

CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA DOSÍMETROS CAF:DY EN TÉRMINOS DE HP(0.07;0°) PARA RADIACIÓN BETA DE SRY-90

Alvarez, R. J.T.¹, Casas C. M.² y Tovar M.V.M.³

^{1,2,3} LSCD, Departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes, ININ
Carretera Federal México Toluca S/N , La Marqueza, Ocoyoacac, Estado de México, México. CP 52750,

RESUMEN

Se construyen tres de curvas de calibración CC: $R(nC)$ vs $H_p(0.07)$, en el intervalo de 0.2 mSv hasta 100 mSv con dosímetros de CaF:Dy (TLD 200) irradiados con una fuente patrón de SrY 90 Nr 86 (Tipo 1 de 1854 Bq nominales) en un maniquí de PMMA de 30 cm x30 cmx15 cm. La fuente patrón se calibra en términos de la dosis de radiación beta de referencia $D_{R\beta}$ para determinar la dosis equivalente direccional $H_p(0.07;0^\circ)$; de acuerdo con la norma ISO 6980 parte 2 usando una cámara extrapolación patrón primario PTW 30360 series 23392-040 en el LSCD-ININ, el valor de la rapidez de $H'(0.07)$, a una distancia de 30 cm sin filtro homogeneizador es de: $43.38 \mu Sv s^{-1} \pm 1.3\%(k=2)$ (24/09/2014). Para cada curva de calibración se realizan las pruebas de normalidad y por falta de ajuste; los parámetros de cada curva son: $m_1=332.16 mSv nC^{-1}$ y $b_1=9.23 nC$; $m_2=258.72 mSv nC^{-1}$ y $b_2=9.83 nC$; $m_3= 304.08 mSv nC^{-1}$ y $b_3=8.54 nC$ donde para determinar la influencia de el borrado térmico los dosímetros y la repetibilidad se leen los dosímetros ,en un lector Harshaw 3500, de las CC1 y CC3 a 3 tres días y la CC2 a 30 días después de la irradiación. Los 32 dosímetros se caracterizan irradiándolos a un $K_a=300 mGy$ en un campo de Cs 137 para determinar su factor de corrección individual y así homogenizar su respuesta, además se corrige las lecturas por estabilidad del lector a partir de las lecturas de la luz de referencia. Los valores promedio ajustados para H' las con las CC's son reproducibles dentro del $\pm 11\%$ de los valores de referencia

1. INTRODUCCIÓN

La dosimetría beta con fines de PR tanto de área (H') como personal (H_p) presenta una serie de retos como son: la dependencia angular de la respuesta de los detectores, la evaluación de los factores de conversión para magnitudes operativas, las altas incertidumbres – alta dispersión y baja exactitud- en la determinación de las dosis equivalente direccionales o personales en campos de radiación beta o gamma/beta con dosímetros TLD [1], y el numero limitado de métodos de comparación fiables y precisos entre laboratorios de metrología para la acreditación de sus capacidades de medida de calibración CMC, [2].

En particular los sistemas de fuentes de referencia beta BSS Tipo 1 y 2 han permitido lograr la normalización de la dosimetría beta a nivel mundial [3,4]; en efecto, la calibración de estos campos de referencia en términos de la $D_{R\beta}$, H' o H_p se realiza con la técnica de la cámara de extrapolación – la técnica primaria [5]- donde los niveles de incertidumbre combinada son del orden de 1% para Sr/Y90 hasta un 2% para Kr 85 [2].

Sin embargo, la medición de campos de radiación beta con otras técnicas como la película radiocromica [6] presenta una alta incertidumbre del orden del 20% hasta un 50%, o el caso de TLD donde las incertidumbres pueden llegar hasta un 50%, [1]

¹ trinidad.alvarez@inin.gob.mx

Por esta razón es deseable investigar y confirmar las precisiones y dispersiones para dosimetría personal en la magnitud H_p en campos de radiación beta logradas con la técnica de TL, usando dosímetros de $CaF_2:Dy$ (TLD 200), los cuales se caracterizan por su alta sensibilidad, pero con el consabido problema de el borrado térmico,[7].

El objetivo final es desarrollar un método de comparación para laboratorios de metrología con el cual se puedan confirmar la CMC para la magnitud $H_p(0.07,0^\circ)$ en campos de $Sr90/Y90$, análogo al desarrollado por [2].

2. REALIZACIÓN DE LA DOSIS DE REFERENCIA BETA $D_{R\beta}$, DOSIS EQUIVALENTE DIRECCIONAL $H'(0.07)$ Y DOSIS EQUIVALENTE PERSONAL $H_p(0.07)$ CON LA CÁMARA DE EXTRAPOLACIÓN

La evaluación de las dosis de las dosis equivalentes para campos de radiación de bajo poder de penetración, es importante para el cumplimiento de los límites de dosis para el órgano piel; donde los campos de radiación externos pueden monitorearse desde el punto de vista de dosimetría de área con la magnitud dosis Equivalente direccional $H'(0.07;\alpha)$ o de la dosimetría personal con la magnitud $H_p(0.07)$.

Desafortunadamente, pese a la recomendaciones de la ISO para dosimetría beta [ISO 6980], retomadas en la publicación técnica 16 del OIEA [8] es poco conocido cual es el proceso de realización de las magnitudes H' o H_p ; más aún muchas veces es confundida la $D_{R\beta}$ con la Dosis absorbida en aire [6], de ahí la necesidad de hacer una breve presentación de los conceptos básicos de la dosimetría beta.

La dosis de referencia beta $D_{R\beta}$ es la dosis absorbida direccional, $D'(0.07; 0^\circ)$, a una profundidad 0,07 mm y un ángulo 0° debida únicamente a partículas beta, [5], y se formaliza con la expresión:

$$D_{R\beta} = \frac{(\bar{W}_0/e) s_{t,a}}{\rho_a a} \left[\frac{d}{d\ell} k k' I(\ell) \right]_{\ell=0} \quad (1)$$

donde el significado de cada uno de los términos puede consultarse en la Tabla 1 [5] y la realización de esta magnitud es efectuada mediante una cámara de extrapolación, ver Fig. 1.

Estrictamente la dosis personal H_p o direccional H' se determina a partir de la dosis absorbida de referencia D_R , la relación que existe entre la Dosis de referencia D_R y la $D_{R\beta}$ es el factor de corrección por radiación de frenado, [5, p.3, 2004], pero en el caso particular de las fuentes de $Sr/Y90$, $k_{br} \approx 1$.

Los valores convencionalmente verdaderos para las magnitudes operativas H' y H_p definidas a partir de la Ec. (1) son:

$$\begin{aligned} H'_t(0,07;\bar{\Omega}) &= h'_D(0,07;E;\alpha) D_R \\ H_{p,t}(0,07) &= h_{p,D}(0,07;E;\alpha) D_R \end{aligned} \quad (2)$$

donde los coeficientes de conversión $h'_D(0,07;E;\alpha) \cong h_{p,D}(0,07;E;\alpha)$ y sus valores pueden consultarse en ISO 6980 parte 3 [9].

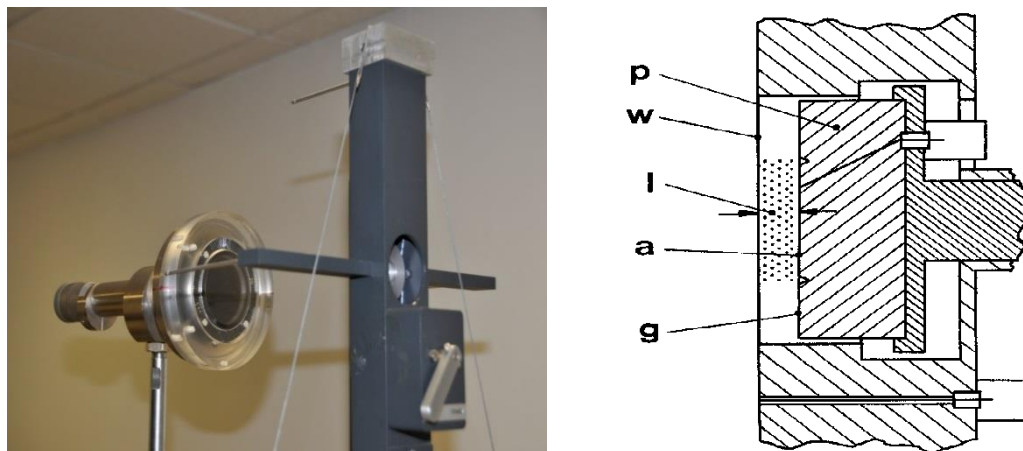


Figura 1. Cámara de extrapolación del LSCD-ININ y su diagrama, [5].

Tabla 1. Factores de corrección empleados en la determinación de la D_{RB} y análisis de incertidumbre, [10]

Factor	Valor	unidades	Coeficiente de sensibilidad	unidades	si/%	
					A	B
I	2.261E-12	A	1.485	l	1.55	
k_{ad}	1.41	1	2.383E-12	A		0.08
k_{abs}	1.16	1	2.900E-12	A	0.14	
k_{ac}	0.90	1	3.719E-12	A	0.01	
k_{de}	1.00	1	3.360E-12	A	0.00	
k_{div}	1.00	1	3.344E-12	A	0.22	
k_{pe}	1.00	1	3.360E-12	A	0.0003	
K_{sat}	1.005	1	3.344E-12	A	0.30	
FC electrometro		1	3.374E-12	A		0.14
I_{corr}	3.36E-12	A				
Uc	0.16	%				
U(k=2)	0.32	%				

Factor	Valor	unidades	Coeficiente de sensibilidad	unidades	si/%	
					A	B
S_{wa}	1.11	l	5.41E-05	Gy s ⁻¹		0.60
k_{ba}	1.00	1	6.00E-05	Gy s ⁻¹		0.40
k_{br}	1.01	1	5.94E-05	Gy s ⁻¹		0.20
k_{cl}	1.00	1	6.00E-05	Gy s ⁻¹		0.10
k_{hu}	1.00	1	6.00E-05	Gy s ⁻¹		0.10
k_{in}	1.00	1	6.00E-05	Gy s ⁻¹		0.01
k_{ra}	1.00	1	6.00E-05	Gy s ⁻¹		0.50
rho	1.197	kg m ⁻³	5.01E-05	J kg ⁻² s ⁻¹ m ³		0.04
A_{eff}	7.162E-04	m ²	8.38E-02	J kg ⁻¹ s ⁻¹ m ⁻²	1.00	
W/e	33.97	J C ⁻¹	1.77E-06	C s ⁻¹		0.20
dIcorr/dI	1.365E-09	A m ⁻¹	4.40E+04	C kg ⁻¹ m ⁻¹	6.62	0.16
\dot{D}_{RB}	6.002E-05	Gy s⁻¹				

Uc	0.96	%				
U(k=2)	1.92	%				

En particular el LSCD-ININ posee una cámara de extrapolación PTW 30360 series 23392-040, la cual se ha caracterizado [10], además se cuenta con el conjunto de fuentes patrones de radiación beta Nr 86, cuyos campos de radiación se han calibrado obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2. Valores $\dot{D}_{R\beta}$ determinados en el LSCD-ININ para los campos de referencia beta

Fuente	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Series 2	^{85}Kr Series 1
Actividad nominal A, [MBq]	1161 ^(a)	2100
Distancia de referencia y_0 , [cm]	11, 30, 50	30
Fecha calibración t (dd/mm/año)	02/02/2006 16/12/2003 16/12/2003	9/10/2007
$\dot{D}_{R\beta} \pm U$, [$\mu\text{Gy s}^{-1}$] for t and y_0	(405.3 \pm 5.3) (60.02 \pm 1.15) (21.06 \pm 0.30)	(24.38 \pm 0.34)
$\dot{H}_p(0.07)$ [$\mu\text{Sv s}^{-1}$]	405.3 60.02 21.06	24.38
Vida media, [days]	(10483 \pm 110)	(3915 \pm 3)
E_{res} , [MeV]	1.800	0.57
E_{max} , [MeV]	2.274	0.687

3. CURVAS DE CALIBRACIÓN CON DOSÍMETROS TLD 200 (CaF:Dy)

Se utilizan 32 dosímetros de CaF:Dy, los dosímetros se caracterizan irradiándolos a un $K_a=300$ mGy en un campo de Cs 137 para determinar su factor de corrección individual y así homogenizar su respuesta, además se corrige las lecturas por estabilidad del lector a partir de las lecturas de la luz de referencia

Se construyen tres CC, todos los dosímetros son irradiados bajo las mismas condiciones, pero los conjuntos correspondientes a dos de la CC se leen 3 días después de la irradiación para estimar la reproducibilidad de las curvas, y el otro 30 días después de la irradiación con el propósito de evaluar la influencia de borrado térmico.

3.1 Propiedades del CaF2: Dy

En particular en este trabajo empleamos cristales de CaF2 de 3.2x3.2 mm2 por 0.8 mm de ancho marca Harshaw.

La curva de brillo típica del CaF2:Dy se presenta en la Fig. 2, en esta se presentan 3 picos, la literatura reporta una sensibilidad des 20 a 30 veces respecto al LiF:Mg (TLD 100), [7].

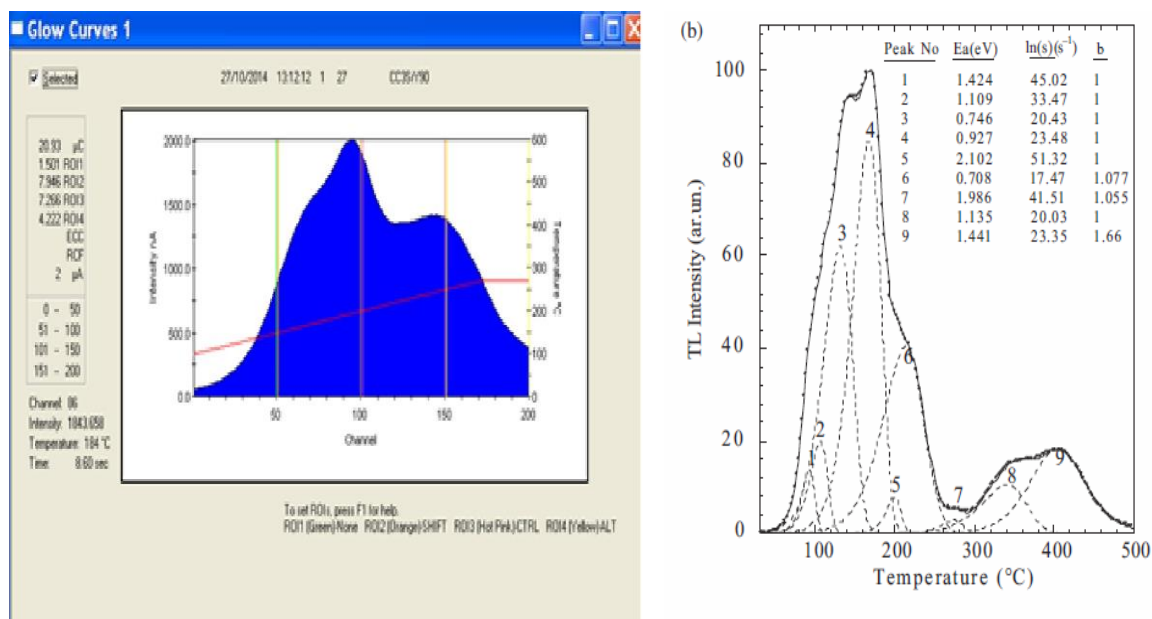


Figura. 2 Curva de brillo típica del CaF₂:Dy [11].

Las lecturas se efectúan con un equipo Harshaw 3550, con los siguientes parámetros de lectura: Precalentamiento: 100°C s⁻¹ sin integración de la lectura, temperatura 120°C, tiempo 3 s. Adquisición: tasa de calentamiento 10°C s⁻¹, temperatura 260°C, tiempo 26 s. Borrado: temperatura 300°C, durante 5 s.

Con este protocolo se está integrando hasta el pico 6 y se desprecian los restantes tres picos. Además se corrige las lecturas por estabilidad del lector a partir de las lecturas de la luz de referencia.

3.2 Construcción y Análisis de las CC

Como se menciona anteriormente, los 32 dosímetros se caracterizan irradiándolos dos veces de manera independiente, a un Ka=300 mGy en un campo de ¹³⁷Cs para determinar su factor de corrección individual y así homogenizar su respuesta del lote dentro del ±5% a una desviación estándar tomando en cuenta la reproducibilidad de las dos irradiaciones.

3.2.1 Irradiación de los dosímetros

Los dosímetros son irradiados tres veces para obtener tres CC distintas, bajo las mismas condiciones de referencia con una fuente de SrY90 de 1850 MBq nominales y cuyo campo de radiación se calibra en términos la rapidez de dosis equivalente personal Hp(0.07;0°), a una distancia de 30 cm sin filtro homogeneizador es de: 43.38 μSv s⁻¹ ± 1.3%(k=2) (24/09/2014).

Los dosímetros se colocan en un maniquí de PMMA de (30 cm x30 cmx15 cm) para simular el cuerpo humano.

3.2.2 Lecturas de los dosímetros y sus modelos de regresión para las CC

Con el propósito de estimar la reproducibilidad de las CC se realizan las CC 1 y 3, irradiadas en diferentes fechas pero leídas 2 y 3 días después de su irradiación, ver Tabla

3. Adicionalmente para estimar la influencia del borrado térmico se construye la CC 2 la cual se lee 30 días después de su irradiación, ver Tabla 3.

En ambos casos las lecturas fueron corregidas por el factor corrección para homogeneizar el lote y por el factor de corrección por estabilidad del lector, ver Fig.3. Los parámetros de las modelos de regresión R vs Hp obtenidos para las lecturas de la Tabla 3 son los siguientes, ver Tabla 4:

Tabla 3. Lecturas promedio corregidas por homogeneidad del lote y estabilidad del lector, las CC 1 y 3 son leídas 3 días después de la irradiación para evaluar la reproducibilidad de la calibración, y la CC 2 48 días después para estimar los efectos del borrado térmico.

Hp(0.07) / mSv nominal	Promedio SD y CV % Lecturas Corregidas/ nC			
	CC 1/ nC Irradiación 13/08/2014 Lectura 15/08/2014	CC 2/ nC Irradiación 29/08/2014 Lectura 29/09/2014	CC 3/ nC Irradiación 24/10/2014 Lectura 27/10/2014	CC1&3 / nC
0.0	Media 9.2 SD 0.57 CV% 6.2%	9.7 1.47 15.2%	8.5 0.4 4.8%	8.9 0.5 5.8%
0.2	80.7 1.39 1.7%	66.2 5.70 8.6%	72.2 6.3 8.7	76.4 6.0 7.8
1.0	337.4 9.25 2.7%	285.0 30.06 10.5%	333.9 9.5 2.8	335.6 2.4 0.7
10	3247.7 74.96 2.3%	2575.4 144.14 5.6%	3032.8 101.6 3.3	3140.2 152.0 4.8
25	7280.4 753.26 10.3%	6646.2 552.05 8.3%	7503.2 398.5 5.3	7391.8 157.5 2.1
50	16091.3 682.09 4.2%	12965.1 479.62 3.7%	14428.4 369.2 2.6	15259.8 1175.9 7.7
75	25136.2 243.90 1.0%	20772.1 1544.95 7.4%	24561.9 912.4 3.7	24849.1 406.1 1.6
100	30576.1 1511.63 4.9%	25360.1 784.10 3.1%	30102.7 2400.2 8.0	30339.4 334.7 1.1

Tabla 4. Parámetros de las CC's: R vs Hp

CC	b/nC±SD	m/ nC 1±SD	LOF		Prueba de Normalidad	
			F	P	KS	P
1	9.3277 ±0.3594	332.163 ±1.717		≥0.10	0.097	>0.150

2	9.8294± 0.7324	258.720 ±2.607		≥0.10	0.120	>0.150
3	8.5382 ± 0.3059	304.083±3.288		≥0.10	0.59	>0.150
1& 3	9.0625 ±0.4126	325.207 ±2.220		0.032	0.081	>0.150

3.2.3 Evaluación de las Hp(0.07)

En las Tabla 5 se presentan los valores nominales Hp y los ajustados por los modelos de regresión de las CC1, así como su error asociado, ver Fig. 3 para todas las CC's.

Tabla 5. Valores de Hp ajustados, Errores y cocientes de dosis Hp para juego de lecturas 1.

Hp(0.07) ajustadas de las Lecturas 1 con modelo de regresión CC1&3				
Hp(0.07) /mSv	Hp(0.07)ajustada /mSv	Error %	Hp _{ajustada} /Hp	$\left[\frac{Hp_{ajustada}}{Hp} \right]$
0.213	0.215	1.04	1.010	1.032±0.020
	0.220	3.08	1.031	
	0.220	2.92	1.029	
	0.226	5.89	1.059	
0.981	0.994	1.28	1.013	1.029±0.029
	0.987	0.57	1.006	
	1.008	2.70	1.027	
	1.050	7.04	1.070	
9.982	9.789	-1.93	0.981	0.998± 0.023
	9.881	-1.00	0.990	
	10.299	3.18	1.032	
	9.865	-1.17	0.988	
24.996	20.181	-19.26	0.807	0.894± 0.093
	23.778	-4.88	0.951	
	20.611	-17.54	0.825	
	24.866	-0.52	0.995	
49.993	48.880	-2.23	0.978	0.989± 0.043
	47.474	-5.04	0.950	
	52.416	4.85	1.048	
	49.039	-1.91	0.981	
74.989	77.037	2.73	1.027	1.030± 0.010
	77.540	3.40	1.034	
	78.125	4.18	1.042	
	76.359	1.83	1.018	
99.986	94.317	-5.67	0.943	0.940± 0.046
	87.347	-12.64	0.874	
	96.616	-3.37	0.966	
	97.690	-2.30	0.977	

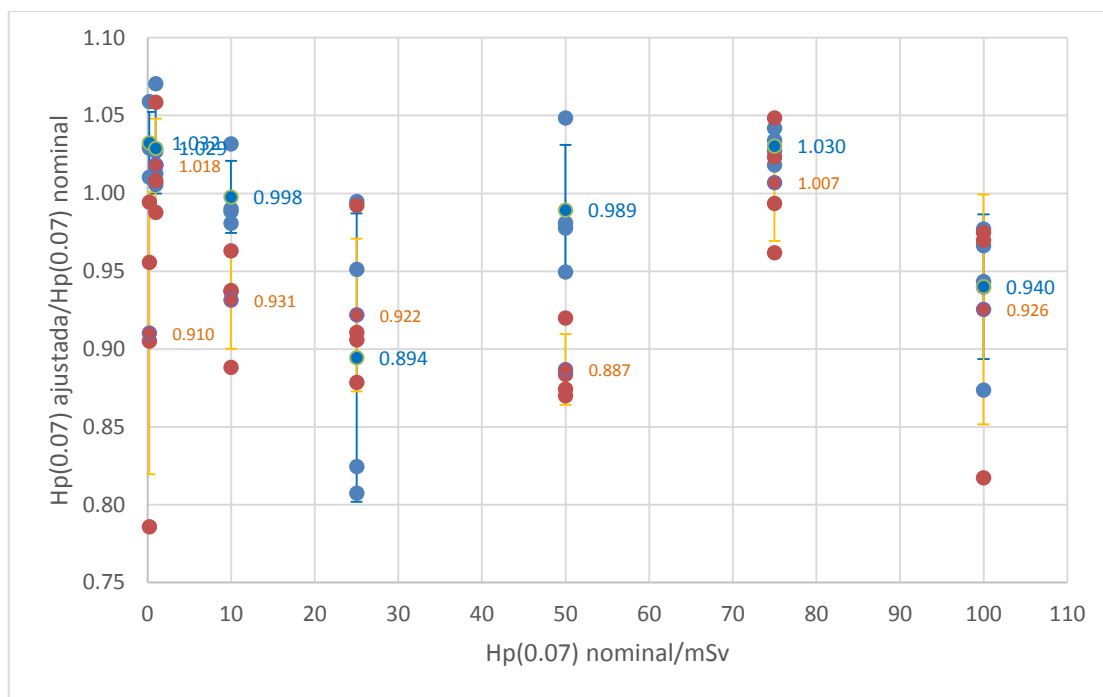


Figura 3. Cociente de las Hp ajustadas respecto de las nominales o convencionalmente verdaderas, las Hp ajustadas para las lecturas 1 (color azul) y lecturas 3 (color naranja) ambas estimadas con el modelo de regresión de las CC 1&3.

Ahora el problema a resolver es como validar los resultados obtenidos para la curva de calibración CC1&3 con los diferentes juegos de lecturas 1 y 2, para esto proponemos lo siguiente:

- i. Más que seguir la Norma ISO 14146 [12], que usa el criterio PQL para determinar un intervalo de confianza para lecturas individuales, con el criterio de un dosímetro fallido en 10 (Regla del 10%); tomaremos los estadísticos B (sesgo) y S (dispersión) de la norma ANSI-HP 13.11-2011,[1], donde da la posibilidad de tener más de un dosímetro con lecturas anómalas, (en el apéndice D de esta norma, emplea el criterio de Wheeler para la perdida promedio por unidad de producción, que implica un criterio de operación del proceso de sesgo con mínima variación), de donde tenemos:

$$B^2 + S^2 \leq L^2 \quad (3)$$

- ii. El valor típico procesadores de dosimetría personal es de $L=0.3$ para radiación beta Categoría III, Tabla 1a de [1], sin embargo nosotros proponemos un valor de $L=0.10$ para laboratorios de metrología, que implica una tolerancia máxima del 10%
- iii. Por otro lado, para complementar la validación proponemos el uso de la prueba F para la homogeneidad de varianzas o de la prueba de Levene [13] donde básicamente se establece la siguiente prueba de hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_1 / \sigma_2 &= 1 \\ H_1: \sigma_1 / \sigma_2 &\neq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Calculando los anteriores estadísticos a partir de los errores porcentuales de los valores Hp ajustados respecto de los valores nominales o de referencia para las CC1 y 3, tenemos los siguientes resultados:

Tabla 6. Parámetros estadísticos para la validación de la CC1 y 3

Lecturas	B	S	L	Prueba F (normal)				Prueba de Levene			
				DF1	DF2	F	P	DF1	DF2	L	P
1	-0.012	0.064	0.065	27	27	1.09	0.831	1	54	0.14	0.71
3	-0.062	0.061	0.087								

Por lo tanto, concluimos que la CC1&3 es adecuada para la estimación de la Hp(0.07) con un sesgo máximo del 6% respecto del valor convencionalmente verdadero con una dispersión máxima del 6%

Por lo tanto, proponemos esta técnica como método de comparación para laboratorios de metrología en la cual el laboratorio piloto construirá su curva de calibración con un juego de dosímetros, los cuales se enviarán a los laboratorios participantes para que los irradien, una vez evaluadas la Hp(0.07) en el laboratorio piloto se determinarán los estadísticos B,S,L y las pruebas de homogeneidad de varianzas, cuyos valores determinarán si el laboratorio participante aprueba su capacidad de medida de calibración en esta magnitud Hp(0.07).

3.2.4 Análisis de incertidumbres

Las principales fuentes de incertidumbre y su contribución son detalladas de acuerdo con la Guía GUM-ISO-BIPM en la Tabla 7, para evaluación de los cocientes $H_{p\text{ajustada}}/H_p$.

Tabla 7. Análisis de Incertidumbre para los cocientes $H_{p\text{ajustada}}/H_p$

Factor	valor	U	Unidades	Si%	ui%
Homogeneidad del lote	1.05	0.01	1	1.0	
Lectura promedio	15259.8	682	nC	4.46	
Borrado térmico	1.00		1		
Estabilidad del lector	1.07	0.01	1	1.0	
Reproducibilidad		958	nC	6.2	
	15259.8 nC			7.8%	
CC inversa	46.896		mSv	7.8%	
Tasa de Hp(0.07)referencia	43	0.6	mSv s ⁻¹		1.0
Tiempo de irradiación	1180	1	s		0.17
$H_{p\text{ajustada}}/H_p$	0.887		1	uc=7.9%	

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método para la construcción de CC: R vs Hp(0.07) para dosimetría personal beta. La curvas de calibración cubren un rango de 0 a 100 mSv y son reproducibles

dentro de un 11%, con una incertidumbre combinada $uc=7.9\%$ En particular se recomienda este método para realizar comparaciones entre laboratorios de dosimetría para validar la capacidades de medida en las magnitudes $H_p(0.07)$, $H'(0.07)$ y/o $D_{R\beta}$.

5. REFERENCIAS

1. ANSI/HPS, "American National Standard for Dosimetry Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing", N13.11-2009, ANSI, USA (2009).
2. Behrens R, K Helmstädter, P Ambrosi, J-M Bordy, C Lecante, M Bovi, I Jokelainen, C G Soares, P R B Saull, I A Kharitonov, S Fedina, T Kurosawa y M Kato J.A. "International comparison EUROMET.RI(I)-S2 of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate in tissue for beta radiation (EUROMET project No 739): Final report". *Metrologia*, Technical Supplement **47**, 06002, (2007).
3. ISO, Nuclear energy -- Reference beta-particle radiation -- Part 1: Methods of production, ISO 6980-1, ISO, Geneva, (2006).
4. J. Böhm, W.G. Alberts, K.L. Swinth, C.G. Soares, J.C. McDonald, I.M.G. Thompson y H.-M. Kramer, "ISO Recommended Reference Radiations for the Calibration and Proficiency Testing of Dosimeters and Dose Rate Meters used in Radiation Protection". *Rad. Prot. Dos.* **82**,2; pp. 87-105,(1999)
5. ISO, Nuclear energy -- Reference beta-particle radiation -- Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field, ISO 6980-2, ISO, Geneva, (2004).
6. Benavente A,N, Meira-Belo L.C, S.R. Reynaldo A, Da Silva T., "Feasibility of EBT Gafchromic films for comparison exercises among standard beta radiation fields", *Applied Radiation and Isotopes*, **71** 52-56(2012).
7. McKeever S. W. S., M. Moscovitch y P. D. Townsend. Thermoluminescence dosimetry materials: Properties and uses Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, U.K. ISBN 1-870965-19-1,(1995).
8. IAEA, "Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments", Safety Reports Series 16, STI/PUB/1074 (ISBN:92-0-100100-2), Vienna (2000)
9. ISO, Nuclear energy -- Reference beta-particle radiation -- Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence, ISO 6980-3, ISO, Geneva (2006).
10. Álvarez , P. Cruz E and V. Tovar M, "Measurement of Reference Beta Particle Absorbed Dose Rate to ^{85}Kr and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ sources". ID 592, *Proceedings of IRPA 12*, Buenos Aires, (2008)
11. Yazici A.N, Chen R., Solak S. y Yegingil Z. "The analysis of Thermoluminescent glow peaks of $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (TLD-200) after β -irradiation", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** 2526. (2002).
12. ISO 14146: Radiation protection Criteria and performance limits for the periodic evaluation of processors of personal dosimeters for X and gamma radiation,(2000).
13. MINITAB 17., <http://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/features/> (Enero 2015).