

Trabajo Fin de Máster en Avances en Radiología
Diagnóstica y Terapéutica y Medicina Física

Influencia de la humedad relativa en las medidas de haces de radiación realizadas mediante cámaras de ionización abiertas al aire.

María del Pilar Sánchez Pedrajas
Julio 2022



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Influencia de la humedad relativa en las medidas de haces de radiación realizadas
mediante cámaras de ionización abiertas al aire.

María del Pilar Sánchez Pedrajas

Tutores: Damián Guirado Llorente

Radiofísico Hospitalario
Hospital Clínico San Cecilio
Universidad de Granada
Firma Tutor

Antonio M. Lallena Rojo

Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad de Granada
Firma Tutor

RESUMEN

La dosimetría física de las radiaciones ionizantes se encarga de medir las dosis absorbidas en un material tras una exposición a estas. En el área clínica las radiaciones se emplean como método diagnóstico y terapéutico, y para detectarlas y cuantificarlas, se hace uso de instrumentos como son las cámaras de ionización. Las magnitudes de influencia son aquellas que no son objeto de la medida pero influyen en la magnitud a medir, como es el caso de la presión, la humedad o la temperatura. Debido a estas, las cámaras de ionización pueden presentar efectos que deben evaluarse y, si es necesario, corregir las medidas que proporcionan. El efecto que provocan los cambios de presión y temperatura en los instrumentos de medida son comúnmente corregidos empleando un factor de corrección, pero la influencia de la humedad relativa en el aire no suele considerarse si se encuentra entre el 20 y el 80%.

En este trabajo se ha analizado el posible efecto que presenta la humedad relativa en las medidas de dosis de haces de radiación. Esto se ha llevado a cabo tanto de manera experimental haciendo uso de un montaje sencillo, empleando distintas cámaras de ionización, variando el porcentaje de humedad relativa del aire y anotando medidas de dosis absorbidas, como computacionalmente con técnicas Monte Carlo, empleando el código PENELOPE, escrito en FORTRAN, y varios paquetes de subrutinas de este. Este último estudio constaba de dos partes una en la que se replicó el experimento y otra incluyendo algunos cambios para analizar posibles efectos.

Las representaciones de los resultados experimentales y computacionales de las medidas de dosis obtenidas normalizadas para una humedad relativa del 50%, frente a los valores de humedad relativa correspondientes, han mostrado el efecto de la humedad relativa sobre la dosis de radiación empleando radioisótopos usados comúnmente en clínica. Con respecto al cambio de fuente de radiación y al aumento de la distancia fuente-volumen sensible de la cámara, las representaciones han sido similares.

ÍNDICE

1. Introducción	5
2. Materiales y Métodos	6
2.1. Estudio experimental	6
2.1.1. Montaje y diseño experimental	7
2.1.2. Realización del experimento y análisis de resultados	12
2.2 Estudio computacional	14
2.2.1. Diseño computacional	15
2.2.2. Realización de las simulaciones y análisis de resultados	21
3. Resultados	22
4. Discusión	26
5. Conclusiones	28
Referencias	28

1. INTRODUCCIÓN

La dosimetría física de las radiaciones ionizantes es la encargada de medir la dosis absorbida en un material o tejido como consecuencia de su exposición a las radiaciones ionizantes presentes en un campo de radiación. En el área clínica las radiaciones se emplean tanto para técnicas de diagnóstico como de terapia. Es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectar y cuantificar la radiación ionizante en estos casos, de manera que permita establecer diagnósticos adecuados y la planificación de tratamientos óptimos.

En la dosimetría de la radiación, particularmente en el área de radioterapia, los instrumentos más empleados para determinar la dosis absorbida impartida al paciente son las cámaras de ionización abiertas al aire. Las cámaras utilizadas en radioterapia de haces externos deben proporcionar con gran exactitud la dosis absorbida en un punto y su diseño está encaminado a la consecución de este objetivo.

Cuando se trabaja con instrumentos de medida de radiación, el concepto de magnitudes de influencia cobra un peso importante. Pueden definirse como aquellas que no son objeto de la medida pero influyen en la magnitud a medir. Las magnitudes de influencia pueden ser de diferente naturaleza, como presión y temperatura; pueden provenir del dosímetro o pueden ser magnitudes relacionadas con el campo de radiación. A causa de estas, las cámaras de ionización presentan algunas características inherentes que dan lugar a efectos que se deben conocer y evaluar, y, si es necesario, corregir con ellos las medidas efectuadas. Este es el caso para las correcciones por temperatura, presión y humedad, que pueden presentar una influencia considerable en las mediciones [1].

Los protocolos internacionales de dosimetría exigen que las mediciones que se realicen con un sistema de ionización ventilado deben corregirse por la influencia de la densidad del aire, utilizando el factor de corrección estándar de temperatura-presión, ya que estas dos magnitudes producen un efecto muy significativo en las medidas de dosis [2,3].

Por otro lado el efecto de la humedad en el aire es comúnmente ignorado, siempre que la humedad relativa esté entre los límites del 20% y el 80%. Sin embargo hay pocas publicaciones sobre la influencia de la humedad [4]. Malcom R. McEwen, quien usó una fuente de radiación de ^{60}Co para examinar el efecto de la humedad en varias cámaras de ionización tipo Farmer, y obtuvo que la humedad no producía efectos significativos en las lecturas de las distintas cámaras empleadas.

En otro estudio, Yuuki Sato et. al. [5], midieron la corrección por humedad de cámaras de ionización tipo Farmer para haces de fotones de alta energía, y determinaron los valores de la energía media requerida para crear un par iónico en

aire usando el cálculo de la energía de deposición en el aire húmedo mediante Monte Carlo, basándose en los resultados obtenidos por un estudio computacional de Niatel [6], en el que ya la corrección por humedad se rechazaba con una incertidumbre de dosis de 0.15%, para una humedad relativa entre el 20 y el 80%.

Otro aspecto importante se observa en el estudio realizado por Yuichi Kato, et. al. [7], que demuestran la necesidad de esperar un tiempo, el cual es llamado tiempo de equilibrio, hasta que se estabilicen la temperatura, presión y humedad para realizar las mediciones precisas debido a la variación de las condiciones atmosféricas.

En este trabajo, partimos de la posible influencia de la humedad relativa en las medidas de dosis de haces de radiación, obtenidas al emplear cámaras de ionización abiertas al aire. El objetivo es comprobar la variación que se produce en la lectura de las mediciones de dosis efectuadas en función de la humedad relativa, utilizando haces de radiación emitidos por radioisótopos, tanto computacional como experimentalmente, en varias cámaras de ionización. Además de estudiar cómo influye la variación de la energía de la fuente y la distancia de la fuente con respecto al volumen sensible de la cámara.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La elaboración de este estudio tiene dos partes: Por un lado, un estudio experimental, el cual se ha llevado a cabo para tres cámaras de ionización, que se detallarán más adelante, en el que se ha analizado el efecto de la humedad sobre las medidas de dosis obtenidas. Y por otro, un estudio computacional de las mismas tres cámaras, en el que se observará también el efecto que tiene la humedad en la dosis, y que nos permitirá contrastar resultados computacionales con experimentales para estas.

Se analizarán además, posibles efectos que puede producir la variación de la humedad relativa en las medidas de la dosis, usando fuentes de radiación monoenergéticas, y cambiando la distancia de la cámara con respecto a la fuente.

2.1. ESTUDIO EXPERIMENTAL

En primer lugar se detallará el montaje y diseño experimental que se ha empleado, y en segundo lugar se explicará el modo en el que se ha realizado el experimento y el análisis de los resultados obtenidos mediante este.

2.1.1. Montaje y diseño experimental

El estudio experimental se llevó a cabo en el Hospital Clínico San Cecilio (Granada), donde se emplearon tres cámaras de ionización de uso clínico para analizar el efecto que presentaba la humedad en sus medidas.

El material básico que fue necesario para realizar el análisis de las tres cámaras puede observarse en la figura 1. Consistía primeramente en una cubeta cilíndrica de PMMA, con un diámetro de base 21 cm y una altura de 19.5 cm (figura 1(b)), la cual se aislaba del exterior mediante una tapa cuyas dimensiones eran 30 cm x 30 cm x 0.5 cm. En su interior se colocó posteriormente la cámara de ionización y la fuente de radiación objeto de estudio de cada experimento (figura 1(a) ejemplo para el caso del estudio mediante la cámara plano-paralela).

A su vez, la cámara de ionización se conectaba a un electrómetro Dose 1 de Iba Dosimetry exterior (figura 1(c)) que proporcionaba las medidas empleadas para realizar el cálculo de dosis (carga medida (nC)).

Los valores de temperatura, presión y humedad eran tomados a través de un barómetro y termohigrómetro PCE THB 40 que también se posicionó dentro de la cubeta (figura 1(a)). Por último, se introdujo un humidificador conectado a un teléfono móvil que era el encargado de ir proporcionando vapor de agua de forma remota para variar el porcentaje de humedad relativa.

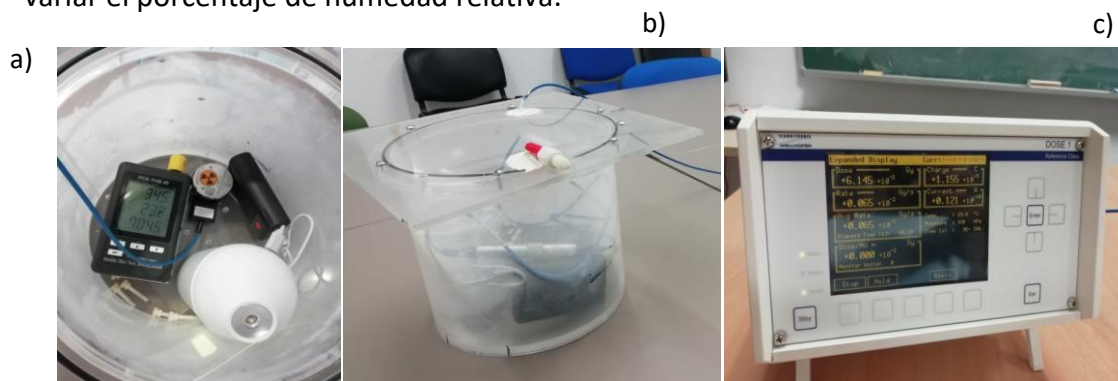


Figura 1: Esquema del montaje experimental general empleado: a) barómetro y termohigrómetro (izquierda), cámara y fuente de radiación, ejemplo de la cámara plano-paralela (centro), y humidificador y batería portátil (derecha), b) cubeta de plástico y c) electrómetro.

Las tres cámaras empleadas en el estudio experimental se encuentran detalladas en la tabla 1 [8]. En ella se indican principalmente los materiales, junto con su densidad, y las dimensiones de los elementos más característicos.

CÁMARA IONIZACIÓN	MATERIAL CÁMARA	VOLUMEN EFECTIVO	MATERIAL ELECTRODO	RADIO O GROSOR DEL ELECTRODO
PTW Type 23344 Soft X-Ray	PMMA (1.19 g/cm ³)	0.3 cm ³	Grafito (1.18 g/cm ³)	0.65 cm
PTW Farmer Chamber Type 23333	Aluminio (2.7 g/cm ³)	0.6 cm ³	Aluminio (2.7 g/cm ³)	0.045 cm
PTW Source Check 4pi 33005	Aluminio (2.82 g/cm ³)	116 cm ³	Aluminio (2.7 g/cm ³)	0.05 cm

Tabla 1: Características principales de las cámaras de ionización empleadas [8].

La PTW Type 23344 Soft X-Ray es una cámara de ionización plano-paralela (figura 2). La superficie externa que comunica el volumen sensible con el aire del exterior es una lámina muy fina de polietileno. Posee también un electrodo interno de grafito tras el volumen sensible de aire. Para colocar la fuente de radiación fue necesario el uso de una caja de PMMA que cubriera la cámara dejando al aire la superficie sensible circular (figura 2(b)), y además se posicionó la cámara sobre una superficie rectangular de 1.8 cm de altura de PMMA dentro de la cubeta.



Figura 2: Cámara de ionización PTW Type 23344 Soft X-Ray [8]. A la derecha puede verse con el alojamiento para colocar la fuente de ⁹⁰Sr.

La cámara PTW Farmer Chamber Type 23333 es el modelo antiguo de la actual Type 30001 (figura 3). Se trata de una cámara cilíndrica, y sus características se recogen en la tabla 1. Está compuesta principalmente de aluminio, pero el volumen sensible de esta está recubierto por grafito y PMMA.



Figura 3: Cámara de ionización PTW Farmer Chamber Type 23333 [8].

El montaje experimental que se empleó con esta cámara es similar al que se presenta en la figura 1, con la salvedad del cambio de cámara y de fuente por las que aparecen en las figuras 3 y 8, respectivamente. En este caso no fue necesaria la superficie rectangular de PMMA para colocar la cámara, ya que esta se introducía dentro del contenedor amarillo de la fuente (figura 4).



Figura 4: Montaje experimental empleado para cámara PTW Farmer Chamber Type 23333.

La última cámara empleada resultó ser PTW Source Check 4Pi 33005, se trata de una cámara de ionización de tipo pozo, empleada normalmente en braquiterapia (figura 5). Su interior está compuesto por varias láminas cilíndricas, dos de aluminio (2.7 g/cm^3), una de ellas es el electrodo, y otra lámina de poliestireno (1.04 g/cm^3), separadas entre ellas por aire. La fuente en esta cámara, que se trata de semillas en un tubo de PMMA como se detallará en la sección de fuentes, se introduce por arriba por el hueco que aparece en la figura 5.



Figura 5: Cámara de ionización PTW Source Check 4Pi 33005 [8].

El montaje experimental fue semejante al de las dos cámaras anteriores, pero la colocación en el interior de la cubeta de plástico difirió por motivos de dimensiones (figura 6).

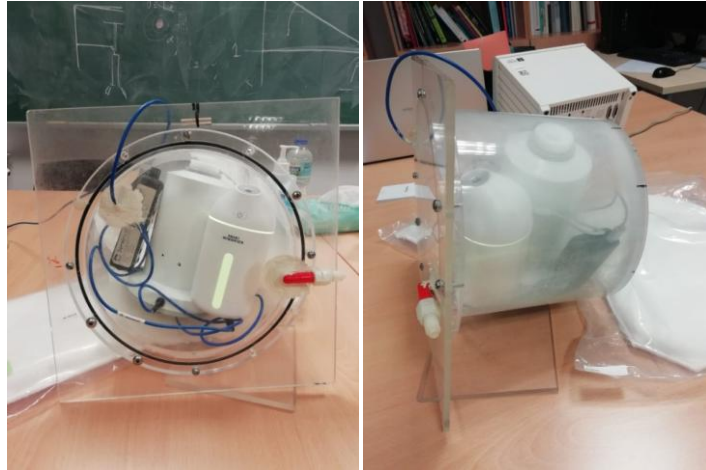


Figura 6: Montaje experimental empleado para cámara PTW Source Check 4Pi 33005.

Con respecto a las fuentes de radiación empleadas, consistieron en dos radioisótopos distintos. Uno fue ^{90}Sr , cuyo periodo de semidesintegración es de 20.8 años y que se desintegra a ^{90}Y mediante desintegración β^- , el cual tiene un periodo de semidesintegración de 2.6684 días; y otro ^{125}I que emite rayos X y gamma, y cuya vida media es de 59.41 días. Para la cámara cilíndrica y plano-paralela se empleó ^{90}Sr , pero en contenedores con distinto diseño, ^{90}Sr Type 48012 y ^{90}Sr Type 48010, respectivamente, y para la cámara pozo una fuente de ^{125}I en forma de semillas. Las fuentes activas de radiación empleadas aparecen detalladas en la tabla 2 y se analizarán en profundidad más adelante.

FUENTES DE RADIACIÓN	MATERIAL CONTENEDOR	MATERIAL ACTIVO DE LA FUENTE	RADIO ACTIVO DE LA FUENTE	ESPESOR DE LA FUENTE ACTIVA
^{90}Sr Type 48010	Latón	Grafito (1.18 g/cm ³)	0.15 cm	0.05 cm
^{90}Sr Type 48012	Latón	Grafito (1.18 g/cm ³)	0.05 cm	1.4 cm
IsoSeed ^{125}I .s17plus	Titanio	I ¹²⁵ Ag (10.49 g/cm ³)	0.0255 cm	0.45 cm

Tabla 2: Características principales de las fuentes de radiación empleadas [8].

La fuente ^{90}Sr Type 48010 se empleó junto con la cámara PTW Type 23344 Soft X-Ray. Es una fuente radiactiva de ^{90}Sr con una actividad de 33 MBq y fecha de fabricación del año 1992. La fuente que se incluyó en el experimento se presenta en la figura 7. Concretamente la fuente activa es un cilindro de muy poco espesor (zona coloreada de rojo), se encuentra dentro de un volumen de alúmina (zona blanca), y a su vez se encuentra dentro de una volumen mayor de latón (zona rayada) (figura 7(b)).

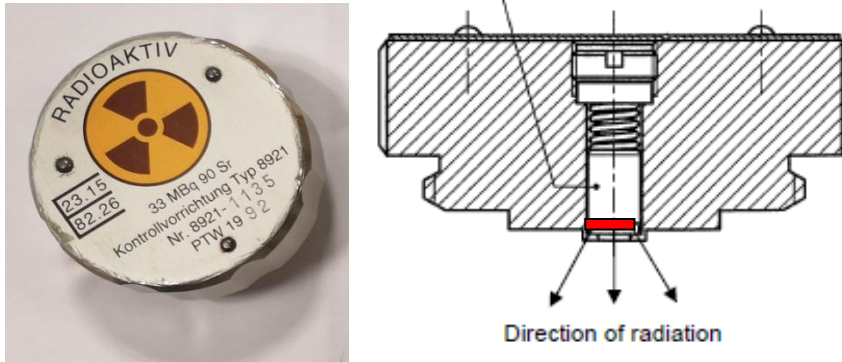


Figura 7: Fuente radiactiva T48010 [8].

La fuente ^{90}Sr Type 48012 se utilizó con la cámara PTW Farmer Chamber Type 23333. Esta fuente es análoga a la ^{90}Sr Type 48010, su actividad inicial es 35 MBq y fecha de fabricación 1993, pero se encontraba en un contenedor de latón, por lo que presentaba diferencias debido a la semejanza de su geometría (figura 8), con respecto a la de la figura 7.

La fuente activa consistía en una lámina cilíndrica muy fina (zona roja) rellena de aire (zona blanca), entre la que se encontraba la punta con el electrodo y el volumen sensible de la cámara cilíndrica y que además, estaba rodeada de otra lámina cilíndrica de mayor grosor de titanio (zona sombreada oscura), y esta a su vez se encontraba dentro del contenedor de latón (zona rayada), contenedor amarillo de la figura 8(a), a excepción de la tapa, el termómetro y el tubo de plástico blanco, cuyo hueco sustituiría la cámara de ionización como se observaba en la figura 4.

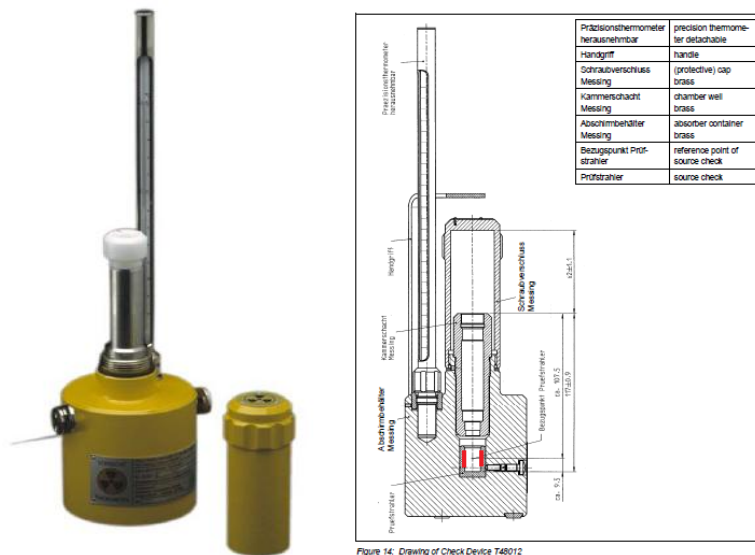


Figura 8: Fuente radiactiva T48012 [8].

En último lugar, la fuente de radiación IsoSeed ^{125}I .s17plus consistía en un tipo de semillas con uso clínico en braquiterapia de cáncer de próstata, que se emplearon con la cámara PTW Source Check 4Pi 33005, concretamente diez semillas de 4.5 mm de

longitud y 0.8 mm de grosor cada una (figura 9(a)), posicionadas en columna una encima de otra, formando un hilo de 4.5 cm de fuente radiactiva dentro de un alojamiento de PMMA que se insertó en la cámara de ionización (figura 9(b)). Las semillas eran fuentes radiactivas selladas que consistían en una barra de forma cilíndrica revestida de ^{125}I (zona rectangular negra) y encapsulada en titanio.



Figura 9: a) Fuente radiactiva IsoSeed ^{125}I .s17plus [8] y b) alojamiento de PMMA.

2.1.2. Realización del experimento y análisis de resultados

Para la realización del estudio con cada uno de los tres diseños experimentales mostrados anteriormente, se llevó a cabo el mismo procedimiento. Una vez conectada la cámara al electrómetro y la cubeta cerrada herméticamente, se toman medidas de carga (nC). El voltaje que se empleó fue de 400 V, y se realizaban medidas de 200 s.

La toma de medidas consistió en ir variando la humedad relativa del interior de la cubeta proporcionándole vapor de agua con el humidificador en control remoto. El tiempo de equilibrio que se estableció tras cada suministro de vapor de agua con el humidificador, fue de 30 min. Esta variación de humedad se realizó de forma creciente para evitar un posible efecto de histéresis. Los valores de humedad relativa que se tomaron con cada cámara resultaron ser diferentes. En el caso de la cámara plano-paralela, los porcentajes de humedad analizados fueron: 35.8, 44.5, 50.0, 55.2, 61.2, 69.3 y 78.2. Para la cámara cilíndrica: 41.7, 50.6, 61.3, 68.0, 74.6 y 85.5. Y para la cámara pozo: 38.8, 44.43, 50.0, 55.23, 61.2, 69.37 y 78.2. Para cada uno de estos valores de humedad relativa, en el caso de la cámara PTW Type 23344 Soft X-Ray y PTW Farmer Chamber Type 23333, se midió la carga, la presión, la temperatura y la humedad relativa tres veces, y cinco para la cámara PTW Source Check 4Pi 33005, y seguidamente se realizó una media aritmética de cada magnitud de influencia y de la carga para el posterior cálculo de la dosis absorbida y de la normalización al 50% de humedad relativa representada gráficamente.

La relación entre la carga obtenida y la dosis absorbida viene dada por la expresión [9]:

$$D = M_{cámara} \cdot f(p, T) \cdot k_s \cdot k_p \cdot M_D \quad (1)$$

donde M_D es el factor de calibración (Gy/C), k_p es el factor de polarización, k_s es el factor de saturación de voltaje, $f(p, T)$ es el factor de corrección por temperatura y presión, y $M_{cámara}$ es la medida de carga que se toma de la lectura del electrómetro. En este caso no se va a considerar efecto de recombinación [5], por lo que $Gy \equiv C$, y los términos k_s y k_p que permanecen constantes. Por lo que pueden agruparse en un término constante que luego se va con la normalización, de modo que para la cámara cilíndrica y plano-paralela, la medida de dosis es:

$$D = f(p, T) \cdot M_{cámara} \cdot cte \quad (2)$$

El factor de corrección por temperatura y presión en los análisis de las tres cámaras de ionización [10] sigue la expresión (3),

$$f(p, T) = \frac{(273.2 + T) \cdot P_0}{(273.2 + T_0) \cdot P} = \frac{273.15 + T}{293.15} \cdot \frac{760}{P} \quad (3)$$

donde consideramos $T_0 = 20^\circ C$ y $P_0 = 760$ mmHg, y $T(^{\circ}C)$ y P (mmHg) son la temperatura y presión, respectivamente, que se tomaron junto con cada valor de carga medida.

En la cámara pozo, se incluyó además un factor de dependencia con la densidad del aire [11]:

$$g(\rho) = \left[A \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

donde A vale -0.476 ± 0.003 , ρ es la densidad del aire en cada medida y ρ_0 es la densidad del aire a $20^\circ C$ y 760 mmHg. Por lo que la expresión del cálculo de dosis para esta viene dada por la expresión (5).

$$D = g(\rho) \cdot f(p, T) \cdot M_{cámara} \cdot cte \quad (5)$$

También se llevó a cabo un cálculo de incertidumbres, pero para ello se debían de hacer varias consideraciones. La incertidumbre asociada a la medida constaba de dos tipos, incertidumbre estadística (tipo A) e incertidumbre instrumental (tipo B) [1]. La primera viene dada por la expresión (7):

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (6)$$

$$u_A = \sqrt{s^2(\bar{q})} \quad (7)$$

la cual proviene del cálculo de la media a partir de los valores de carga obtenidos para cada valor de la humedad relativa, y donde s es la incertidumbre de la medida para cada valor de q (carga) obtenido, y n el número de medidas.

La segunda incertidumbre está compuesta por dos factores, el asociado al certificado de calibración y al propio instrumento. La del propio instrumento se obtuvo del utensilio empleado para la toma de valores de la presión, temperatura y humedad relativa durante el experimento, obteniéndose:

$$u_{\text{barómetro}} = 0.1 \text{ mmHg}, \quad u_{\text{higrómetro}} = 0.1\%, \quad u_{\text{termómetro}} = 0.1 \text{ °C}$$

Las asociadas a los certificados de calibración, como su nombre indica, se obtuvieron de los certificados del hospital donde constan las revisiones realizadas, en este caso de los aparatos de medida de magnitudes atmosféricas, en los cuales se recogen las medidas necesarias para la comprobación de su correcto funcionamiento y las calibraciones de los estos factores, siendo su expresión:

$$u_{\text{calibración}} = \frac{u_i}{k} \quad (8)$$

y obteniéndose para cada magnitud de influencia:

$$u_{\text{presión}} = 0.26 \text{ mmHg}, \quad u_{\text{humedad relativa}} = 0.65\%, \quad u_{\text{temperatura}} = 0.05 \text{ °C}$$

donde u_i es la incertidumbre del certificado de calibración y k es el factor de cobertura que se ha considerado igual a 2. De modo que, la incertidumbre tipo B se obtiene mediante la expresión:

$$u_B = \sqrt{u_{\text{calibración}}^2 + u_{\text{instrumento}}^2} \quad (9)$$

Finalmente, la incertidumbre asociada a la medida se obtiene mediante la expresión de propagación de incertidumbres clásica:

$$u_{A,B} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (10)$$

2.2. ESTUDIO COMPUTACIONAL

El estudio computacional que se llevó a cabo constaba de dos partes, una en la que se replicó el experimento y otra en la que se realizaron variaciones como el cambio de los radioisótopos por fuentes monoenergéticas o aumento de la distancia entre la fuente y la cámara. Las geometrías diseñadas para las simulaciones han sido las mismas en los dos estudios, con la excepción del estudio del cambio de posición de la fuente.

Del mismo modo que en el estudio experimental, este capítulo constará de dos secciones, diseño computacional, y realización de las simulaciones y análisis de sus resultados.

2.2.1. Diseño computacional

Para el estudio computacional de la influencia de la humedad en las cámaras de ionización se han empleado las técnicas Monte Carlo, que son procedimientos estadísticos que usan números aleatorios para resolver problemas. El código de simulación Monte Carlo que se ha empleado en este estudio ha sido PENELOPE, que es un paquete de subrutinas escritas en FORTRAN.

Estas subrutinas se usan como base en un programa principal que se construye por el usuario con el propósito de resolver o estudiar un problema específico. Sin embargo, este programa principal es normalmente bastante simple porque solo tiene que controlar la evolución de las historias generadas por PENELOPE y anotar las cantidades relevantes [12].

Para sistemas de materiales con geometrías cuádricas, puede usarse el paquete Pengeom el cual es un paquete de subrutinas que realiza las operaciones geometrías guiadas por un programa principal, el cual necesita que se definan los cuerpos, *bodys* o módulos, que forman el maniquí objeto de estudio, con sus correspondientes dimensiones y posiciones.

Este paquete es el que ha sido empleado para construir el diseño del montaje experimental que se utilizará en las simulaciones. En las figuras 10, 11 y 12, se presentan los diseños geométricos realizados para las tres cámaras de ionización empleadas en el estudio computacional.

Estas geometrías se han realizado a imagen y semejanza de los experimentos, con las dimensiones y características de los elementos y materiales que lo componen.

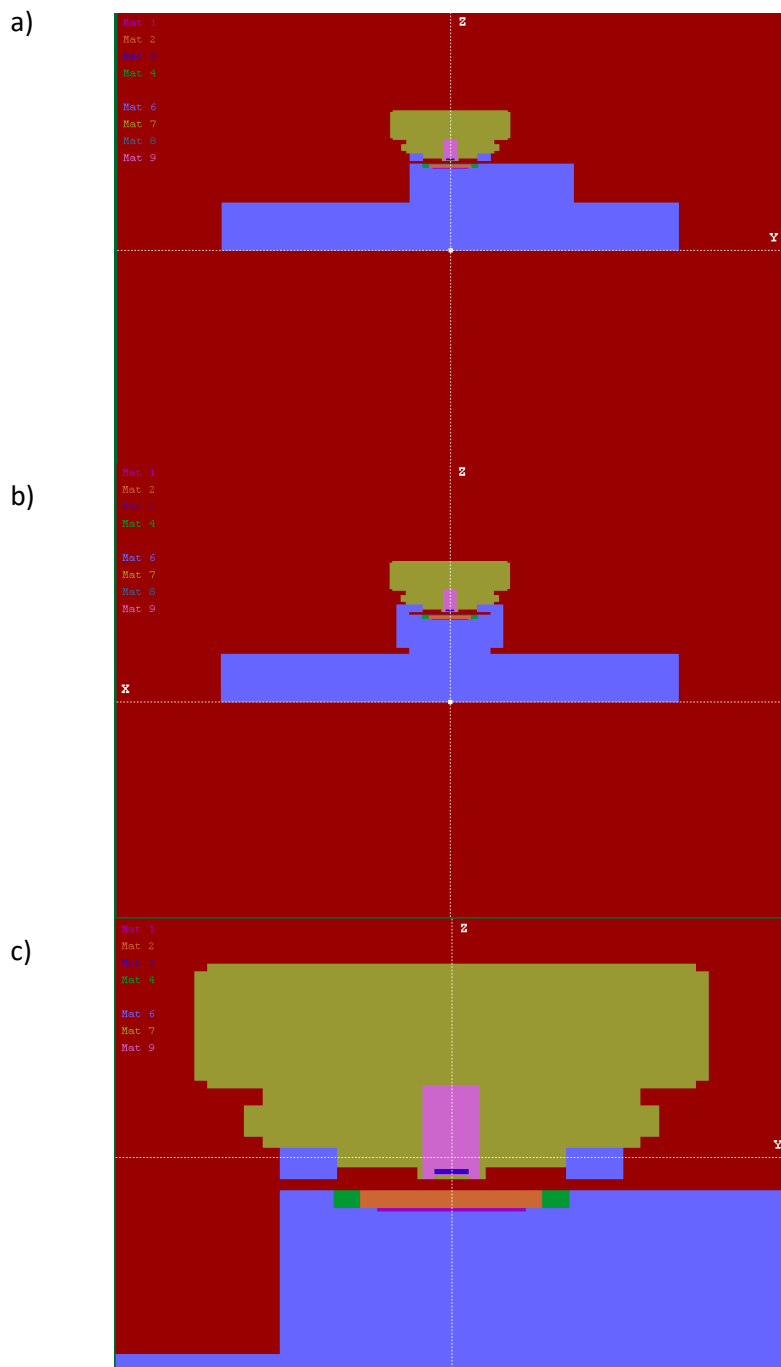


Figura 10: Cortes 2D de la geometría de la cámara plano-paralela diseñada con Pengeom: a) plano $X=0$, b) plano $Y=0$, c) ampliación del plano $X=0$.

En los planos X que aparecen ampliados (figuras 10(c), 11(c) y 12(b)), se observan de manera más detallada los componentes de la fuente y la cámara que se han descrito en el apartado experimental.

En la figura 10, en color azul claro se representa la base de PMMA y la cámara de ionización junto con la caja que la cubre parcialmente, en naranja aparece el espacio de volumen sensible lleno de aire, en verde el resto de aire de ese volumen y el electrodo de la cámara aparece en lila. Por otro lado, el contenedor de la fuente se

representa de color caqui y en su interior, en rosa, aparece el volumen de alúmina que contiene a la fuente activa $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, en una matriz de grafito. Rodeando todo el montaje se incluyó una esfera de aire, en color rojo.

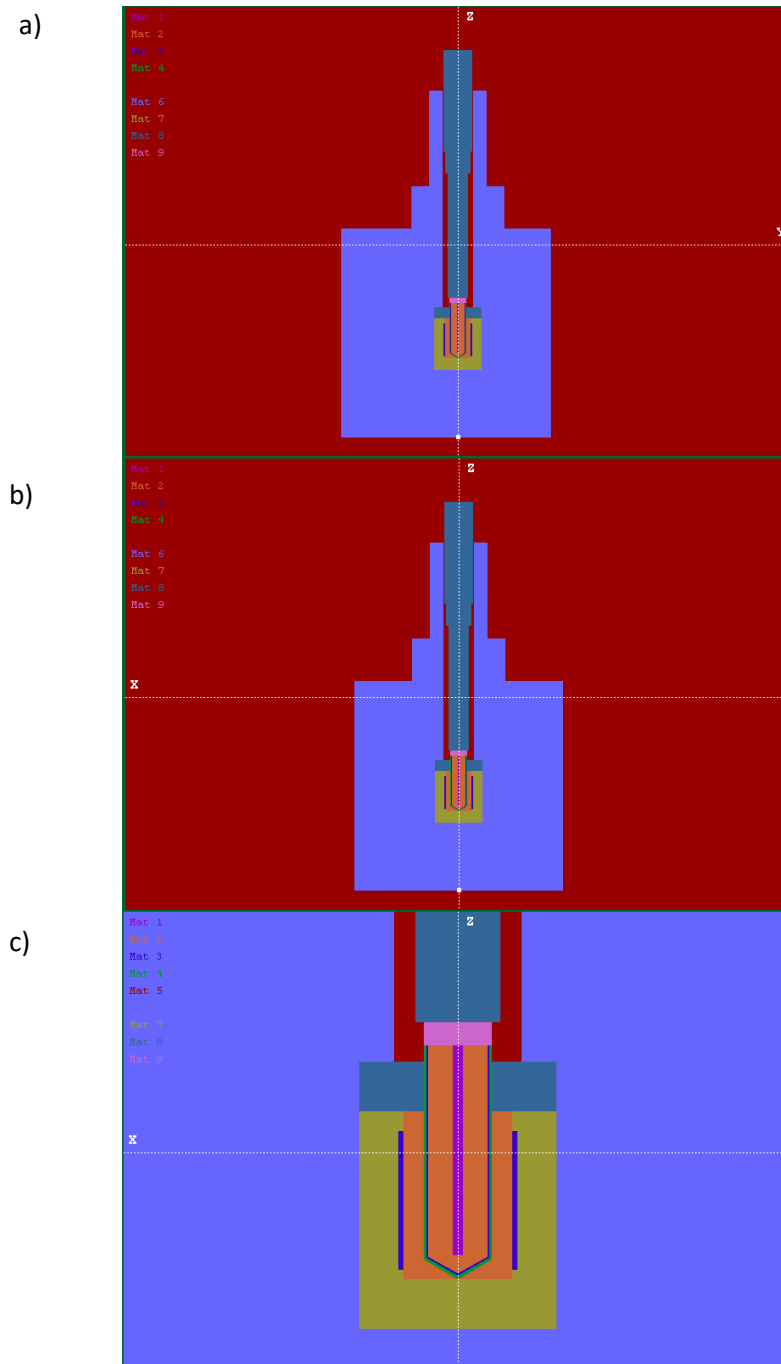


Figura 11: Cortes 2D de la geometría de la cámara cilíndrica diseñada con Pengeom: a) plano $X=0$, b) plano $Y=0$, c) ampliación del plano $Y=0$.

Con respecto a la cámara cilíndrica (figura 11), puede apreciarse en azul claro el contenedor de latón, en azul grisáceo la cámara de aluminio y una pequeña parte del interior del contenedor también, y en color caqui el volumen que recubre la fuente activa. El color rosa corresponde a un cierto espesor de la cámara de polietileno, en

verde aparece el recubrimiento exterior de la cámara de PMMA, seguido de otro recubrimimiento de grafito que aparece en color azul oscuro, al igual que el volumen activo de la fuente, y en lila se representa el electrodo de la cámara. En naranja se muestra el aire, correspondiente al hueco de la cámara y al volumen sensible de la cámara. De nuevo, el montaje experimental diseñado se incluye en una esfera de aire, que figura en rojo.

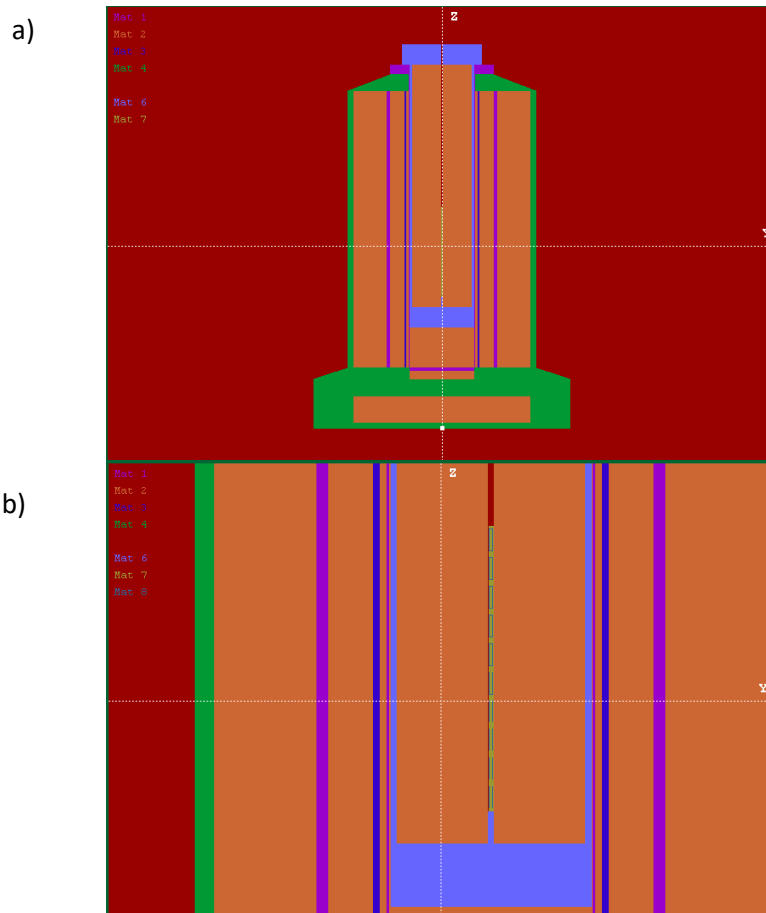


Figura 12: Cortes 2D de la geometría de la cámara plano-paralela diseñada con Pengeom: a) plano $X=0$ (similar al $Y=0$) y b) ampliación del plano $X=0$.

En la figura 12, en azul claro se observa el tubo de PMMA que contenía las semillas (parte de titanio de color caqui y azul grisáceo revestimiento para ^{125}I), en morado se representan las láminas cilíndricas de aluminio (2.70 g/cm^3), en azul oscuro las de poliestireno, en verde la lámina cilíndrica de aluminio (2.82 g/cm^3) y el pie de la cámara. Y por último el naranja y el rojo corresponden al aire.

PENELOPE lee la información requerida sobre cada material (que incluye tablas de propiedades físicas, secciones transversales de interacción, datos de relajación, etc.) de un archivo de datos de material de entrada. Para un conjunto de 280 materiales, el programa puede leer datos de su composición directamente del archivo. De manera alternativa, se pueden introducir los datos necesarios para generar y trabajar con otro material externo al archivo en respuesta a las indicaciones del programa [12]. Esto fue

indispensable en este estudio, ya que la cantidad de vapor de agua en aire difería conforme aumentaba la humedad, por lo que hubo que generar distintos materiales aire húmedos diferentes al aire ya definido en la base de datos.

En PENELOPE la construcción de un material requiere conocer el número relativo de átomos o saber las fracciones de peso de cada elemento dentro de ese material, además de la densidad del material en cuestión. Se ha optado por la opción de generar el material mediante la fracción de peso de los elementos, por lo que el cálculo de las fracciones de peso de cada elemento que compone el aire húmedo N , O , H , Ar y C , se realiza mediante el uso de los pesos atómicos y moleculares. Asumiendo que las moléculas que componen el aire seco son N_2 , O_2 , Ar y CO_2 , los valores estándar de sus fracciones de peso moleculares son:

$$x_{N_2} = 0.75523, \quad x_{O_2} = 0.23130, \quad x_{CO_2} = 0.00053, \quad x_{Ar} = 0.01288$$

Para el aire húmedo se asume una cierta cantidad de vapor de agua (dependiente del porcentaje de humedad relativa), además de los componentes ya mencionados, la cual vamos a considerar como la razón entre las masas de vapor de agua y aire seco $x_w = \frac{m_{wv}}{m_{da}}$. Las fracciones de peso moleculares son razones también de las masas del elemento correspondiente y la del aire seco. De este modo para el aire húmedo, a ciertas condiciones de temperatura, presión y humedad relativa dadas, se consideran para cada caso unas nuevas fracciones de peso moleculares presentes en el aire húmedo normalizando las del aire seco, que se calculan mediante las expresiones de la ecuación (11).

$$xx_w = \frac{x_w}{S}, \quad xx_{N_2} = \frac{x_{N_2}}{S}, \quad xx_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{S}, \quad xx_{CO_2} = \frac{x_{CO_2}}{S}, \quad xx_{Ar} = \frac{x_{Ar}}{S} \quad (11)$$

$$S = x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + x_{Ar} + x_w \quad (12)$$

A partir de estas, podemos obtener las fracciones de peso de cada elemento para los distintos aires húmedos en función de la cantidad de vapor de agua:

$$f_N = \frac{xx_{N_2}}{P_{N_2}} \cdot 2 \cdot P_N = xx_{N_2} \quad (13)$$

$$f_O = \frac{xx_{O_2}}{P_{O_2}} \cdot 2 + \frac{xx_{CO_2}}{P_{CO_2}} \cdot 2 + \frac{xx_w}{P_w} \cdot P_O \quad (14)$$

$$f_{Ar} = \frac{xx_{Ar}}{P_{Ar}} \cdot P_{Ar} = xx_{Ar} \quad (15)$$

$$f_C = \frac{xx_{CO_2}}{P_{CO_2}} \cdot P_C \quad (16)$$

$$f_H = \frac{xx_w}{P_w} \cdot P_H \quad (17)$$

Para conocer la fracción de peso molecular del vapor de agua hay que relacionar la razón de la masa de vapor de agua y la masa de aire seco con la humedad relativa (RH), la cual se define como la razón entre la presión del vapor de agua (p_{wv}) y la presión del vapor de agua en saturación (p_{wvs}), $RH = \frac{p_{wv}}{p_{wvs}}$. De modo que, asumiendo que el vapor de agua se comporta como un gas ideal en el aire húmedo, haciendo uso de la expresión de la fracción de peso molecular para el vapor de agua y la expresión de la humedad relativa, podemos escribir:

$$x_w = \frac{1}{\rho_{da}} \cdot \frac{RH \cdot p_{wvs} \cdot p_{wv}}{R \cdot T} \quad (18)$$

Donde R es la constante de los gases ideales, T la temperatura y ρ_{da} la densidad del aire seco. Ambas presiones se dan a unas condiciones de temperatura dadas. La presión de vapor de agua de saturación hemos afirmado que sigue la expresión de Buck (19) [13].

$$p_{wv} = 6.1121 \cdot \exp\left(\frac{(18.678 - \frac{T}{234.5}) \cdot T}{257.14 + T}\right), \quad T > 0^\circ C \quad (19)$$

De forma que mediante las expresiones (18) y (19), obtenemos la expresión de la densidad del aire húmedo (20), en términos de la razón de masa de vapor de agua y masa de aire seco, y de la densidad de aire seco.

$$\rho_h = \rho_{da} \cdot \frac{1 + x_w}{1 + 1.6075 \cdot x_w} \quad (20)$$

Conociendo la densidad del aire húmedo, las fracciones de peso de cada elemento y el contenido de humedad relativa, se generaron los distintos aires necesarios para realizar las simulaciones.

Para el desarrollo computacional del experimento, se empleó el paquete principal de PENELOPE, Penmain. Su funcionamiento se controla completamente desde el archivo de datos de entrada [12]. En modo predeterminado, Penmain asume que las partículas primarias de un tipo dado son emitidas desde un punto o una fuente, ya sea con energía fija o con un espectro de energía. La dirección inicial de las partículas primarias se muestrea uniformemente en un rango de ángulos sólidos que puede definirse de varias formas. El programa también puede simular fuentes radiactivas con un solo radioisótopo. Para estas fuentes, se debe proporcionar un archivo de entrada con información sobre el proceso de desintegración nuclear del radioisótopo en cuestión. El formato de este archivo de entrada empleado ha sido el compatible con Pennuc, el programa de PENELOPE que permite emplear los ficheros de datos que proporcionan información sobre los procesos de decaimiento nucleares (NUCLEIDE).

2.2.2. Realización de las simulaciones y análisis de resultados

En primer lugar, se simularon fuentes radiactivas para replicar el estudio experimental y comparar resultados. Los radioisótopos empleados en las simulaciones han sido ^{90}Sr , ^{90}Y y ^{125}I , cuyos archivos con la información requerida han sido obtenidos de la base de datos [14].

Es necesario indicar que se tuvo que separar en dos simulaciones el uso de la fuente de ^{90}Sr , es decir, se realizó una simulación con este radioisótopo y otra con el ^{90}Y , que era el elemento al que se desintegraba, ya que al realizar de manera computacional el experimento era la forma más directa de reproducir lo que ocurría en la realidad.

Con cada radioisótopo y su cámara correspondiente, se realizaron varias simulaciones cambiando el porcentaje de humedad relativa. Los valores de las humedades relativas escogidos son los mismos que se anotaron en el experimento, para poder realizar la comparación. Para la realización de este estudio computacional se han generado 10^9 historias en todas las simulaciones.

Tras las simulaciones realizadas mediante Penmain y, a través del archivo de salida de interés generado, que en este estudio fue 'penmain-res.dat', el cual proporcionaba información del número de partículas simuladas, los fotones, electrones y positrones absorbidos, la energía depositada en cada *body*, etc., se obtuvo la energía media depositada en el volumen sensible de cada cámara de ionización, para cada porcentaje de humedad; valor a partir del cual se calculó la dosis, aplicando su definición: energía depositada en un volumen partido por masa del volumen en cuestión [1]. Además, la simulación proporcionaba la incertidumbre asociada a la energía media, y haciendo uso de esta se realizó el cálculo de incertidumbre de la dosis empleando la expresión del cálculo de incertidumbres estándar. Con estos valores de la dosis absorbida en el volumen sensible de la cámara y los porcentajes de humedad relativa se estudió el posible efecto.

En este estudio se han realizado también varias simulaciones con fuentes monoenergéticas para analizar el efecto de la variación en energía en las distintas cámaras. En el caso de las cámaras de ionización plano-paralela y cilíndrica la energía empleada ha sido 1 MeV. La elección de este valor de energía se ha debido al rango de energía que presentaba la fuente de radiación que se empleaba en el experimento con estas dos cámaras (^{90}Sr e ^{90}Y). Con la cámara pozo, se ha estudiado la variación con el espectro de rayos X y gamma característico del ^{125}I . El decaimiento del ^{125}I es el resultado de la captura electrónica por la radiación de rayos X y radiación gamma con un rango de energía de hasta 35 keV. Los electrones emitidos durante este *decay* son absorbidos por la cápsula de titanio, por lo que no se tuvieron en cuenta.

En cuanto al estudio de la variación de la distancia de la fuente con respecto a la cámara que se examinó, se realizó para la cámara plano-paralela y la pozo. Para la primera la distancia era de 1.4 cm, y se aumentó hasta 2.4 cm. En el caso de la cámara pozo, se varió la altura a la que se colocaban las semillas, la primera de todas se encontraba a una altura de 6.5 cm con respecto a la base de la cámara, y se aumentó hasta 11 cm.

3. RESULTADOS

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos del estudio experimental (figura 13(a)).

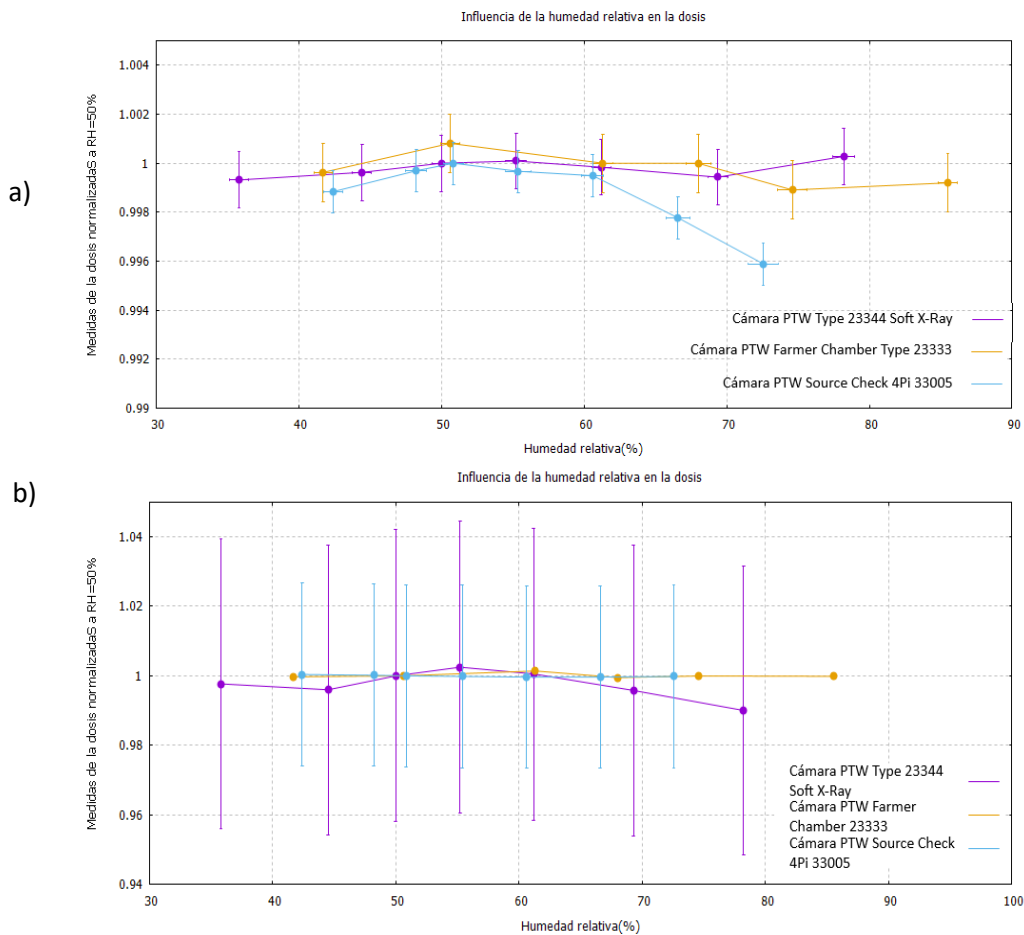


Figura 13: Influencia de la humedad relativa en la dosis de radiación obtenida de manera: a) Experimental y b) Computacional.

Se observa como difiere el efecto de la humedad relativa en cada cámara. Se representaron las medidas de las dosis normalizadas para una humedad relativa del 50% frente a los valores de humedad relativa correspondientes, además se calculó la incertidumbre asociada a la normalización. En la figura 13(b), se muestran los resultados obtenidos de la réplica computacional del experimento. Vemos de nuevo las diferencias de la influencia de la humedad relativa entre las tres cámaras. Del

mismo modo que para el análisis del estudio experimental, se han normalizado las dosis obtenidas a la dosis correspondiente para un 50% de humedad relativa en cada caso.

La cuestión de principal interés era observar las similitudes entre las simulaciones de la réplica del experimento realizadas para cada cámara y lo obtenido mediante el propio experimento. En la figura 14, se contrastan los resultados obtenidos del experimento y las simulaciones para cada cámara de ionización.

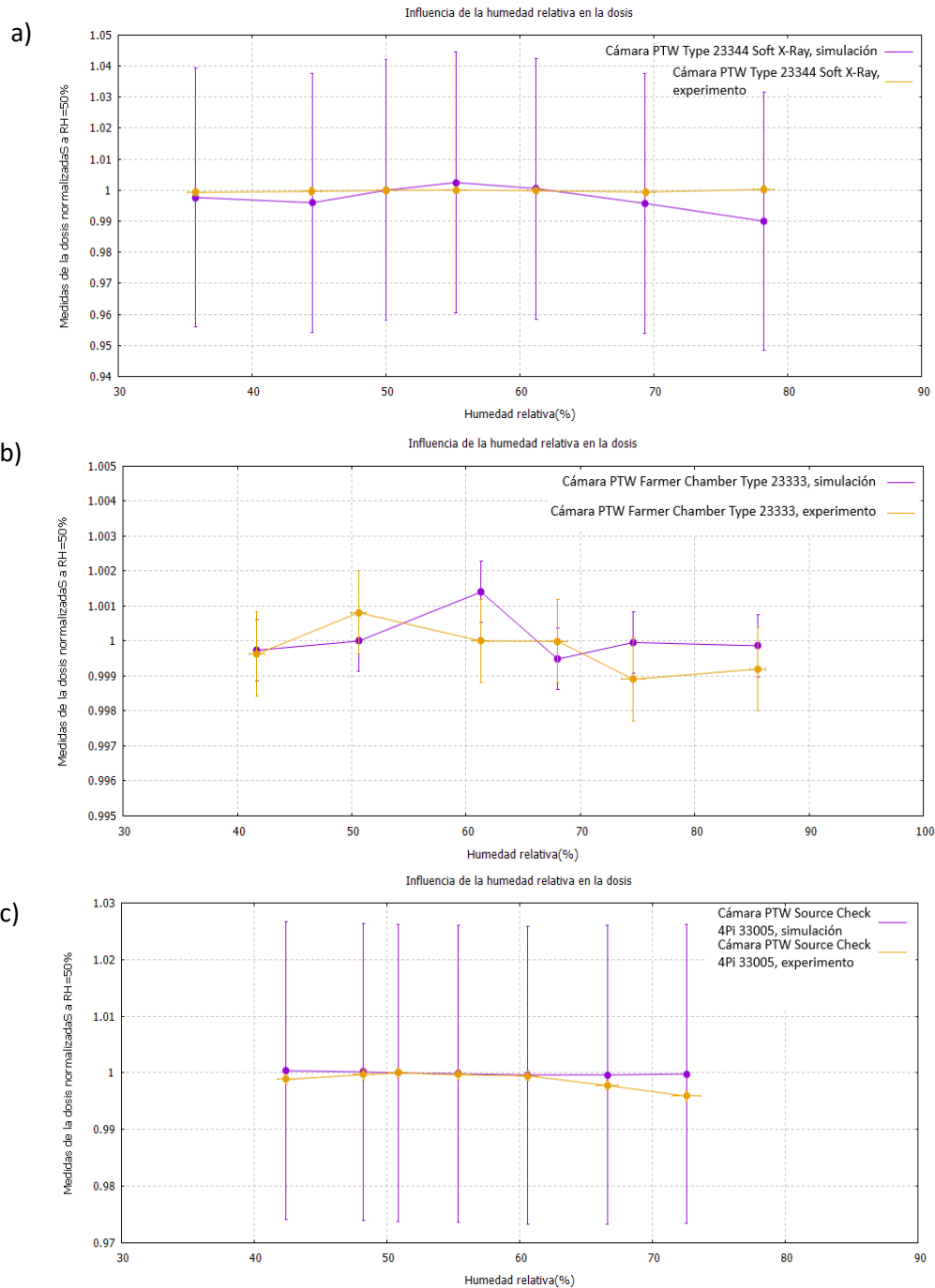


Figura 14: Comparación de la influencia de la humedad relativa en la dosis de radiación obtenida de manera experimental y computacional para: a) Cámara plano-paralela, b) Cámara cilíndrica y c) Cámara pozo.

Además del análisis realizado con respecto a la experiencia, resultó de interés realizar algunas variaciones en los estudios computacionales para las cámaras de ionización empleadas, como el incluir una fuente monoenergética en lugar del radioisótopo y aumentar la distancia de la fuente con respecto al volumen sensible.

En primer lugar se cambió la fuente de ^{90}Sr empleada para la cámara plano-paralela, por una fuente monoenergética de 1 MeV, y se observaron las diferencias que presentaban (figura 15(a))

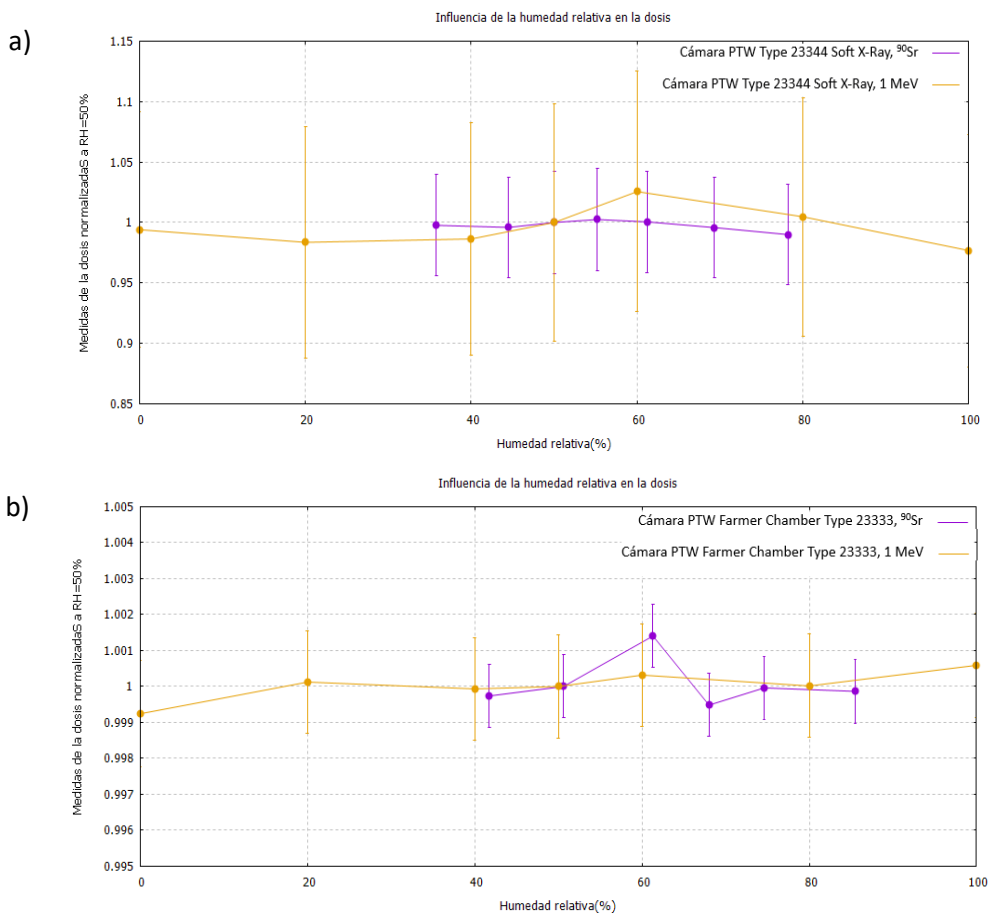


Figura 15: Comparación del efecto de la humedad relativa sobre la dosis de radiación empleando una fuente monoenergética (1MeV) y un radioisótopo ^{90}Sr : a) Cámara plano-paralela y b) Cámara cilíndrica.

Esta misma comparación se llevó a cabo también con la cámara cilíndrica (figura 15(b)). Ambas gráficas se encuentran normalizadas a una humedad relativa del 50%.

Para la cámara pozo, en lugar de emplear una fuente monoenergética de 1 MeV, se incluyó el espectro de energías de los rayos X y gamma del ^{125}I , y de nuevo se comparó con el efecto obtenido con esta fuente (figura 16).

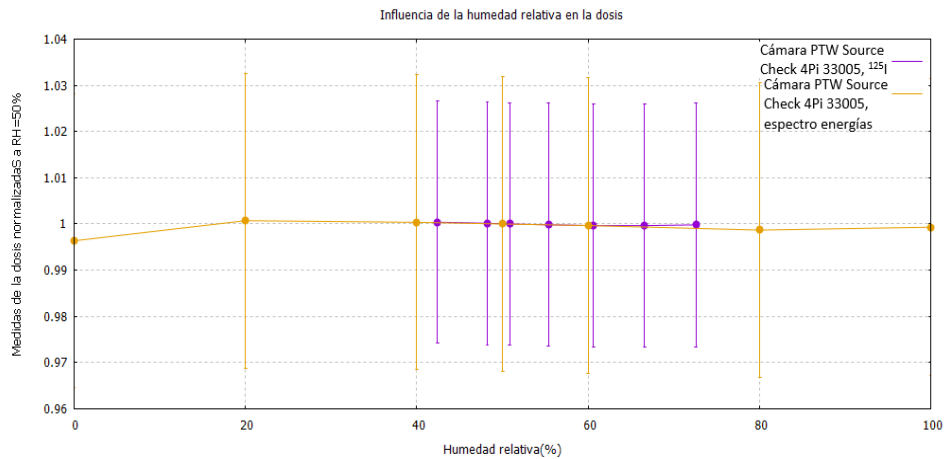


Figura 16: Comparación del efecto obtenido de la humedad relativa sobre la dosis de radiación en la cámara pozo, empleando el espectro de energías del ^{125}I y el propio radioisótopo.

Otra de las variaciones que se realizó para ver el posible efecto que podía haber, fue aumentar la distancia de la fuente con respecto al volumen sensible. Esto se llevó a cabo con la cámara plano-paralela, como ya se comentó, aumentando la distancia a 2.4 cm (figura 17).

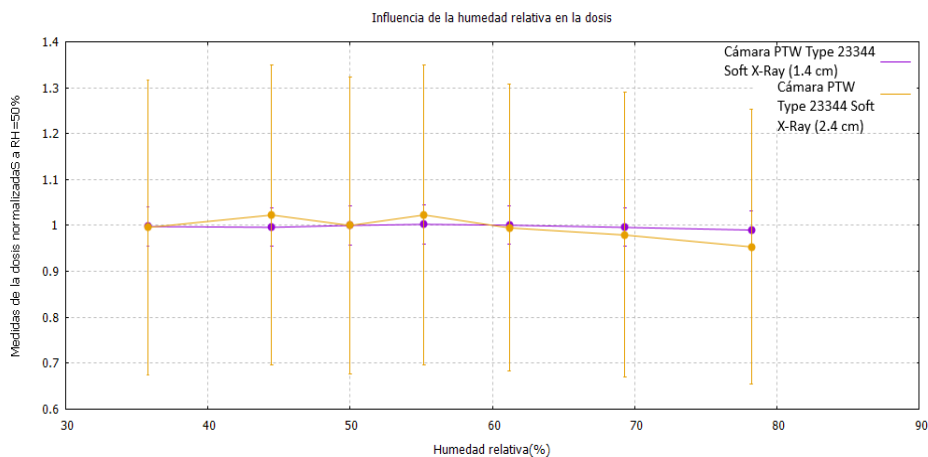


Figura 17: Diferencia de la dosis de radiación obtenida tras aumentar la distancia de la fuente con respecto al volumen sensible en la cámara plano-paralela.

Algo similar se estudió con la cámara pozo, en este caso la distancia que se aumentó no fue la de la fuente con respecto al volumen sensible, ya que las dimensiones de la propia cámara no lo permitirían, por lo que no sería de utilidad analizar esto, pero sí se posicionaron las semillas a una altura superior, pasando de estar a 6.5 cm de la base (la primera) a 11 cm y se estudió la diferencia (figura 18). De nuevo se representan las figuras normalizadas a una humedad relativa del 50%.

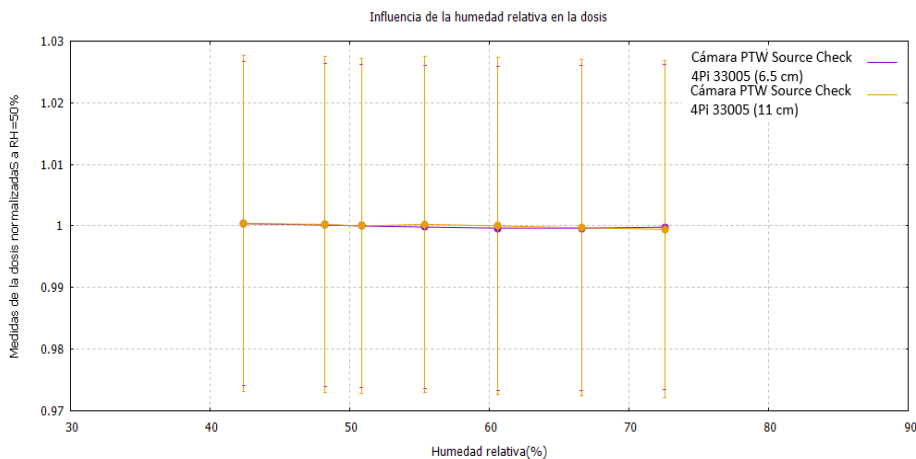


Figura 18: Diferencia de la dosis de radiación obtenida tras aumentar la distancia de la fuente con respecto a la base de la cámara de ionización tipo pozo.

4. DISCUSIÓN

Tras la realización del experimento, se ha comprobado que hay una influencia de la humedad relativa en las medidas de dosis de radiación, pero que es pequeña, apenas un 0.25% de variación incluyendo incertidumbres en el mayor de los casos y a humedades relativas elevadas (figura 13(a)). Comparando la experiencia de unas cámaras con otras, se observa que la cámara empleada en braquiterapia sufre un efecto algo más notorio que las otras dos conforme aumenta la humedad relativa. El rango de humedades relativas entre el cual se asemeja más la dosis para las tres cámaras sería entre el 45 – 60%.

Atendiendo a las simulaciones realizadas (figura 13(b)), el porcentaje que se obtiene con respecto a la influencia de la humedad relativa en la dosis es ligeramente mayor, 1%, sin incluir las incertidumbres. De nuevo puede deducirse que entre el 45 – 65% de humedad relativa, las simulaciones se ajustan de manera muy similar a los datos experimentales. Valores por encima y por debajo de estos presentan mayores diferencias.

Estudiando lo obtenido para cada cámara de ionización, tanto en la simulación como en el experimento, se observa que difieren en un porcentaje muy pequeño, sin embargo se encuentran dentro del margen de incertidumbre en los tres casos (figura 14). Los resultados obtenidos al emplear la cámara de ionización cilíndrica son los que más se asemejan en la comparación.

Con la fuente monoenergética de 1 MeV empleada para la cámara plano-paralela, los valores obtenidos presentan variaciones más pronunciadas de unos porcentajes contiguos a otros y además difieren en cuanto a la tendencia que se obtiene al emplear ^{90}Sr (figura 15(a)). Para la cámara cilíndrica ocurre lo contrario, los valores de

1MeV presentan valores normalizados análogos (figura 15(b)). Esto puede deberse a que la variación de energías que se produce al usar el radioisótopo provoca un efecto diferente según el tipo de cámara empleada.

En relación a lo obtenido con el espectro de rayos X y gamma del radioisótopo ^{125}I , se observa que los valores son semejantes, algo que es razonable ya que al emplear el radioisótopo los valores que se dan son los de su espectro de energías (figura 16).

Analizando los resultados al aumentar 1 mm la distancia de la fuente con respecto al volumen sensible en la simulación en la que se hace uso de la cámara plano-paralela (figura 17), se observa que el efecto que presenta la humedad relativa sobre las medidas efectuadas es más notorio, es decir, hay una mayor variación de las medidas de dosis que con respecto a lo obtenido con la simulación donde la distancia era un centímetro más pequeña. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la variación es bastante pequeña, del orden de 2.5%.

Con respecto al aumento de distancia de la fuente a la base en las semillas para la cámara pozo la variación de las medidas de dosis se asemeja más que en el caso anterior (figura 18).

En cuanto a las incertidumbres que se representan mediante barras en las figuras correspondientes a lo obtenido con simulaciones, han resultado ser mayores que las obtenidas con el experimento, algo que podría atribuirse a la dependencia con el número de historias simuladas, pero en este estudio el número de historias simuladas ha resultado ser un número significativo, 10^9 . Sin embargo, hay que tener en cuenta que la incertidumbre (en este caso la asociada a la energía media) que proporciona la simulación mediante el código PENELOPE es 3σ , siendo σ la desviación típica, y mediante esta incertidumbre se ha aplicado el cálculo de incertidumbres estándar para hallar la incertidumbre asociada a la dosis absorbida. Por lo que si atendemos al valor de las incertidumbres obtenidas del orden de 0.001 en el peor de los casos, y partimos de que ese valor es 3 veces la desviación típica, obtenemos un valor de esta que estaría entorno al 1% del valor de la magnitud objeto de estudio, y por debajo de este 1% puede afirmarse que hay una buena estadística.

Un hecho interesante observado ha sido el obtener una mayor deposición de energía al emplear ^{90}Y en la simulación, que lo que se obtiene con ^{90}Sr . Esto es algo lógico ya que el valor de Q para este último radioisótopo es menor (545.9 keV) que para el ^{90}Y (2278.7 keV).

5. CONCLUSIONES

Con la experiencia se ha podido comprobar que el efecto de la humedad relativa sobre la dosis de radiación procedente de los radioisótopos empleados en clínica, es muy pequeño, por lo que las correcciones en cuanto a humedad podrían ser despreciables con una incertidumbre de dosis del 0.15%.

Mediante las simulaciones realizadas para recrear el experimento, se ha concluido que se obtienen resultados similares, dentro de sus incertidumbres.

El estudio del cambio de la fuente de radiación ha ejemplificado el efecto que tiene el incluir distintos valores de energía (dentro de un rango determinado) y el radioisótopo, que presenta diferencias.

Por último, el aumento de la distancia de la fuente con respecto al volumen sensible o altura desde la base de la cámara, ha permitido demostrar que con respecto de la influencia de la humedad produce una mayor variación en las medidas de la dosis.

REFERENCIAS

1. Fernández-Varea, J.M., Brosed, A., González Leitón, A.M. y Gracia Ezpeleta, A. (2012). *Fundamentos de Física Médica*. Volumen 1: Medida de la radiación. Sociedad Española de Física Médica.
2. Indra J. Das y Timothy C. Zhu. *Thermal and temporal response of ionization chambers in radiation dosimetry*. Medical Physics, Volumen 31, 573-578 (2004)
3. Rogers DWO y Ross CK. *The role of humidity and other correction factors in the AAPM TG-21 dosimetry protocol*. Medical Physics, Volumen 15, 40-48 (1987)
4. Malcolm R. McEwen. *Examining the influence of humidity on reference ionization chamber performance*. Medical Physics, Volumen 44, 694-702 (2016)
5. Yuuki Sato, Morihito Shimizu and Yuichiro Morishita, Masanori Sato and Masao Hoshina. *Experimental study of humidity effect on charge measurement of reference ionization chambers in clinical high-energy photon beams*. Medical Physics, Volumen 46, 4177-4183 (2019)
6. Niatel MT. *Etude experimentale de l'influence de la vapeur d'eau sur l'ionisation produite dans l'air*. C R Acad Sci Paris (1969).
7. Yuichi Kato, Hiraku Fuse, Kazuya Shinoda, Katsumi Miyamoto y Tatsuya Fuijisaki. *Thermal Equilibration in the Cavity Volume of a Farmer Ion Chamber for Routine Dosimetry*. Med Phys (2015)
8. PTW, The Dosimetry Company. *Ionizing Radiation Detectors (Book)* (2019/2020)
9. Organismo internacional de energía atómica (IAEA). *Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos (Book)*. OIEA, Viena (2005).

10. María Cristina Plazas, Kewin Lázaro Sandoval y Silvia Ceballos Peláez. *Dosimetría absoluta para haces de fotones de alta energía*. Tecciencia, 26-32 (2012).
11. J. Torres del Río, A.M. Tornero-López, D. Guirado, J. Pérez-Calatayud y A.M. Lallena. *Airdensity dependence of the response of the PTW SourceCheck 4pi ionization chamber for 125I brachytherapy seeds*. Physica Medica, Volumen 38, 93-97 (2017).
12. NEA (OECD). *PENELOPE-2018: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*.
13. XU Junzeng, WEI Qi, PENG Shizhang y YU Yanmei. *Error of Saturation Vapor Pressure Calculated by Different Formulas and Its Effect on Calculation of Reference Evapotranspiration in High Latitude Cold Region*. Procedia Engineering, Volumen 28, 43-48 (2012).
14. Atomic and Nuclear data (2004 y 2005). Recuperado de: <http://www.inhb.fr/nuclear-data/nuclear-data-table/>.