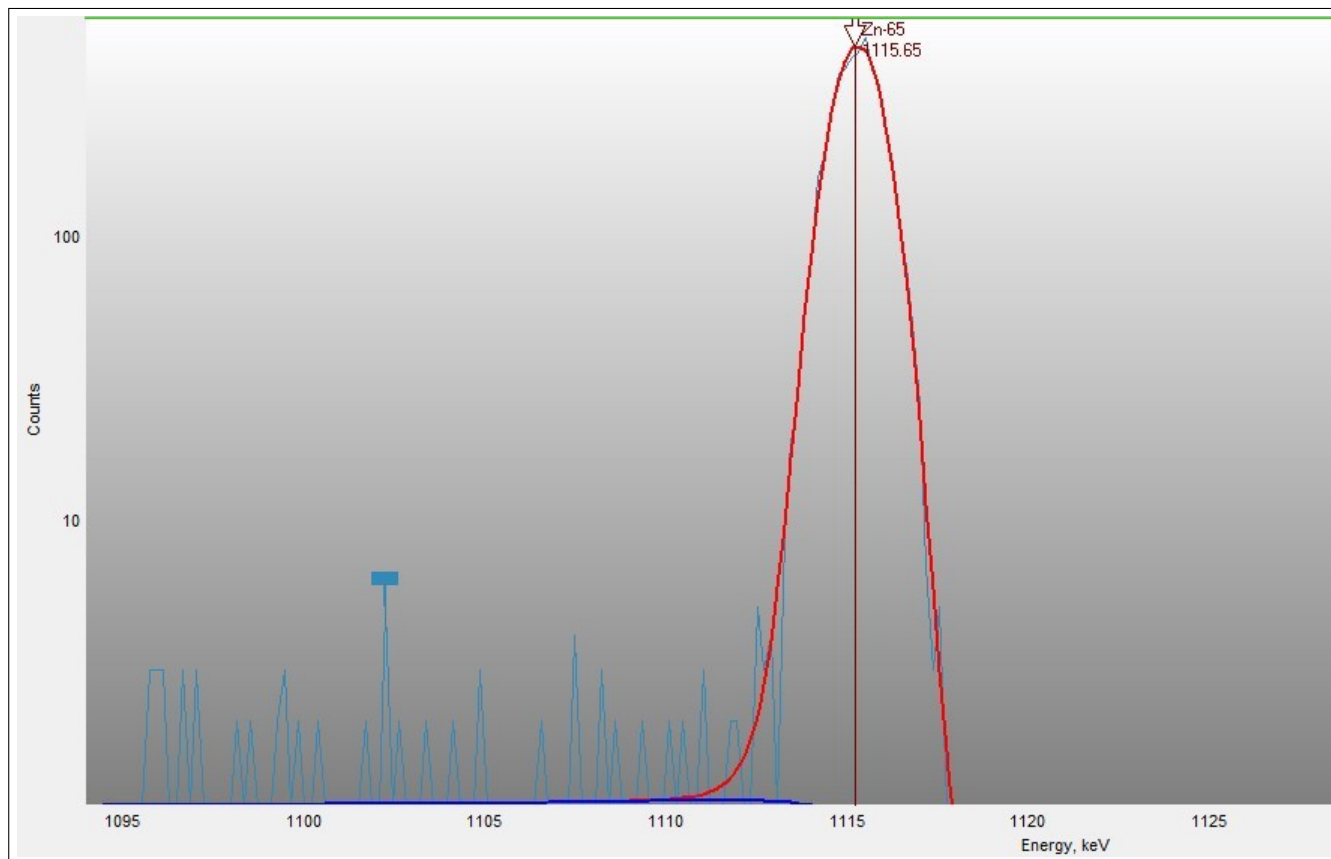


Figura 6-19.: Residuo bomba de vacío. Pico de ^{65}Zn .

Tabla 6-8.: Datos - Residuo bomba vacío.

<i>Radionúclido</i>	<i>Energía (Canal)</i>	<i>Energía (keV)</i>	<i>FWHM</i>	<i>Área</i>
Zn-65	5979,54(6)	1115,65(1)	1,60	4366(130)

En el espectro de la figura 6-18 se observa el análisis de la muestra de un residuo del filtro de la bomba de vacío del ciclotrón 2. A pesar de que, esta muestra tampoco corresponde a la configuración del blanco del ciclotrón, se considera un elemento de interés por su activación, pues hay presencia de ^{65}Zn un radionúclido que tiene un periodo de semidesintegración de 243,93 días.

En ese sentido, podría ocurrir una posible contaminación interna en el personal ocupacionalmente expuesto por inhalación de ese residuo que produce la bomba de vacío del ciclotrón. Es importante tomar medidas de acción para los trabajadores ocupacionalmente expuestos que manipulan estos desechos radiactivos (se discute en el capítulo 4).

Tabla 6-9.: Comparación con los estudios internacionales.

<i>Comparación</i>	<i>Ciclotrones en Colombia 2022</i>	<i>Universidad de Palermo Italia 2007</i>	<i>Instituto Nacional de Metrología de la Radiación Ionizante en Roma 2009</i>	<i>Instituto de Química de radiación aplicada en Lodz - Polonia 2019</i>	<i>Hospital Universitario de Badajoz - España 2020</i>
Lámina de Havar	^{56}Co , ^{57}Co	^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{52}Mn , ^{54}Mn , ^{51}Cr	^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{52}Mn , ^{55}Fe	N/A	^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{95}Tc , ^{183}Re
Agua recuperada	^{57}Co , ^{56}Co	N/A	N/A	N/A	^{52}Mn , ^{55}Co ^{56}Co , ^{57}Co ^{95}Tc , ^{96}Tc , ^{109}Cd
Junta Helicoflex	^{57}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn	N/A	N/A	N/A	^{51}Cr , ^{58}Co , ^{60}Co
Columna QMA	No registra	N/A	N/A	^{109}Cd , ^{107}Cd	^{109}Cd , ^{52}Mn ^{55}Co , ^{56}Co , ^{57}Co
Residuo del filtro de la bomba de vacío	^{65}Zn	N/A	N/A	N/A	N/A

Cuantificación de radionúclidos - Actividad Bq

Los radionúclidos identificados en los espectros gamma de cada pieza del blanco son cuantificados en la magnitud de actividad, la cual, se determina teniendo en cuenta, la fecha del último bombardeo de la pieza y la fecha en que se obtuvo el espectro gamma, en la tablas 6-10 y 6-11 se muestra el valor de actividad con su respectiva incertidumbre.

Tabla 6-10.: Ciclotrón 1. Actividad de radionúclidos presentes en la muestra.

<i>Radionúclido</i>	<i>Actividad (Bq)</i>	<i>Incertidumbre relativa (%)</i>
<i>Lámina de Havar 1</i>		
Co-56	13100	3
Co-57	59800	3
<i>Agua recuperada 1</i>		
Co-56	1030	4
Co-57	2860	4
<i>Junta Helicoflex</i>		
Co-60	201	9
Mn-54	860	6
Co-57	720	8

Tabla 6-11.: Ciclotrón 2. Actividad de radionúclidos presentes en la muestra.

<i>Radionúclido</i>	<i>Actividad (Bq)</i>	<i>Incertidumbre relativa (%)</i>
<i>Lámina de havar 2</i>		
Co-56	810	5
Co-57	400	12
<i>Agua recuperada 2</i>		
Co-56	578	3
Co-57	155	6
<i>Residuos del filtro bomba de vacío</i>		
Zn-65	6010	4

Las concentraciones de actividad son superiores al nivel de dispensa para cada radionúclido, por tanto, se debe realizar un tratamiento adecuado dentro de la instalación del ciclotrón para este tipo de desechos radiactivos. En el capítulo 4 podemos identificar el procedimiento adecuado para gestionar este tipo de desechos.

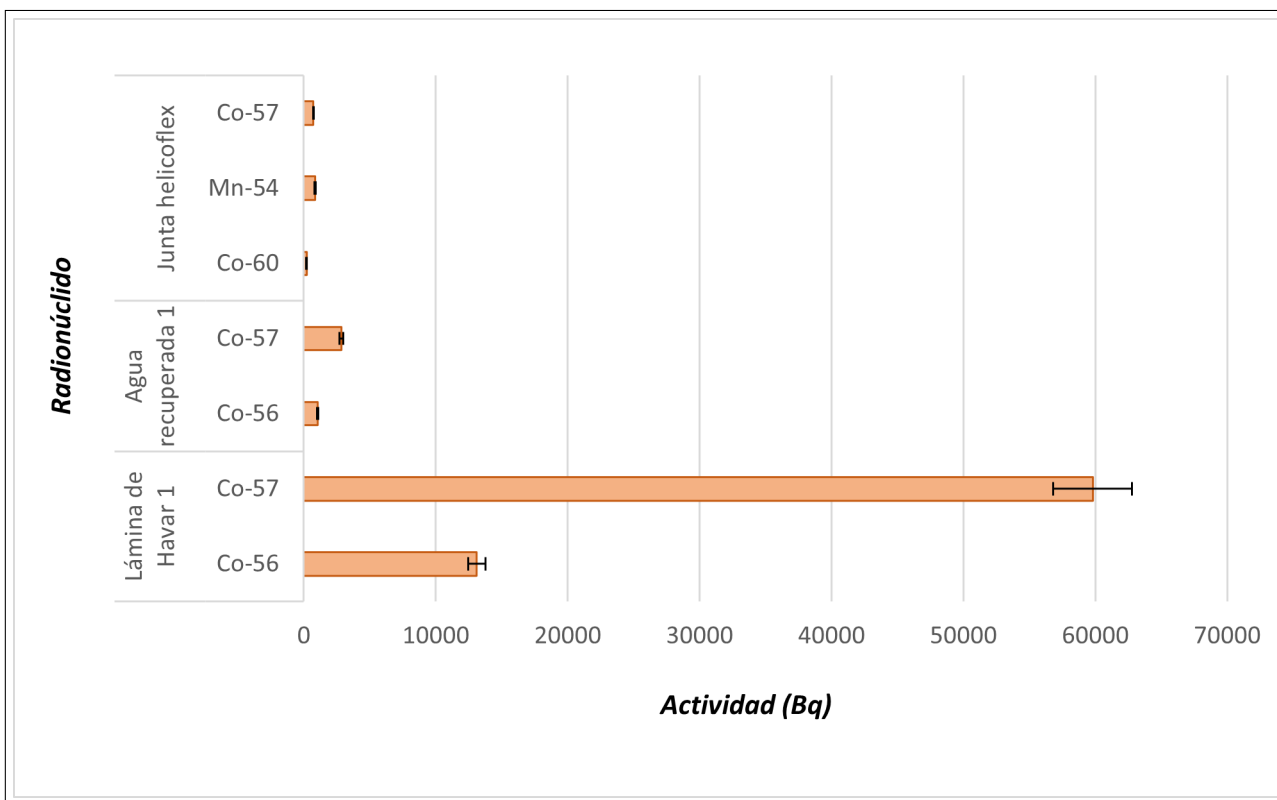


Figura 6-20.: Ciclotrón 1. Representación gráfica de la actividad de radionúclidos presentes en las muestras.

La actividad en la lámina de havar 1 es mayor que en la lámina de havar 2 (ver figuras 6-20 y 6-21) se debe a la fecha del último bombardeo pues para la lámina de havar 1 fue el 02/11/2022 y la lámina de havar 2 el 01/07/2022. Ocurre lo mismo para el agua recuperada del ciclotrón 1 y ciclotrón 2 su fecha de último bombardeo es 27/11/2022 y 30/09/2022, respectivamente. La Junta Helicoflex fue bombardeada por última vez el 30/01/2021 y a la fecha de medición posee 1781 Bq. El residuo del filtro de la bomba de vacío contiene 6010 Bq su último bombardeo fue 03/01/2022, cabe resaltar que este residuo se ha venido almacenando en un mismo contenedor. Las incertidumbres relativas de la cuantificación de actividad para los radionúclidos presentes en las muestras se encuentran por debajo del 12%.

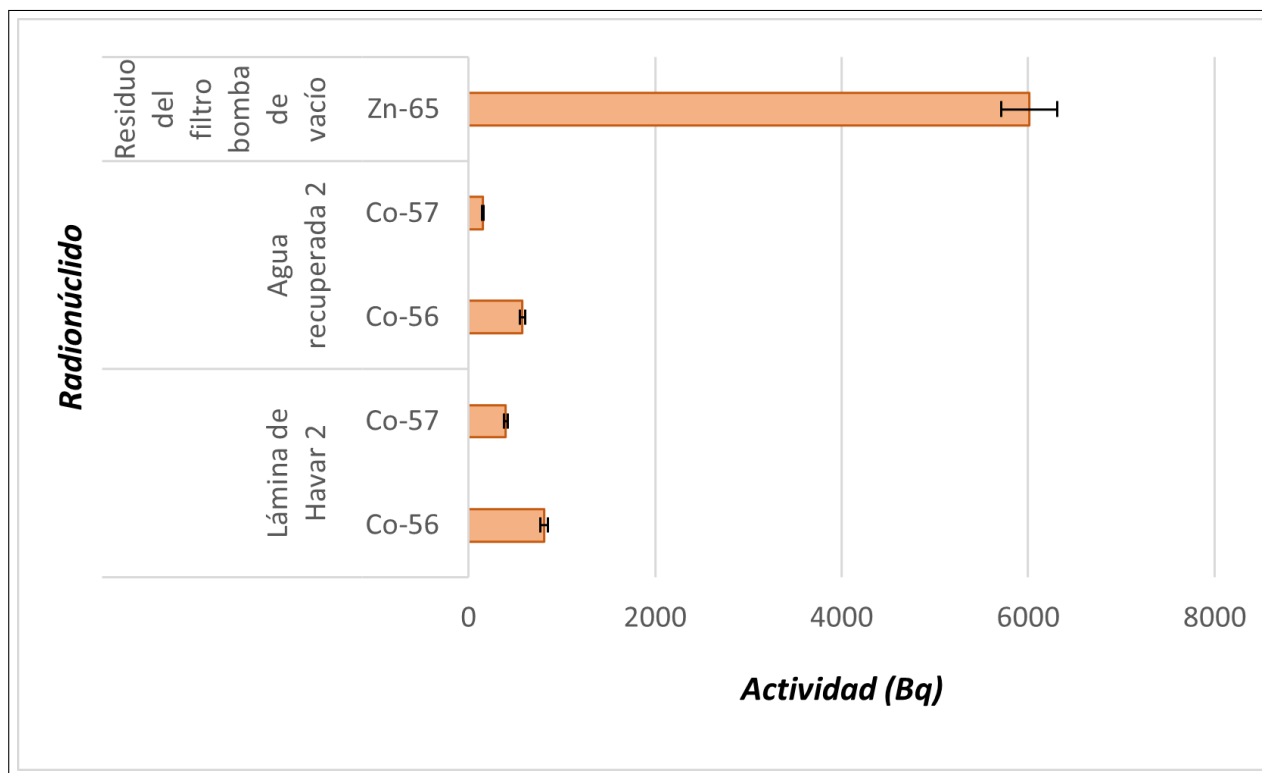


Figura 6-21.: Ciclotrón 2. Representación gráfica de la actividad de radionúclidos presentes en las muestras.

6.2. Evaluación de dosis recibidas por trabajadores ocupacionalmente expuestos

Estimación de dosis efectiva de los TOEs

Teniendo en cuenta, que los trabajadores ocupacionalmente expuestos están presentes en diferentes escenarios para llevar a cabo, las operaciones de recambios, manipulación y traslado de desechos radiactivos a la zona asignada para el almacenamiento temporal se hace necesario evaluar las dosis efectivas, por tanto, en la tabla [6-12](#) se muestra la estimación de las tasas de dosis a TOEs cuando se extraen y manipulan las piezas del blanco del ciclotrón. Considerando que el tiempo para estas actividades es de aproximadamente 2 h y los recambios se hacen 3 veces en el año.

Tabla 6-12.: Dosis efectiva anual estimada para los TOEs a 20 cm de las piezas emisoras de radiación.

<i>Radionúclido</i>	<i>Lámina de Havar 1</i>	<i>Agua recuperada 1</i>	<i>Junta Helicoflex</i>	<i>Residuo del filtro de la bomba de vacío</i>
^{56}Co	$1,39 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-5}$		
^{57}Co	$2,0 \times 10^{-5}$	$9,57 \times 10^{-7}$	$6,22 \times 10^{-11}$	
^{54}Mn			$6,11 \times 10^{-10}$	
^{60}Co			$3,98 \times 10^{-10}$	
^{65}Zn				$2,83 \times 10^{-9}$
Tasa de dosis (mSv/h)	$1,59 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-5}$	$1,07 \times 10^{-9}$	$2,83 \times 10^{-9}$
Dosis (mSv)	$1,15 \times 10^{-2}$	$8,57 \times 10^{-4}$	$7,71 \times 10^{-8}$	$2,04 \times 10^{-7}$

Las dosis estimadas a trabajadores ocupacionalmente expuestos que se ubican a 20 cm del desecho radiactivo no superan los límites de dosis anuales recomendados por el ICRP 103 de 2007 y la norma colombiana MME 181434 de 2002, por lo tanto, las actividades de recambio, manipulación y traslados a la zona de almacenamiento temporal de los desechos radiactivos se consideran de bajo riesgo radiológico.

Monitoreo de tasa de dosis en el área de almacenamiento temporal

Las tasas de dosis se midieron en contacto a 10 cm desde la superficie del objeto, al centro efectivo del detector durante el traslado de desechos radiactivos al lugar del almacenamiento temporal. Las mediciones se hicieron con equipos de monitoreo de tasa de dosis como el RADEYE B-20 y Graetz X 50, en la tabla 6-13 se registran los valores obtenidos.

Tabla 6-13.: Tasa de dosis equivalente ambiental medidas durante los traslados de piezas al almacenamiento temporal.

<i>Pieza del blanco</i>	<i>Distancia (cm)</i>	<i>Tasa de dosis ($\mu Sv/h$)</i>	<i>Equipo monitor de tasa de dosis</i>	<i>Dosis (mSv)</i>
Lámina de Havar 1	10	1813	Graetz	$1,96 \times 10^0$
Agua recuperada 1	10	2,48	Radeye B20	$2,68 \times 10^{-3}$
Junta Helicoflex	10	2,4	Radeye B20	$2,59 \times 10^{-3}$
Residuo del filtro de la bomba de vacío	10	0,13	Radeye B20	$1,40 \times 10^{-4}$

Se evidencia tasas de dosis pequeñas para el agua recuperada 1, la Junta Helicoflex y el residuo del filtro de la bomba de vacío que no superan los límites de dosis anuales para TOEs definidos en la ICRP 103 de 2007 y la norma colombiana MME 181434 de 2002. Se debe tener presente que el tiempo de permanencia de un TOE en el proceso de tratamiento, manipulación en el emplazamiento y almacenamiento debe ser tan bajo como sea posible.

7. Conclusiones

- Se evidencia en este estudio que el desecho con mayor actividad es una pieza de la configuración del blanco de los ciclotrones denominada Lámina de Havar 1 con 72900 Bq comparado con la lámina de Havar 2 con 1210 Bq, esto es debido al tiempo de enfriamiento de las muestras desde su último bombardeo. La lámina de Havar 1 se mide después de 31 días y la lámina de Havar 2 con 127 días.
- Las láminas de Havar y el agua recuperada se activan con los radionúclidos ^{56}Co y ^{57}Co , sabemos que su periodo de semidesintegración es corto, lo que permite que su gestión sea de menor complejidad porque puede alcanzar los niveles de exención a corto plazo y puede ser gestionado posteriormente como un desecho convencional.
- El residuo del filtro de la bomba de vacío se activa con ^{65}Zn contiene 6010 Bq, este material particulado tiende a ser arcilloso y por seguridad de los trabajadores ocupacionalmente expuestos se recomienda manipular este desecho radiactivo con guantes quirúrgicos, gafas y mascarilla adecuados para radiaciones ionizantes.
- Los desechos radiactivos analizados en este trabajo muestran una mezcla de radionúclidos con periodos de semidesintegración menores a 5,3 años y tiempos de almacenamiento temporal en la instalación del ciclotrón de aproximadamente 2 a 11,4 años. Actualmente, la norma nacional en la resolución MME 180005 de 2005 exige que los desechos radiactivos con periodos de semidesintegración mayores a 100 días sean trasladados a la ICGDR de Colombia. Sin embargo, esto no se cumple en su totalidad por la capacidad limitada de almacenamiento temporal de la ICGDR. También, por falta de capacitación a las instalaciones generadoras de desechos radiactivos para la construcción de bultos que cumplan con los requerimientos de la ICGDR y por falta de contenedores certificados para el traslado de este tipo de desechos radiactivos.
- Las instalaciones de ciclotrones médicos deben contar con un protocolo de gestión para desechos radiactivos, declarar estos desechos ante la autoridad reguladora y disponer una zona adecuada para el almacenamiento temporal de los mismos. Teniendo en cuenta, los tiempos que deben permanecer las piezas de los blancos para que ocurra el decaimiento radiactivo, ya que pueden superar los dos años de almacenamiento. Es necesario que el país cuente con una normatividad específica para la gestión de los desechos radiactivos originados en ciclotrones médicos y se definan lineamientos arti-

culados con la Instalación Centralizada de Gestión de Desechos Radiactivos ICGDR de Colombia.

- Es importante caracterizar las piezas del blanco de los ciclotrones médicos y también inspeccionar elementos que hacen parte del ciclo de producción del radiofármaco por posibles activaciones, teniendo en cuenta, la composición física, química y radiológica para gestionar de manera adecuada los desechos radiactivos.
- Las tasas de dosis efectivas recibidas por los trabajadores ocupacionalmente expuestos en operaciones de manipulación en el emplazamiento y almacenamiento temporal no representan riesgo radiológico puesto que, no se superan los límites de dosis recomendados por el ICRP 103 de 2007 y la norma colombiana MME 181434 de 2002.
- Este tipo de estudios permite crear acciones para la seguridad y protección radiológica de las personas y del medio ambiente. Actualmente, Colombia se encuentra creciendo en el ámbito de la medicina nuclear y por tanto, es un tema que interesa a todo el país.

Perspectivas

- Este trabajo busca hacer un llamado a la necesidad que tiene el país de acceder a programas de capacitación sobre gestión de desechos radiactivos. Fomentar la normatividad colombiana para este tipo de desechos radiactivos.
- Divulgar el protocolo de este trabajo a las instalaciones de ciclotrones médicos.
- Surgen iniciativas para nuevas investigaciones, en cuanto a la caracterización de muestras que hacen parte del proceso de producción de radionúclidos en ciclotrones médicos. Como por ejemplo análisis de muestras por activación neutrónica y espectrometría alfa.

A. Anexo: Especificaciones técnicas del blanco del ciclotrón Siemens Hp Eclipse

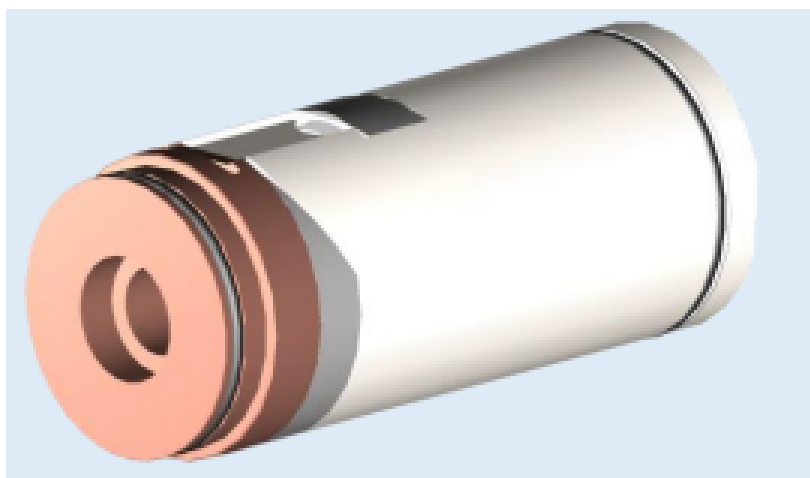


Figura A-1.: Blanco HP Eclipse, Stracotek [8].

Tabla A-1.: Especificaciones técnicas del blanco Stracotek, HP Eclipse [8].

Característica	Valor
Material de la cámara	Niobio para ^{18}F
Volumen de llenado (ml)	2,2
Dimensiones (mm)	42 (D) x 100 (L)
Material de la ventana	Havar 25 μm
Volumen de la cámara (mm)	3,7
Corriente máxima ^{18}F	70 μA
Campo (1 T _{1/2})	4,1 Ci (111 GBq)
Vida de la ventana	15000 $\mu\text{A}\cdot\text{hr}$

B. Anexo: Especificaciones técnicas del blanco PETtrace 800 - Sco

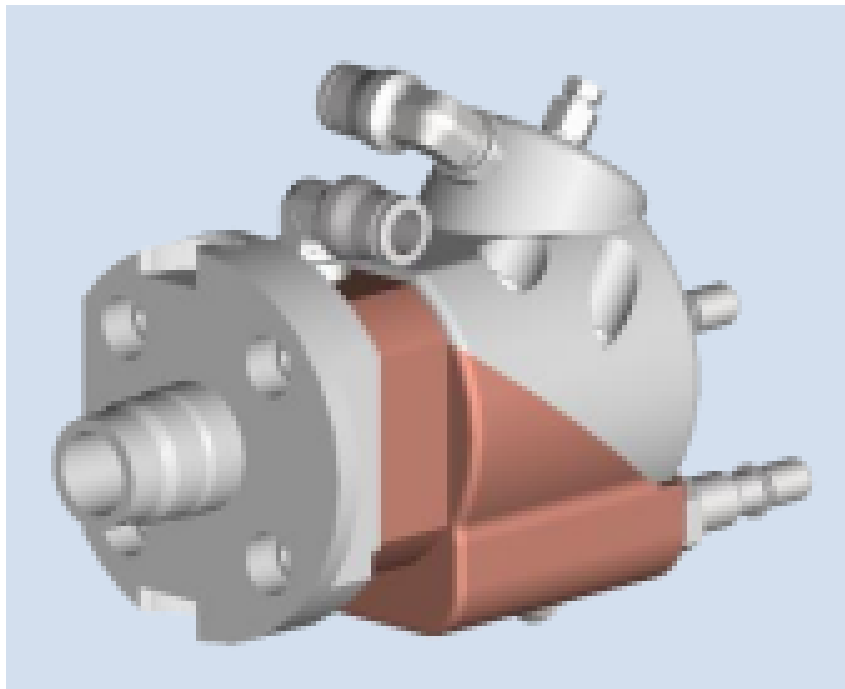


Figura B-1.: Blanco GE, Stracotek [9].

Tabla B-1.: Especificaciones técnicas del blanco Stracotek [9].

Característica	Valor
Material de la cámara	Niobio para ^{18}F
Volumen de llenado (ml)	3,5
Dimensiones (mm)	187 x 90 x 102
Material de la ventana de agua	Havar 38 μm
Material de la ventana de vacío	Havar 12,5
Corriente máxima ^{18}F	100 μA
Campo (2 horas)	9.7 Ci (33.3GBq)

C. Anexo: Especificaciones técnicas del detector HPGe.

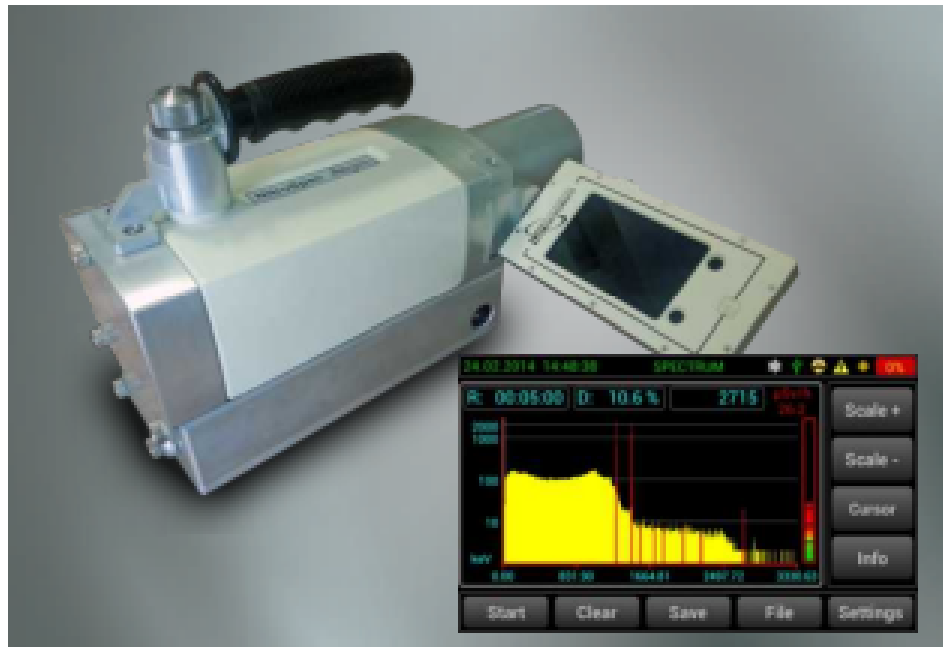


Figura C-1.: Espectrometro gamma HPGe.

[15]

Tabla C-1.: Especificaciones técnicas del detector [15].

<i>Detector HPGe NitroSPEC</i>	
Parámetros	Valor
Rango de medición Energía (keV)	20 - 7000
Resolución enegética (FWHM) 122 keV (Co-57), no mayor que eV 1332 keV (Co-57), no mayor que, eV	760 1738
Tensión de operación del detector	1400
Eficiencia relativa para 1.33 MeV de energía para (NaI), no menor que, %	10 %
No linealidad integral, no mayor que, %	0,03
Resolución de escala espectrométrica, canales	16384
Carga máxima, no menor que, pulsos/s	150000
Diámetro del área sensible del detector, no menor que, mm	43,3
Grosor del área sensible del detector, no menor que, mm	43,9
Rango de temperatura de operación, °C	0 a 40
Tiempo de enfriamiento, horas	1,5
Tiempo de operación autónomo una vez lleno, horas	20
Tiempo de vida recargable, horas	8
Dimensiones totales, mm	324x154x217
Volumen del vaso Dewar, no inferior a, L.	0,6
Carga de entrada, cps	0 - 150000
Nivel de ruido de entrada, uV	<3
Impedancia de salida, Ohm	1000
Inestabilidad de la temperatura de amplificación, %/°C	<0,0075
Pulsación y ruido, mV	<10
Rango de medida máximo en modo radiométrico	15 mSv/h

D. Anexo: Especificaciones técnicas de los monitores de tasa de dosis.

Tabla D-1.: Especificaciones técnicas del detector Radeye B20 GM [16].



	
Característica	Valor
Detector	1 pancake de un tubo Geiger Muller, diámetro de la ventana de 44 mm.
Rango de medición IEC 60846-1	0,2 $\mu\text{Sv/h}$ - 2 mSv/h (20 μrem - 200 mrem/h)
Resolución	0,01 $\mu\text{Sv/h}$
Rango de medición (contaminación)	0 - 10 kcps
Rango de energía (con filtros de energía gamma $H^*(10)$ y $H'(0,07)$)	17 keV – 3 MeV de acuerdo con IEC 60846-1
Peso y dimensiones máximas	300 g, 13 cm x 7 cm x 6 cm
Aplicaciones	Contaminación $\alpha\beta\gamma$, tasa de dosis $H^*(10)$ y $H'(0.07)$

Tabla D-2.: Especificaciones técnicas del detector Graetz X 50 DE - GM [17].



Característica	Valor
Detector	Tubo Geiger Muller
Rango de medición IEC 60846-1	100 µSv/h - 1 Sv/h
Resolución	0,01 µSv/h
Rango de medición (contaminación)	0 - 10 kcps
Alimentación	Batería de 9V
Peso y dimensiones máximas	400 g, 152 mm x 82 mm x 39 mm
Temperatura de operación	- 30 °C a 60 °C

Bibliografía

- [1] Principio y funcionamiento del ciclotrón. <https://www.youtube.com/watch?v=m2jp0klZHEE&t=25s>, 2017.
- [2] Wayne D Newhauser and Rui Zhang. The physics of proton therapy. *Physics in Medicine & Biology*, 60(8):R155, 2015.
- [3] J Carbajo Chaves, M Jurado Vargas, and R Sánchez Sánchez. Measurement of activation products generated in the [18f] fdg production by a 9.6 mev cyclotron. *Radiation Physics and Chemistry*, 126:32–36, 2016.
- [4] IAEA ENSDF. Live chart of nuclides nuclear structure and decay data. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>, 2019.
- [5] Guía de seguridad no ws-g-2.7. gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación., 2009.
- [6] Instalación centralizada para la gestión de desechos radiactivos. <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/AsuntosNucleares/Paginas/gestion-de-desechos-radiactivos.aspx>.
- [7] Viales. <https://www.pharmaceutical-business-review.com/wp-content/uploads/2014/05/schott-brochure-schott-vials-english-20092017.pdf>.
- [8] STRACOTEK. Sc40 / eclipse hp. https://www.stracotek.com/_files/ugd/1cf900_813ed8eb0407425e88e3e1a76908a2f2.pdf.
- [9] STRACOTEK. Liquid targets for pettrace cyclotrons. https://www.stracotek.com/_files/ugd/1cf900_07fb8a9182794550a35931f7bf60603f.pdf.
- [10] International Atomic Energy Association IAEA. Cyclotron produced radionuclides: principles and practice. Technical report, No. 465. Technical Reports Series, 2008.
- [11] Resolución 180005 2010 "por la cual se adopta el reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en colombia, 2010.
- [12] Informes de seguridad - normas basicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación., 1997.

- [13] Resolución 181434 de 2002 "por la cual se adopta el reglamento de protección y seguridad radiológica, 2002.
- [14] David S Smith and Michael G Stabin. Exposure rate constants and lead shielding values for over 1,100 radionuclides. *Health physics*, 102(3):271–291, 2012.
- [15] BALTIC SCIENTIFIC INSTRUMENTS. Semiconductors detectors nuclear electronics for radiation measurements. https://bsi.lv/media/uploads/bsi_catalogue.pdf.
- [16] Thermo scientific radeye b20 / b20-er. <https://www.thermofisher.com/document-connect/document-connect.html?url=https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets%2FCAD%2FSpecification-Sheets%2FRadEye-B20-e-V1-0-A4.pdf>.
- [17] Graetz x 50. <https://www.tecnitestndt.net/wp-content/uploads/2020/01/Detectores-de-radiaci%C3%B3n.pdf>.
- [18] IAEA. Database of cyclotrons for radionuclide production. <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Cyclotron.aspx>, 2006.
- [19] Servicio Geológico Colombiano. Instalaciones autorizadas para el empleo de material radiactivo. <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/AsuntosNucleares/Documents/instalaciones-autorizadas/instalaciones-autorizadas-24-11-2022.pdf>, 2022.
- [20] Yamil Chain and Luis Illanes. Radiofármacos en medicina nuclear fundamentos y aplicación clínica. *Facultad de Ciencias Exactas, Edulp (Editorial de la Universidad de la Plata, Libros de Cátedra, 188pp*, 2015.
- [21] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. Transporte de mercancías peligrosas clase 7. materiales radiactivos. transporte terrestre por carretera. <https://web.mintransporte.gov.co/consultas/mercapeli/Reglamento/Anexos/NTC3970.pdf>.
- [22] Magdalena Długosz-Lisiecka, Teresa Jakubowska, and Magdalena Zbrojewska. Formation of ^{107}Cd radionuclide impurities during ^{18}F production. *Applied Radiation and Isotopes*, 147:48–53, 2019.
- [23] P Guarino, S Rizzo, E Tomarchio, and D Greco. Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a pet cyclotron. *Cyclotrons and Their Applications*, 1:295, 2007.
- [24] R Calandrino, A Del Vecchio, R Parisi, S Todde, P De Felice, A Savi, A Pepe, and A Mrskova. Measurements and evaluation of the risks due to external radiation exposures and to intake of activated elements for operational staff engaged in the maintenance of medical cyclotrons. *Radiation protection dosimetry*, 139(4):477–482, 2010.

- [25] M Jurado Vargas, JC Carbajo Chávez, R Sánchez Sánchez, and C Sosa. Gamma-ray measurements of the activated target components in a cyclotron used for positron emission tomography. *Radiation Physics and Chemistry*, 177:109–153, 2020.
- [26] Jesús Carlos Carbajo Chávez. *Aplicación de la espectrometría de radiación gamma de alta resolución en la producción de los radiofármacos [18f] fdg y quadramet [153sm] edtmp*. PhD thesis, Universidad de Extremadura, 2020.
- [27] Diana Isabel Páez Gutiérrez, Amelia De los Reyes, and Augusto Llamas Olier. La tomografía por emisión de positrones: nuevo paradigma para la evaluación y el manejo del cáncer. 2006.
- [28] Karel Strijckmans. The isochronous cyclotron: principles and recent developments. *Computerized medical imaging and graphics*, 25(2):69–78, 2001.
- [29] AC Medrano S, E Barrera G, and H Valdovinos U. Characterization of the proton beam profile of an iba 18/9 cyclotron with ebt3 radiochromic films. 2019.
- [30] Charles Kittel and Walter D Knight. *Mecánica*, volume 1. Reverté, 1982.
- [31] Seo Hyun Park and Jin Oh Kang. Basics of particle therapy i: physics. *Radiation oncology journal*, 29(3):135, 2011.
- [32] Gumercindo Raul Vila Porras. Efecto del etanol sobre la estabilidad del radiofármaco 2-[18f] fluoro-2-desoxi-d-glucosa. 2020.
- [33] Teresa Bas Andreu. *ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN CON CICLOTRÓN DE RADIONUCLEIDOS PARA TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES (PET)*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2020.
- [34] M Alanis et al. General aspects of the cyclotrons and radiochemical separation of: 11 c, 15 o, 18 f and 14 n. Technical report, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 1997.
- [35] Adolfo Obaya Valdivia, Jesús López López, Yolanda Marina Vargas-Rodríguez, and Oyuki Camacho González. Producción de radiofármacos para tomografía por emisión de positrones (pet) y su aplicación en el diagnóstico de diversas enfermedades. *Educación química*, 27(4):292–299, 2016.
- [36] David Dowsett, Patrick A Kenny, and R Eugene Johnston. *The physics of diagnostic imaging*. CRC Press, 2006.
- [37] MM Bé, V Chisté, C Dulieu, X Mougeot, E Browne, V Chechev, N Kuzmenko, F Kondev, A Luca, M Galan, et al. Table of radionuclides (vol. 5—a 22 to 244), monographie bipm-5, vol. 5. *Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, France. See also Browne, E., Bé, M.-M., Helmer, RG*, page 71, 2004.

- [38] Elio Tomarchio. Measurement of radionuclide activities induced in target components of an iba cyclone 18/9 by gamma-ray spectrometry with hpge and labr3: Ce detectors. *Health Physics*, 107(2):S143–S152, 2014.
- [39] FRANCISCO JAVIER CABRERA ORELLANA. *ESTIMACION DE LA TEMPERATURA DE UN DETECTOR DE GERMANIO HIPERPURO*. PhD thesis, UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE, 2014.
- [40] Gordon Gilmore. *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2008.
- [41] Fernando Cristancho. Instrumentación nuclear-prácticas experimentales, 2021.
- [42] JC Aguiar and JA Fernandez. Determinacion de actividad por espectrometria gamma de radio-nucleidos presentes en tambores de residuos generados en centrales nucleares. *Primer Congreso Americano del IRPA. Acapulco*, pages 4–8, 2006.
- [43] Colección de normas de seguridad del oiea. aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispensa. guía de seguridad rs-g-1.7, 2007.
- [44] Las recomendaciones 2007 de la comisión internacional de protección radiológica, 2007.
- [45] P Hahn. An overview of the iaea activities on occupational radiation protection. In *Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers—Gaps, Challenges and Developments. Proceedings of an International Conference*, 2022.
- [46] Zuluaga P Mosos J Hurtado J Ospina A, Prada T. Caracterización por espectrometría gamma de ventanas y rejillas metálicas activadas en la operación de un ciclotrón siemens eclipse para producción de 18 f. https://minas.medellin.unal.edu.co/images/XICIM/PROGRAMA_XI_CIM_2022_VERSION_PRELIMINAR.pdf, 2022.
- [47] Resolución 181682 de 2005 "por la cual se adopta el reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos, 2005.
- [48] Colección Seguridad N IAEA. 115: Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra las radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. *IAEA, Viena, Austria*, 1997.
- [49] Ministerio de Minas y Energía. Resolución "por la cual se adopta el reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos y se reglamenta la seguridad física en el transporte. https://www.minenergia.gov.co/documents/7331/091220_Reglamento_para_el_Transporte_Seguro_de_Materiales_Radiactivos.pdf.
- [50] Alejandro E Condori Alvarado. *Caracterización de eficiencia de detección de sistemas de espectrometría gamma con detector CZT compacto para uso en medicina nuclear y PET, por medio de modelado montecarlo*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo, 2019.

- [51] Baltic Scientific Instruments. Spectraline software. linear spectra processing. user's manual., 2015.