

CAPÍTULO III Resultados y Discusión.

3.1 Resultados de la caracterización de los monitores de contaminación superficial en Cuba a través de un ensayo piloto

Los principales resultados alcanzados en el ensayo piloto fueron los siguientes:

- Existe una gran variedad de modelos de monitores de contaminación (al menos de 17 fabricantes distintos) aproximadamente el 70 % del total.
- El rango de medición oscila entre (0 - 1000) cps para el 23% de la muestra, entre (0 - 2000) para el 33% de la muestra y hasta 10 000 cps para el resto de la muestra.
- Existe una gran variedad de tipo de detectores tales como:
 - Contadores proporcionales sellados llenos de xenón
 - Contadores proporcionales de flujo gaseoso
 - Contadores proporcionales de flujo gaseoso sin ventana
 - Contadores Geiger-Muller
 - Detectores de centelleo
 - Detectores de semiconductor.
- Tamaño de la ventana de los detectores muestreados oscila entre (5 – 50) cm² para el 32 % de la muestra, entre (50 – 100) cm² para el 28 % y el resto de la muestra hasta 232 cm².
- Los instrumentos tienen como promedio 10 años de explotación y en algunos casos el coeficiente de variación es muy alto y los potenciómetros no permiten hacerles ajustes electrónicos. Por otra parte algunos monitores de escala digital, tienen dígitos casi ilegibles.
- Se identificaron instrumentos que nunca habían sido calibrados y solo contaban con algunas pruebas hechas por el fabricante. Otros monitores tienen los certificados cuya fecha de emisión pasan de 5 ó más años.
- El 25 % de los usuarios tienen instrumentos que la sensibilidad de detección no se corresponde con el uso que se les da.
- Se corroboró que las respuestas de los detectores varían con la actividad de la fuente, con la posición relativa fuente – detector y con el tipo de radionucleido.
- Se identificaron 14 tipos de radionucleidos que se utilizan en el país que clasifican dentro de las fuentes no selladas.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Debido a la variedad de las dimensiones de las ventanas de los detectores, es necesario al menos dos métodos de calibración o uno que lo incluya todos.
- Algunos usuarios no tienen manuales de sus monitores.

La **calibración** de los instrumentos de medición de contaminaciones superficiales para el ensayo piloto se realizó utilizando el método de una fuente para cada radionucleido. Por lo que se deduce que con las cuatro fuentes con que contaba el LSCD no podía cubrir las necesidades de los usuarios, es decir, necesitaba una fuente para cada radionucleido identificado.

Este método demanda contar con un número significativo de fuentes de referencia, al menos una para cada radionucleido de interés. Esto se hace más crítico si se considera que un número importante de estos radionucleidos presenta cortos períodos de semi-desintegración radiactiva. Esta dificultad hace insostenible este método de calibración, por lo que se hizo necesario la búsqueda de un método más eficiente y menos costoso: el método de la **calibración** con varias fuentes.

Esta calibración se realiza en términos de eficiencia del instrumento de medición para los tipos de radiaciones, grupos de energías y se ofrece como un método más versátil que permite obtener en cualquier momento el factor de **calibración** para el elemento radiactivo que se requiera.

3.2 Resultados obtenidos de los perfiles de los detectores

Los resultados de las investigaciones de los perfiles de los detectores están contenidos en las tablas de la (1-12). Las gráficas correspondientes a estos gráficos pueden ser encontradas en las figuras de la 5 a 22. Los perfiles fueron determinados para una distancia fuente detector de 3 mm.

Emisores alfa

El perfil de los detectores obtenidos para los emisores alfa (Figuras 5 - 7), se observa que la respuesta de los detectores en función del desplazamiento horizontal de la fuente forma una meseta casi paralela y luego se produce una caída dramática de la tasa de conteo en la medida en que la fuente se separa del detector. Cuando el borde del área activa de la fuente coincide con el del detector, la tasa de conteo alcanza el orden del fondo. Este tipo de respuesta es característico de los emisores alfa debido al poco alcance que tienen las partículas emitidas en el aire.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por otra parte es importante destacar la simetría representada en las figuras antes mencionadas, solo en el caso de la fuente $^{241}\text{Am}(886)$ en los perfiles: horizontal corto, diagonal derecho y diagonal izquierdo se observa un poco de asimetría en una u otra dirección que puede estar asociada con el posicionamiento fuente detector.

Emisores beta

El perfil de los detectores obtenidos para los emisores beta (Figuras 8- 14), se observa que la respuesta de los detectores en función del desplazamiento horizontal de la fuente en el perfil horizontal largo forma una meseta casi paralela y posteriormente ocurre algo similar a los emisores alfa, es decir, se produce la caída drástica de la tasa de conteo. La campana o área bajo la curva de este perfil es algo mayor que el resto de los tres perfiles para una misma fuente. Lo que implica que la tasa de conteo en este perfil también es mayor y por lo tanto se alcanza el fondo a una distancia mayor que el resto de los perfiles. Algunas asimetrías observadas tienen que ver probablemente con el posicionamiento de la fuente y el detector. Las observaciones hechas anteriormente se comportan de la misma manera para todos los detectores con sus respectivas fuentes.

Emisores gamma

El perfil de los detectores, obtenidos para los emisores gamma se puede observar las siguientes figuras (15 – 22). La campana o área bajo la curva del perfil horizontal largo es algo mayor que el resto de los tres perfiles para una misma fuente, al igual que en los emisores alfa y beta, con la diferencia que el fondo se alcanza a una distancia mucho mayor. Lo que implica que la tasa de conteo en este perfil también es mayor y por lo tanto se alcanza el fondo a una distancia mayor que el resto de los perfiles. Algunas asimetrías observadas tienen que ver también probablemente con el posicionamiento de la fuente y el detector. Las observaciones hechas anteriormente se comportan de la misma manera para todos los detectores con sus respectivas fuentes. Es importante destacar la diferencia de respuesta de los detectores dentro de los propios emisores gamma. La menor tasa de conteo la tuvo la fuente de $^{137}\text{Cs}/889$, el más energético y la mayor la obtuvo la fuente $^{241}\text{Am}/887$ el de menor energía. Este hecho demuestra la dependencia de la tasa de conteo con la energía de los radionucleidos y que estos detectores tienen una mejor respuesta para aquellos radionucleidos de más baja energía.

Tabla 3
Perfil del detector GP13A/ ¹⁴C/892(beta)

Horizontal largo		Horizontal Corto		Diaqonal derecha		Diaqonal izquierda	
Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-20	56,4	-20	54,5	-20	59,7	-20	53,7
-19	57,2	-19	55,9	-19	56,4	-19	53,7
-18	58,2	-18	53,2	-18	61,4	-18	53,9
-17	55,9	-17	53,0	-17	61,1	-17	55,0
-16	55,8	-16	56,5	-16	57,3	-16	53,3
-15	55,4	-15	53,5	-15	57,2	-15	54,4
-14	54,9	-14	55,5	-14	57,8	-14	54,0
-13	55,5	-13	52,5	-13	57,3	-13	57,0
-12	61,9	-12	52,2	-12	59,0	-12	56,7
-11	70,7	-11	54,6	-11	56,8	-11	57,2
-10	85,2	-10	56,1	-10	54,9	-10	54,8
-9	102	-9	55,9	-9	57,1	-9	55,6
-8	109	-8	59,7	-8	61,0	-8	59,3
-7	132	-7	78,5	-7	69,0	-7	72,4
-6	140	-6	95,7	-6	81,6	-6	84,8
-5	149	-5	119	-5	94,3	-5	104
-4	164	-4	142	-4	108	-4	130
-3	173	-3	161	-3	133	-3	163
-2	181	-2	179	-2	158	-2	179
-1	185	-1	184	-1	179	-1	188
0	184	0	184	0	189	0	191
1	184	1	181	1	192	1	186
2	181	2	173	2	187	2	174
3	174	3	148	3	168	3	141
4	165	4	137	4	143	4	122
5	156	5	114	5	117	5	101
6	140	6	101	6	97,0	6	82,1
7	131	7	78,3	7	79,6	7	70,2
8	119	8	59,7	8	67,8	8	58,8
9	95,5	9	57,2	9	58,2	9	55,0
10	85,7	10	56,2	10	56,1	10	57,1
11	72,4	11	53,5	11	57,6	11	57,5
12	62,7	12	52,9	12	57,8	12	58,1
13	54,3	13	53,1	13	56,7	13	57,0
14	56,1	14	53,8	14	59,1	14	55,8
15	54,8	15	54,9	15	58,3	15	55,6
16	55,7	16	54,9	16	53,8	16	56,0
17	53,9	17	51,7	17	55,2	17	55,1
18	54,8	18	54,7	18	55,3	18	53,5
19	54,7	19	54,6	19	57,8	19	55,2
20	53,2	20	54,5	20	54,7	20	53,7

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4
Perfil del detector GP13A/ ²⁴¹Am/886 (alfa)

Horizontal largo		Horizontal Corto		Diagonal derecha		Diagonal izquierda	
Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (⁻¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (⁻¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (⁻¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (⁻¹ s)
-16	2,6	-15	3,4	-15	2,3	-15	2,31
-15	2,1	-14	2,8	-14	2,3	-14	2,41
-14	2,9	-13	2,9	-13	2,4	-13	2,29
-13	3,0	-12	2,8	-12	2,0	-12	2,88
-12	19,7	-11	3,0	-11	2,1	-11	2,00
-11	47,9	-10	16,4	-10	2,3	-10	1,96
-10	91,1	-9	60,4	-9	2,3	-9	2,37
-9	115	-8	108	-8	10,8	-8	7,17
-8	148	-7	153	-7	35,5	-7	37,6
-7	172	-6	204	-6	76,0	-6	87,7
-6	210	-5	250	-5	127	-5	138
-5	239	-4	297	-4	173	-4	202
-4	275	-3	315	-3	232	-3	267
-3	306	-2	318	-2	294	-2	324
-2	318	-1	332	-1	312	-1	330
-1	317	0	312	0	317	0	324
0	318	1	280	1	330	1	323
1	317	2	232	2	315	2	288
2	316	3	183	3	258	3	224
3	302	4	129	4	195	4	166
4	277	5	77,5	5	133	5	112
5	240	6	23,5	6	82,8	6	65,2
6	213	7	3,2	7	41,4	7	30,9
7	183	8	3,0	8	8,6	8	6,63
8	150	9	3,2	9	2,4	9	2,41
9	114	10	2,5	10	2,5	10	2,19
10	86,9	11	3,0	11	2,4	11	2,01
11	50,8	12	2,8	12	2,2	12	2,40
12	20,7	13	3,3	13	2,7	13	2,42
13	3,0	14	3,4	14	2,5	14	2,51
14	2,8	15	2,8	15	2,9	15	2,31
15	2,1						
16	2,6						

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 5
Perfil del detector GP13A/ ²⁴¹Sr/J289 (beta)

Horizontal largo		Horizontal Corto		Diagonal derecha		Diagonal izquierda	
Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor medio (- ¹ s)
-15	52,9	-20	53,0	-15	54,1	-15	54,5
-14	51,9	-19	52,3	-14	55,6	-14	54,9
-13	52,0	-18	56,1	-13	54,2	-13	54,5
-12	50,8	-17	55,6	-12	52,4	-12	55,4
-11	53,2	-16	54,8	-11	53,0	-11	53,2
-10	52,4	-15	55,0	-10	54,1	-10	54,0
-9	52,0	-14	62,0	-9	55,3	-9	54,9
-8	64,9	-13	73,9	-8	58,8	-8	56,2
-7	89,4	-12	76,1	-7	71,2	-7	66,9
-6	98,2	-11	89,7	-6	80,5	-6	80,5
-5	122	-10	97,4	-5	102	-5	95,0
-4	134	-9	102	-4	118	-4	115
-3	160	-8	114	-3	135	-3	137
-2	167	-7	126	-2	156	-2	156
-1	172	-6	132	-1	173	-1	171
0	172	-5	138	0	174	0	174
1	175	-4	145	1	169	1	170
2	163	-3	147	2	156	2	154
3	159	-2	160	3	131	3	135
4	140	-1	170	4	113	4	118
5	119	0	172	5	94,3	5	97
6	94,6	1	169	6	76,9	6	80,8
7	80,0	2	160	7	65,2	7	68,6
8	63,4	3	148	8	55,9	8	56,1
9	56,1	4	146	9	54,5	9	54,4
10	50,6	5	139	10	54,7	10	54,6
11	53,8	6	123	11	56,3	11	54,2
12	55,1	7	117	12	53,3	12	54,9
13	54,0	8	107	13	53,2	13	53,6
14	54,1	9	103	14	55,7	14	55,3
15	53,6	10	93,6	15	54,7	15	53,1
		11	85,9				
		12	78,5				
		13	73,9				
		14	63,3				
		15	62,0				
		16	54,6				
		17	52,2				
		18	53,5				
		19	52,9				
		20	54,0				

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

Tabla 6
 Perfil del detector GP13A/ ³⁶Cl/J290 (beta)

Horizontal largo		Horizontal Corto	
Distancia desde el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-20	53,9	-15	51,1
-19	52,6	-14	51,6
-18	53,8	-13	51,3
-17	54,4	-12	51,8
-16	54,1	-11	53,5
-15	56,9	-10	54,5
-14	59,6	-9	54,1
-13	64,3	-8	57,8
-12	70,4	-7	68,7
-11	74,3	-6	83,2
-10	80,1	-5	92,3
-9	84,9	-4	108
-8	87,9	-3	116
-7	93,7	-2	126
-6	98,7	-1	128
-5	105	0	132
-4	110	1	130
-3	117	2	126
-2	122	3	117
-1	129	4	108
0	132	5	93,0
1	130	6	82,7
2	121	7	69,2
3	116	8	56,2
4	109	9	53,3
5	105	10	54,0
6	96,8	11	55,0
7	90,0	12	52,0
8	87,9	13	51,5
9	86,7	14	51,5
10	80,3	15	51,2
11	75,7		
12	70,3		
13	64,7		
14	57,9		
15	56,2		
16	54,0		
17	54,1		
18	53,1		
19	51,2		
20	53,9		

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

Tabla 7

Perfil del detector GP13A/ ²⁴¹Am/887 (gamma)

Horizontal largo		Horizontal Corto		Diagonal derecha		Diagonal izquierda	
Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-18	53,4	-15	52,5	-15	2,69	-18	3,15
-17	53,4	-14	53,6	-14	2,74	-17	3,24
-16	53,4	-13	53,3	-13	2,66	-16	3,33
-15	53,4	-12	53,8	-12	2,56	-15	3,31
-14	56,4	-11	54,9	-11	2,78	-14	4,61
-13	56,9	-10	55,1	-10	2,96	-13	6,23
-12	61,7	-9	54,9	-9	3,48	-12	9,23
-11	64,3	-8	58,7	-8	4,92	-11	13,5
-10	67,3	-7	59,5	-7	10,7	-10	14,6
-9	70,7	-6	69,5	-6	16,2	-9	17,7
-8	72,7	-5	79,2	-5	22,3	-8	19,7
-7	75,0	-4	84,0	-4	27,4	-7	22,2
-6	77,6	-3	90,5	-3	32,1	-6	24,2
-5	83,5	-2	94,2	-2	34,8	-5	25,0
-4	84,2	-1	95,5	-1	35,9	-4	28,7
-3	88,6	0	96,9	0	38,3	-3	30,0
-2	91,1	1	95,1	1	35,1	-2	32,7
-1	95,2	2	92,5	2	34,6	-1	34,7
0	96,9	3	89,7	3	29,9	0	38,3
1	94,9	4	82,3	4	21,1	1	34,5
2	90,1	5	77,2	5	18,6	2	32,5
3	87,4	6	70,5	6	15,0	3	29,3
4	83,6	7	60,8	7	10,5	4	25,8
5	82,6	8	59,8	8	5,29	5	23,0
6	74,9	9	55,0	9	3,78	6	22,2
7	71,7	10	54,5	10	2,69	7	17,8
8	71,2	11	54,4	11	2,67	8	15,9
9	68,5	12	51,6	12	2,46	9	14,0
10	66,8	13	52,0	13	2,49	10	12,3
11	63,7	14	53,5	14	2,47	11	9,38
12	59,6	15	52,0	15	2,30	12	8,00
13	57,3					13	4,78
14	54,6					14	3,58
15	52,6					15	2,80
16	52,6					16	2,80
17	52,6					17	2,81
18	52,6					18	2,81

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 8

Perfil del detector GP13A/ ²⁴¹Am/887 (gamma)

Horizontal largo

Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor medio (- ¹ s)
-40	53,7
-35	54,3
-34	55,2
-33	57,8
-32	55,8
-31	56,9
-30	56,5
-29	57,2
-28	58,3
-27	57,6
-26	63,2
-25	61,8
-24	60,8
-23	61,2
-22	62,4
-21	66,3
-20	67,4
-19	67,0
-18	70,3
-17	71,4
-16	75,6
-15	76,0
-14	76,7
-13	79,5
-12	199
-11	398
-10	636
-9	844
-8	1052
-7	1279
-6	1534
-5	1707
-4	1948
-3	2046
-2	2285
-1	2330
0	2338

Horizontal largo

1	2325
2	2286
3	2146
4	1920
5	1667
6	1454
7	1220
8	987
9	775
10	577
11	349
12	168
13	82,5
14	73,3
15	72,9
16	72,2
17	70,0
18	71,2
19	65,0
20	63,6
21	60,9
22	62,8
23	62,3
24	60,9
25	59,0
26	60,0
27	58,3
28	60,7
29	59,6
30	57,5
31	56,8
32	57,8
33	44,7
34	55,7
35	56,6
40	55,4

Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-40	59,5
-35	60,5
-34	60,8
-33	57,3
-32	59,9
-31	61,4
-30	60,4
-29	61,5
-28	61,8
-27	61,9
-26	63,3
-25	63,7
-24	65,7
-23	66,2
-22	67,8
-21	66,7
-20	72,5
-19	73,4
-18	71,9
-17	72,4
-16	74,5
-15	77,8
-14	82,0
-13	81,2
-12	88,6
-11	89,4
-10	89,7
-9	98,5
-8	227
-7	519
-6	862
-5	1203
-4	1545
-3	1898
-2	2204
-1	2331
0	2338

1	2337
2	2203
3	1994
4	1553
5	1202
6	856
7	514
8	228
9	101
10	89,0
11	88,8
12	87,5
13	82,5
14	81,0
15	77,8
16	75,2
17	71,6
18	70,4
19	70,8
20	69,8
21	66,7
22	66,8
23	65,5
24	65,1
25	63,8
26	63,3
27	62,4
28	62,2
29	61,3
30	61,3
31	57,7
32	58,7
33	56,9
34	60,5
35	56,7
40	60,9

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 9

Perfil del detector GP13A/ ⁵⁷Co/890 (gamma)

Horizontal largo

Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-50	68,4
-45	68,5
-40	78,2
-35	79,7
-34	81,6
-33	82,6
-32	83,9
-31	66,4
-30	92,3
-29	96,7
-28	98,8
-27	101
-26	104
-25	108
-24	119
-23	125
-22	131
-21	139
-20	149
-19	168
-18	176
-17	196
-16	215
-15	255
-14	302
-13	456
-12	808
-11	1470
-10	2206
-9	3056
-8	3889
-7	4683
-6	5469
-5	6273
-4	7029
-3	7692
-2	8069
-1	8225
0	8245

Horizontal largo

1	8184
2	7606
3	7459
4	6789
5	6013
6	5283
7	4438
8	3669
9	2840
10	2130
11	1408
12	780
13	449
14	299
15	238
16	200
17	178
18	166
19	152
20	140
21	129
22	126
23	118
24	110
25	105
26	102
27	97,5
28	97,0
29	93,6
30	90,6
31	90,9
32	90,0
33	87,9
34	82,6
35	82,3
40	78,0
45	68,6
50	69,0

Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-50	69,9
-45	75,5
-40	80,4
-35	85,5
-34	88,9
-33	91,6
-32	94,2
-31	96,0
-30	97,8
-29	118
-28	104
-27	110
-26	113
-25	118
-24	122
-23	127
-22	129
-21	139
-20	146
-19	156
-18	166
-17	179
-16	194
-15	208
-14	221
-13	261
-12	283
-11	333
-10	421
-9	628
-8	1223
-7	2234
-6	3338
-5	4522
-4	5606
-3	6699
-2	7579
-1	8380
0	8517

1	8092
2	7591
3	6668
4	5608
5	4526
6	3331
7	2232
8	1227
9	630
10	421
11	339
12	288
13	257
14	229
15	212
16	192
17	179
18	166
19	154
20	148
21	138
22	131
23	127
24	121
25	119
26	113
27	109
28	103
29	100
30	96,8
31	95,6
32	94,3
33	91,7
34	88,9
35	86,1
40	80,5
45	75,6
50	69,9

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

Tabla 10

Perfil del detector GP13A/ ¹³⁷Cs/889 (gamma)

Horizontal largo		Horizontal largo			
Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor Medio (⁻¹ s)	Distancia de el origen en (cm)	¹ Valor Medio (⁻¹ s)		
-20	56,0	-25	56,5	14	64,6
-19	56,9	-24	57,8	15	64,1
-18	58,1	-23	57,1	16	62,7
-17	57,7	-22	57,5	17	63,7
-16	57,7	-21	57,7	18	60,4
-15	58,9	-20	58,5	19	59,7
-14	60,1	-19	59,3	20	58,7
-13	65,8	-18	60,4	21	59,4
-12	76,8	-17	63,4	22	56,5
-11	83,8	-16	62,5	23	57,1
-10	99,5	-15	63,9	24	57,4
-9	119	-14	64,2	25	55,8
-8	129	-13	68,2		
-7	150	-12	70,1		
-6	161	-11	70,2		
-5	174	-10	72,5		
-4	190	-9	76,2		
-3	205	-8	92,4		
-2	209	-7	108		
-1	217	-6	127		
0	218	-5	149		
1	218	-4	168		
2	209	-3	187		
3	205	-2	204		
4	190	-1	212		
5	175	0	217		
6	160	1	212		
7	150	2	203		
8	130	3	188		
9	121	4	168		
10	101	5	150		
11	83,7	6	128		
12	77,1	7	109		
13	66,3	8	92,4		
14	60,8	9	76,4		
15	59,0	10	72,2		
16	57,9	11	70,4		
17	57,9	12	70,3		
18	58,3	13	67,9		
19	57,4				
20	56,4				

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

Tabla 11

Perfil del detector GP13A/ ⁹⁰Sr/435 (beta)

Horizontal largo		Horizontal largo	
Distancia desde el origen en (cm)	¹ Valor medio (- ¹ s)	Distancia desde el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-20	53,4	-15	52,4
-19	54,1	-14	52,2
-18	53,0	-13	53,6
-17	54,1	-12	58,6
-16	52,8	-11	58,1
-15	54,6	-10	59,2
-14	60,3	-9	64,3
-13	61,1	-8	103
-12	97,0	-7	210
-11	174	-6	340
-10	259	-5	452
-9	348	-4	560
-8	432	-3	702
-7	514	-2	818
-6	592	-1	837
-5	668	0	887
-4	758	1	879
-3	829	2	837
-2	877	3	719
-1	881	4	601
0	885	5	483
1	882	6	352
2	882	7	219
3	829	8	115
4	760	9	64,3
5	675	10	58,8
6	599	11	57,9
7	514	12	58,2
8	438	13	58,2
9	351	14	54,2
10	257	15	54,1
11	177		
12	98,6		
13	70,7		
14	56,4		
15	53,8		
16	53,8		
17	53,3		
18	52,6		
19	51,9		
20	53,2		

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

Tabla 12

Perfil del detector GP13A/ ³⁶Cl/433 (beta)

Horizontal largo		Horizontal largo	
Distancia desde el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)	Distancia desde el origen en (cm)	¹ Valor Medio (- ¹ s)
-17	53,3	-15	53,7
-16	51,4	-14	55,7
-15	53,0	-13	53,9
-14	51,9	-12	52,9
-13	53,5	-11	55,1
-12	84,8	-10	55,2
-11	118	-9	54,1
-10	147	-8	64,4
-9	173	-7	116
-8	207	-6	168
-7	234	-5	209
-6	267	-4	267
-5	301	-3	309
-4	338	-2	359
-3	357	-1	373
-2	375	0	377
-1	376	1	371
0	376	2	361
1	375	3	307
2	376	4	259
3	353	5	212
4	341	6	166
5	296	7	113
6	258	8	71,1
7	227	9	53,6
8	201	10	55,1
9	167	11	54,1
10	127	12	55,1
11	98,1	13	54,0
12	65,6	14	55,3
13	52,0	15	54,0
14	52,3		
15	51,9		
16	52,2		
17	52,5		

¹El valor medio de la tasa de conteo no está corregido al fondo

FIGURA 5

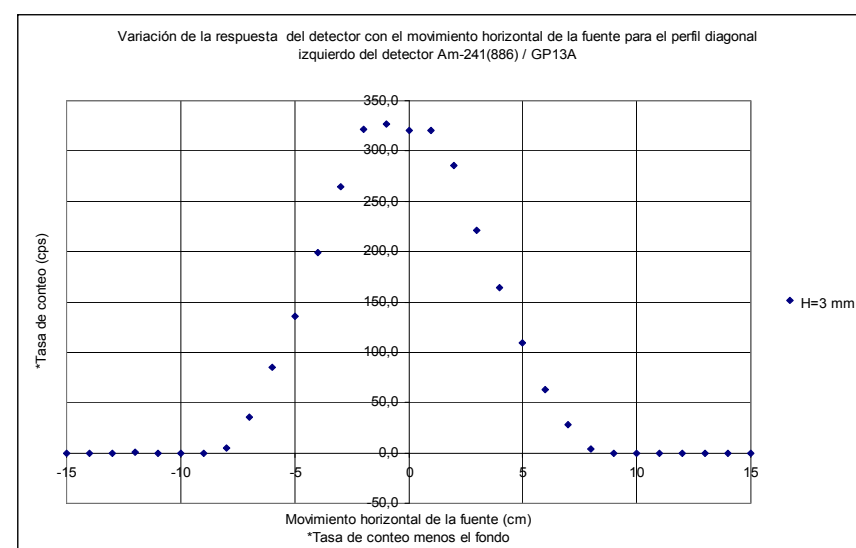
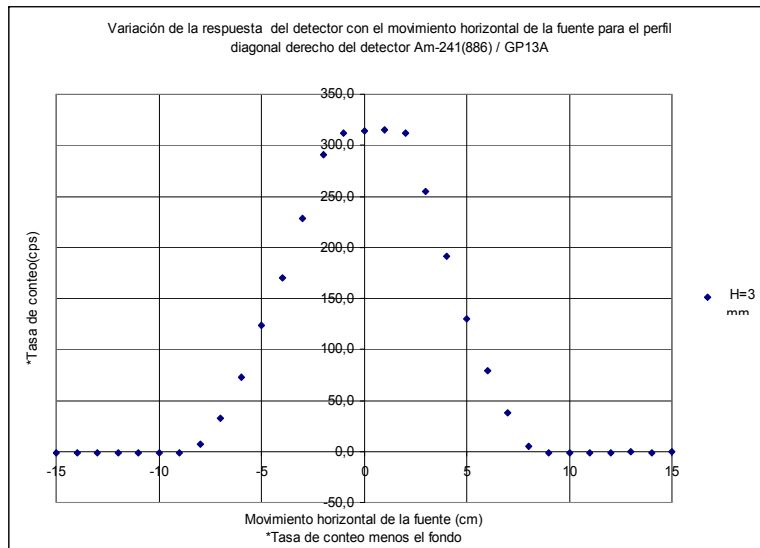
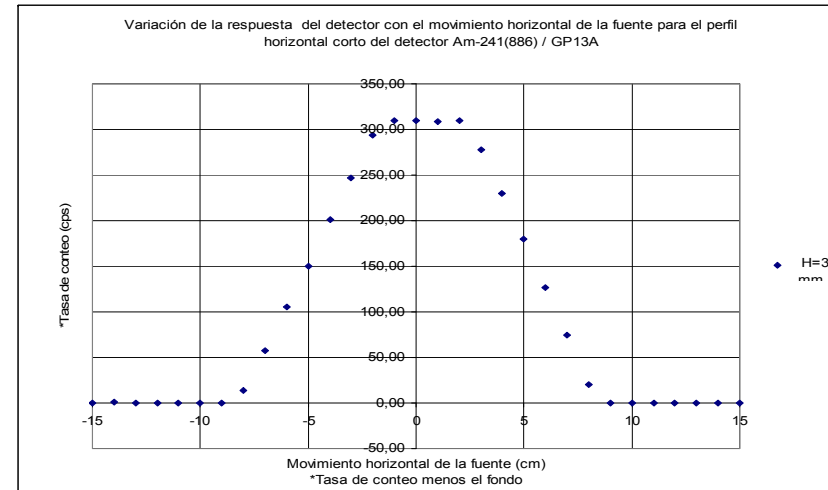
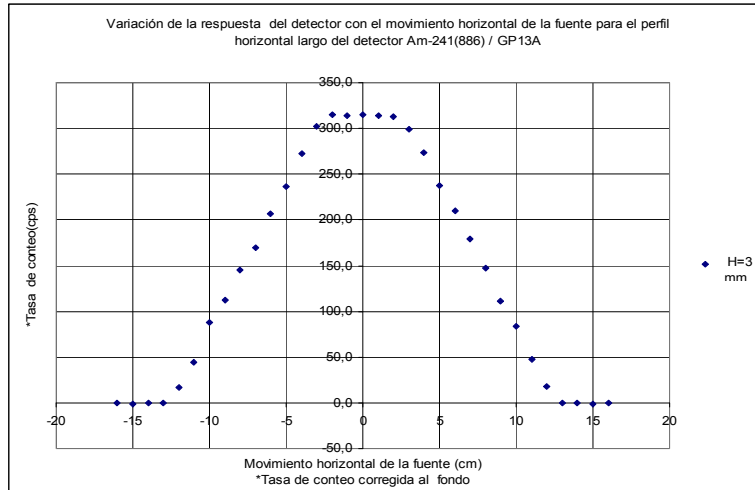


FIGURA 6

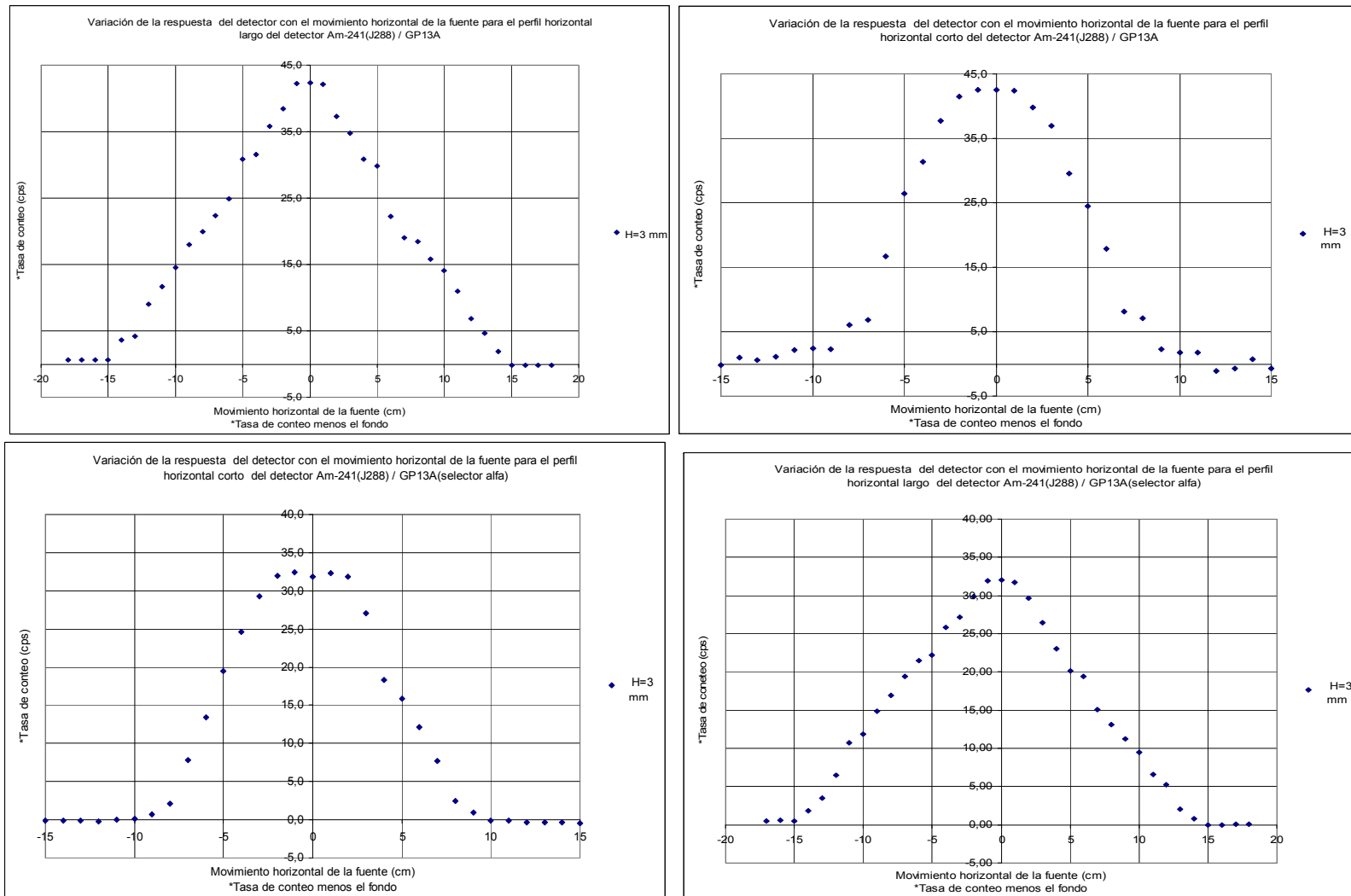


FIGURA 7

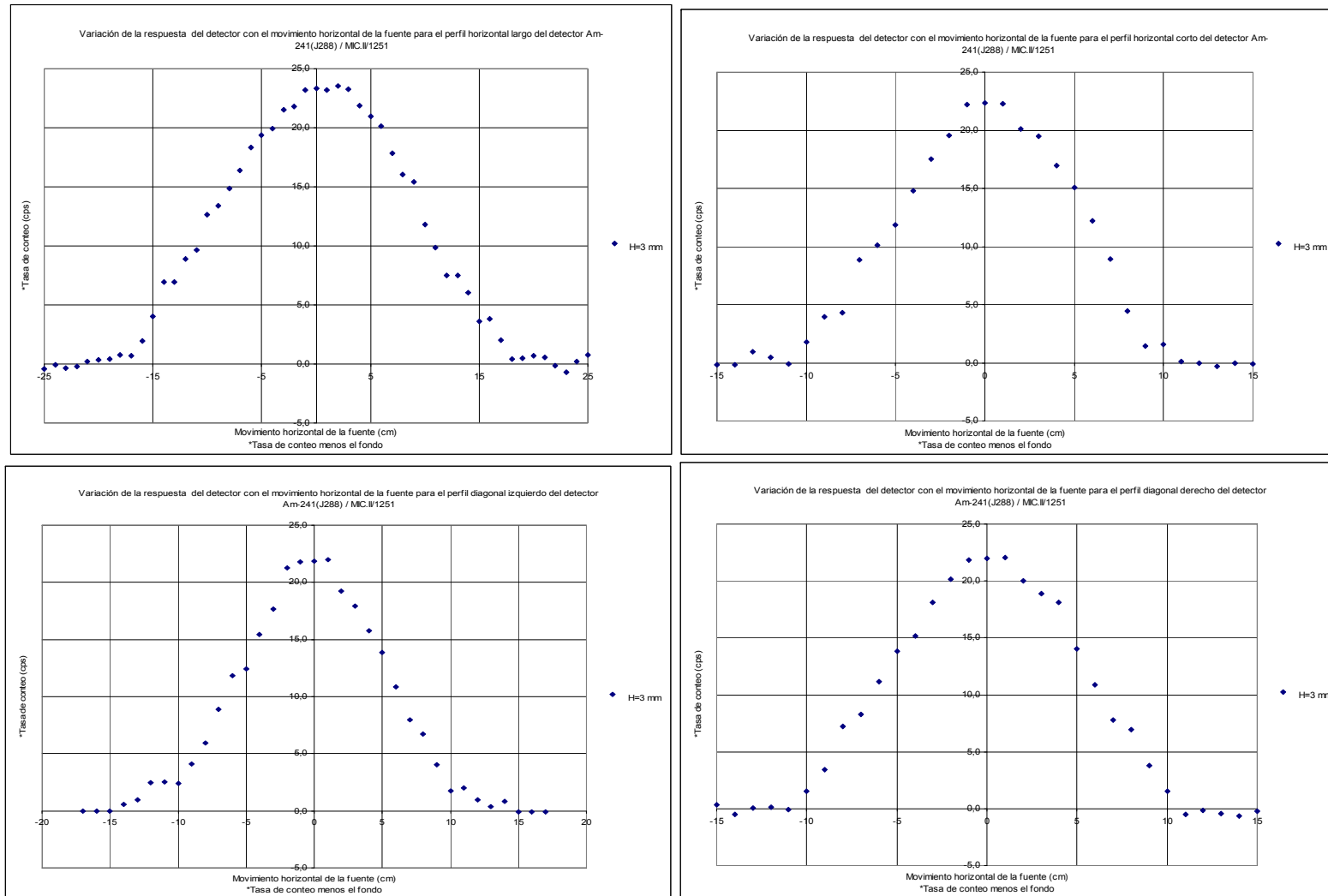


FIGURA 8

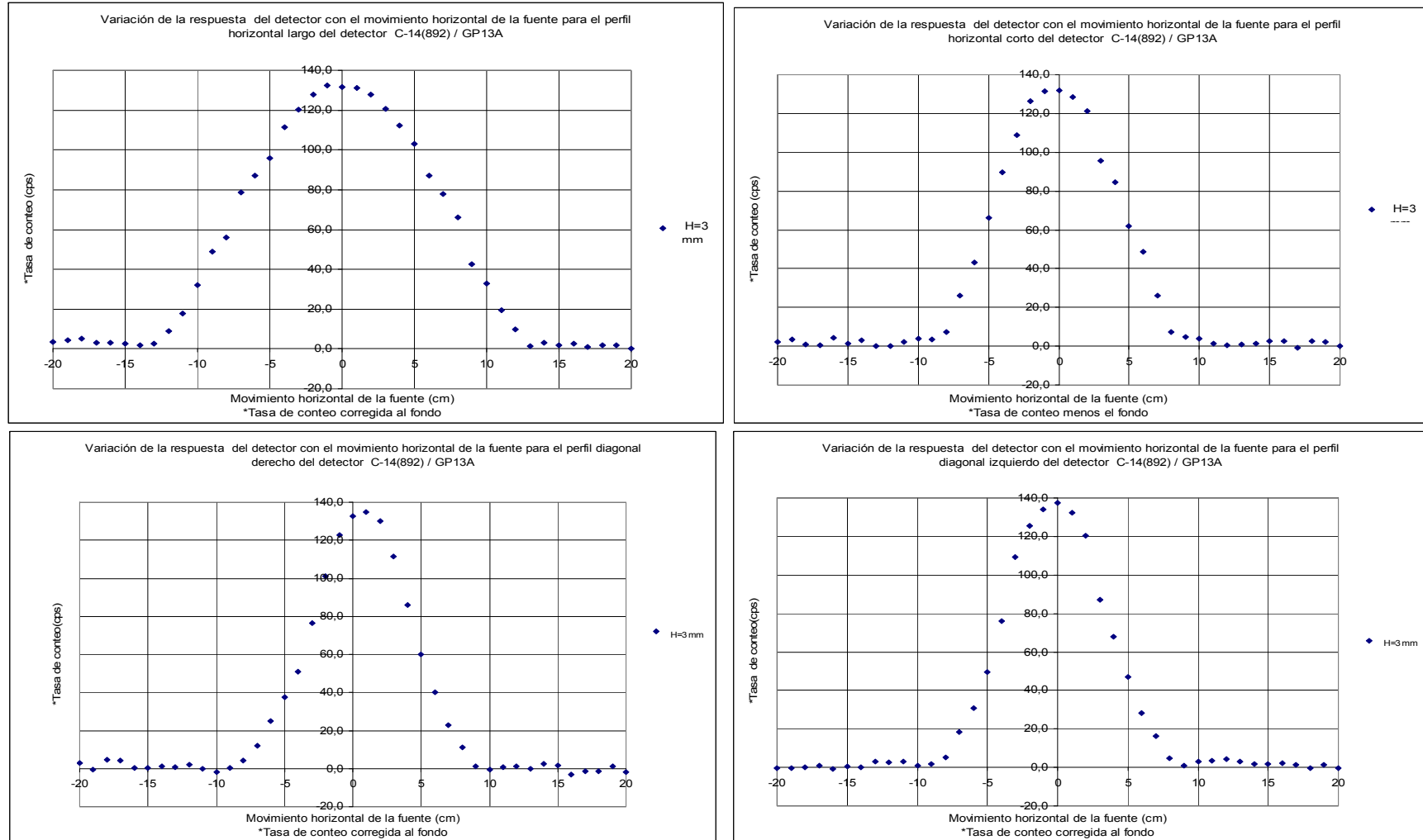


FIGURA 9

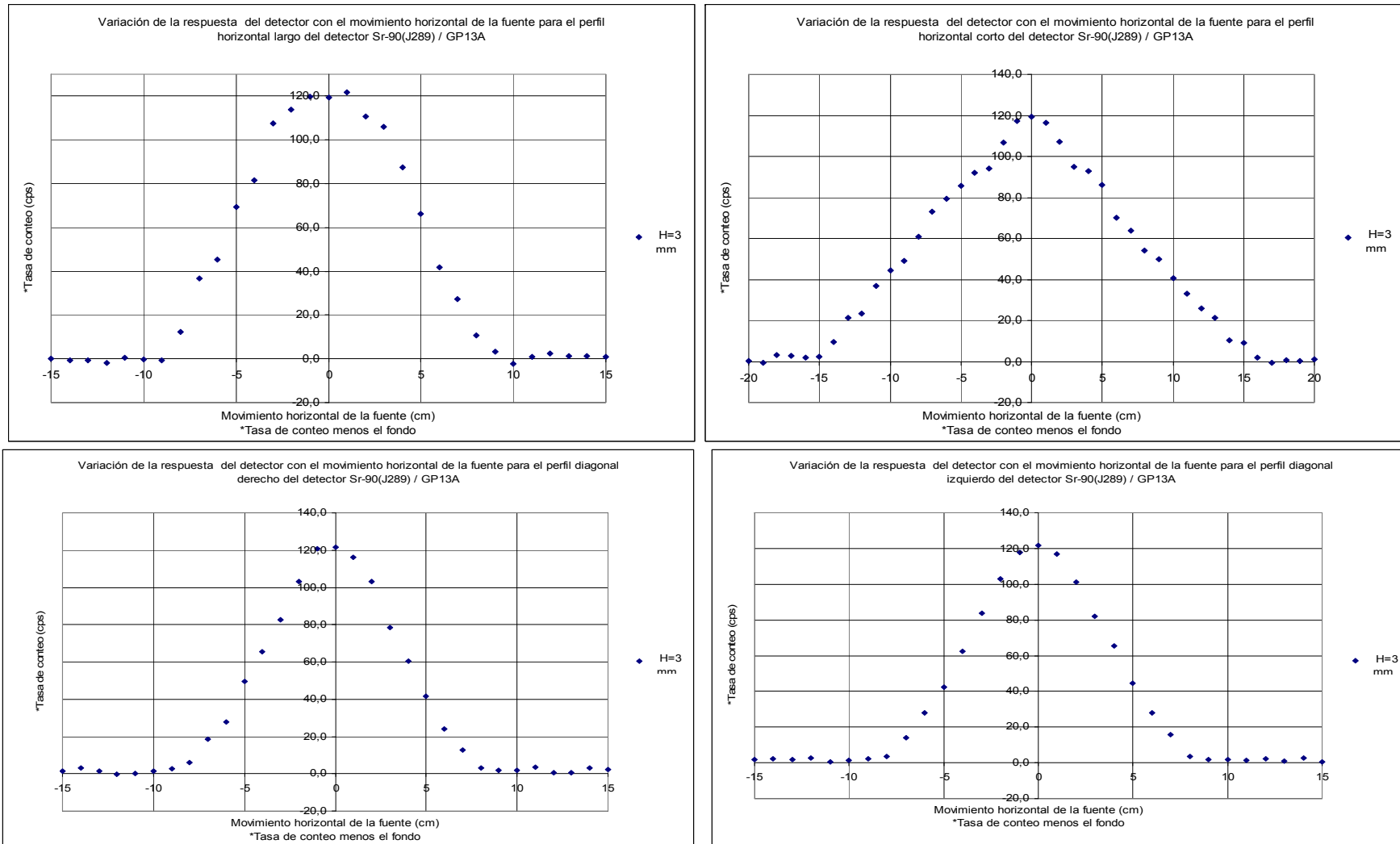


FIGURA 10

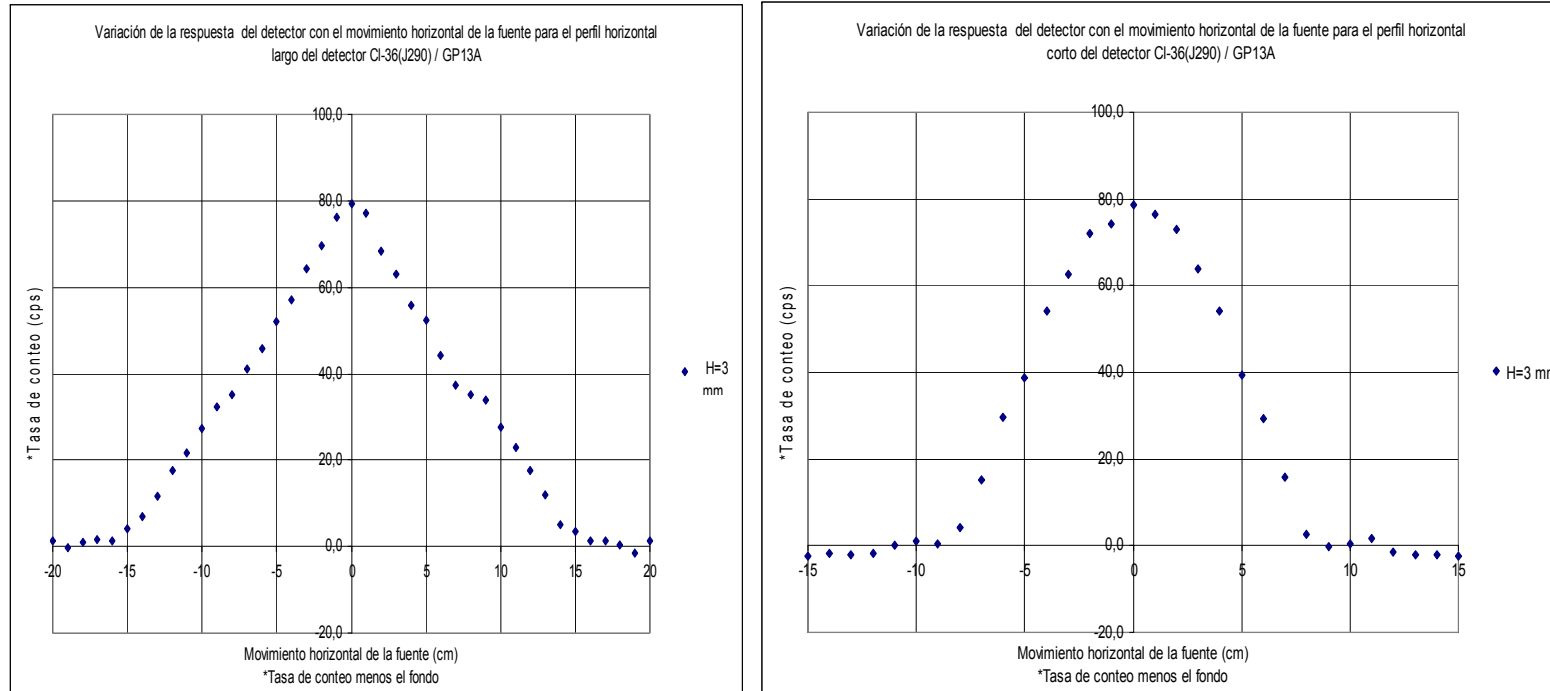


FIGURA 11

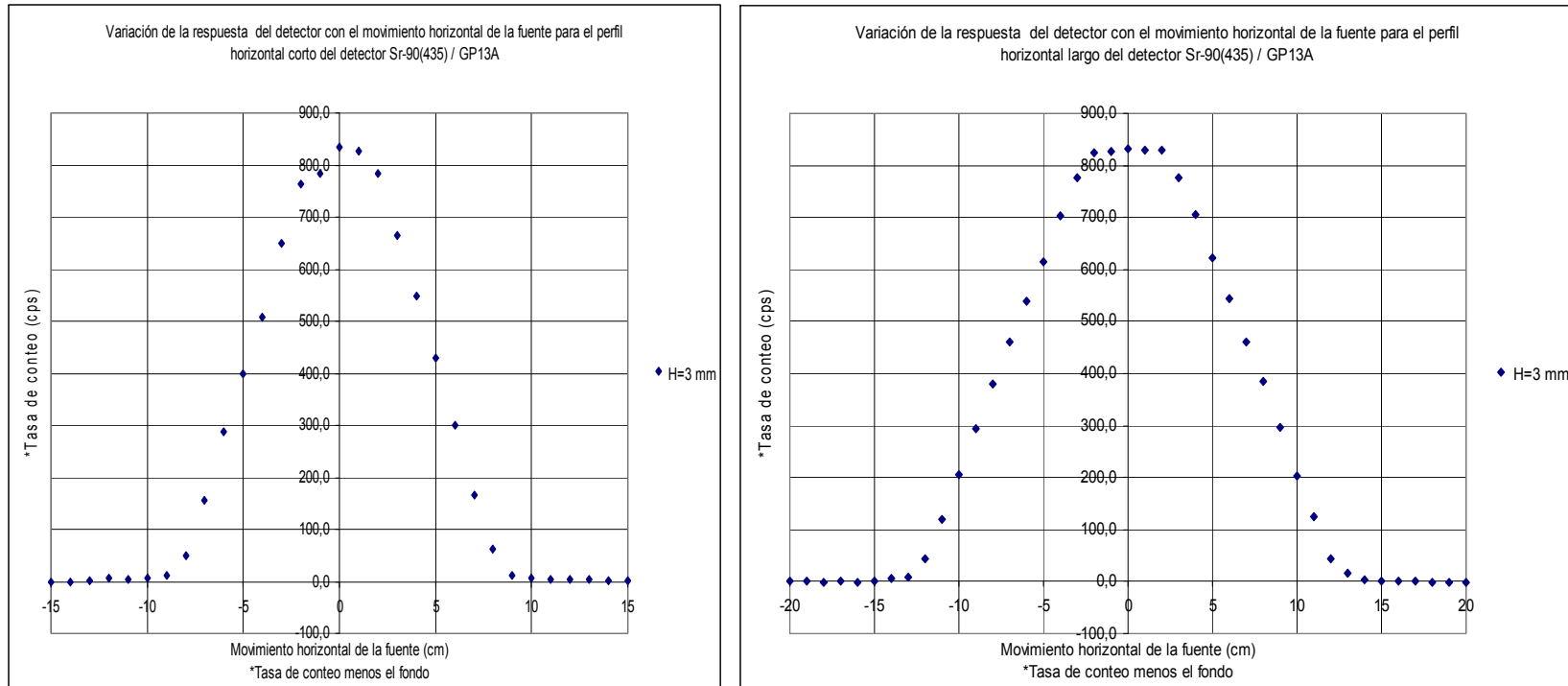


FIGURA 12

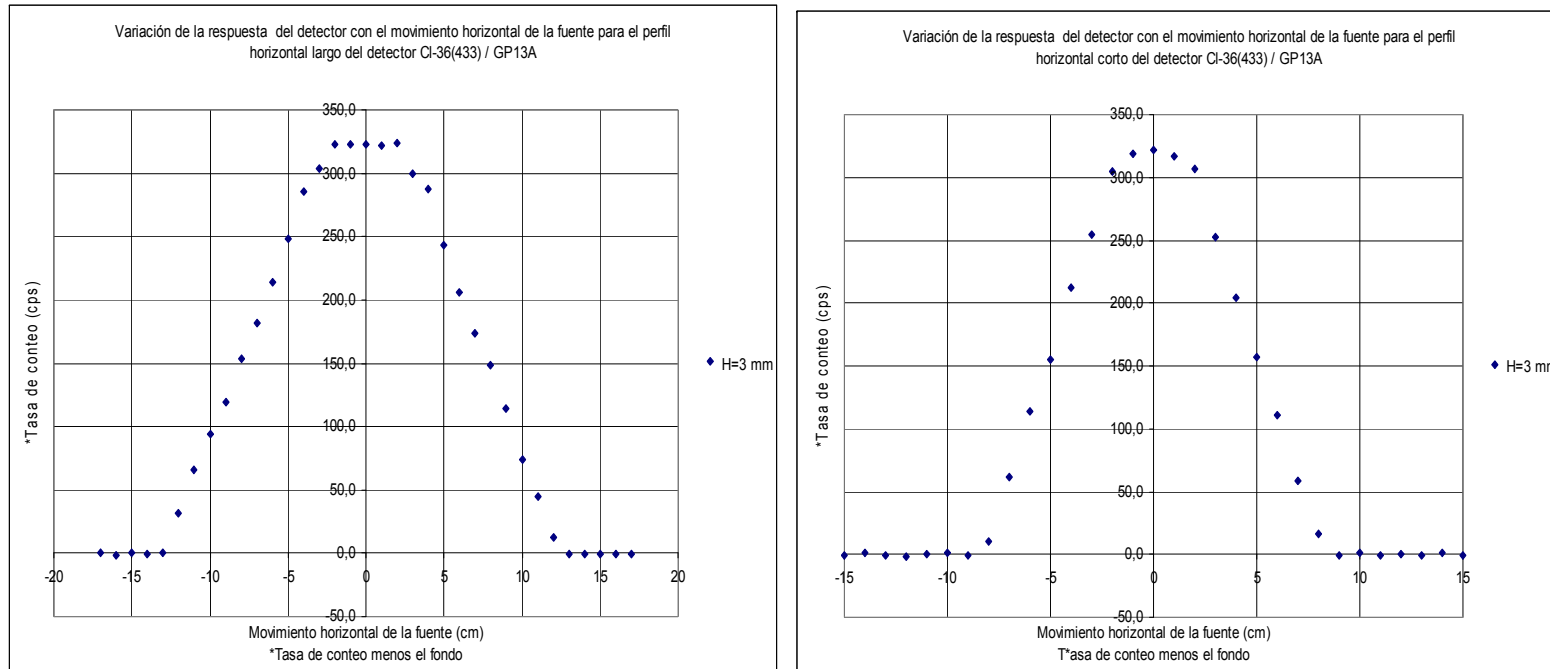


FIGURA 13

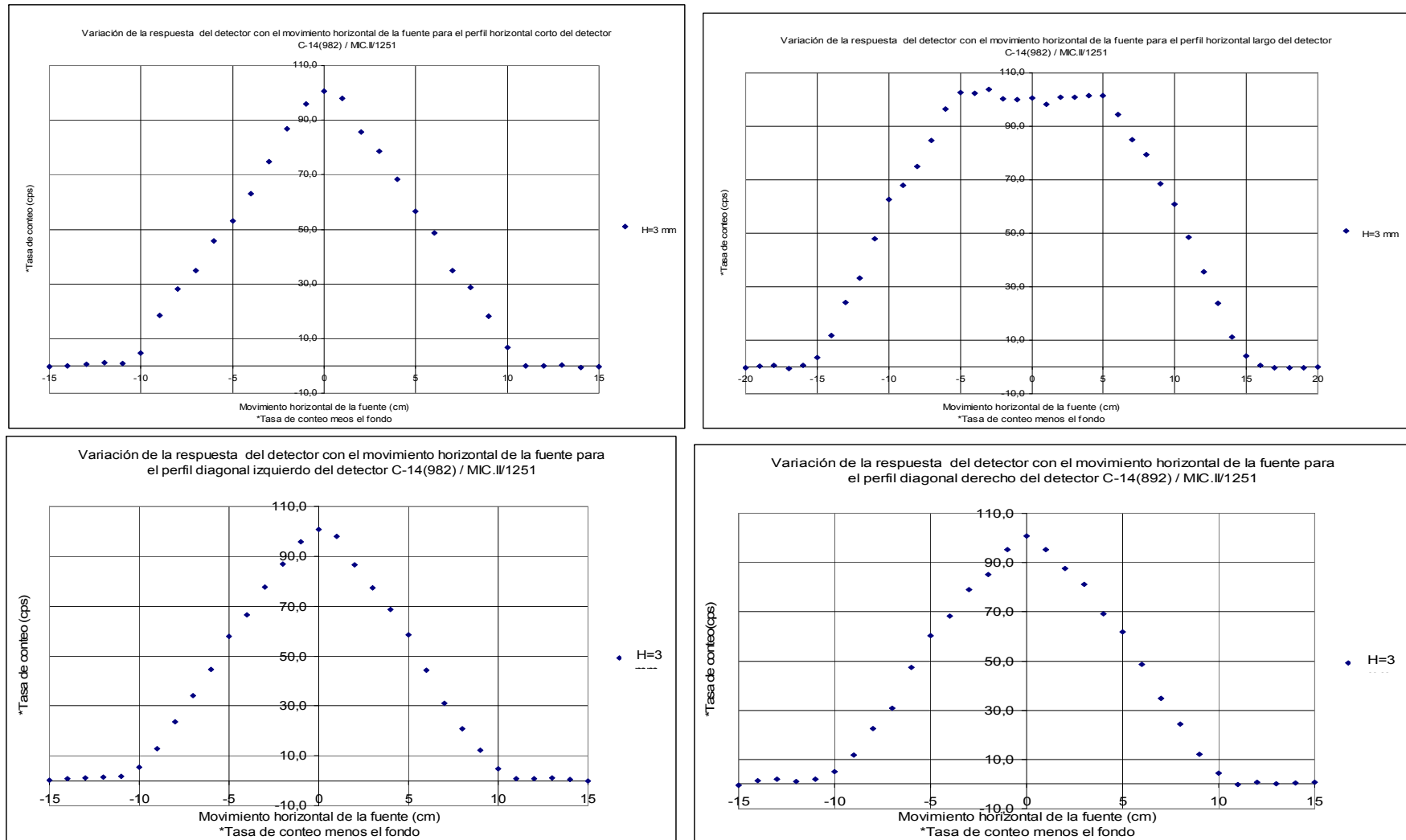


FIGURA 14

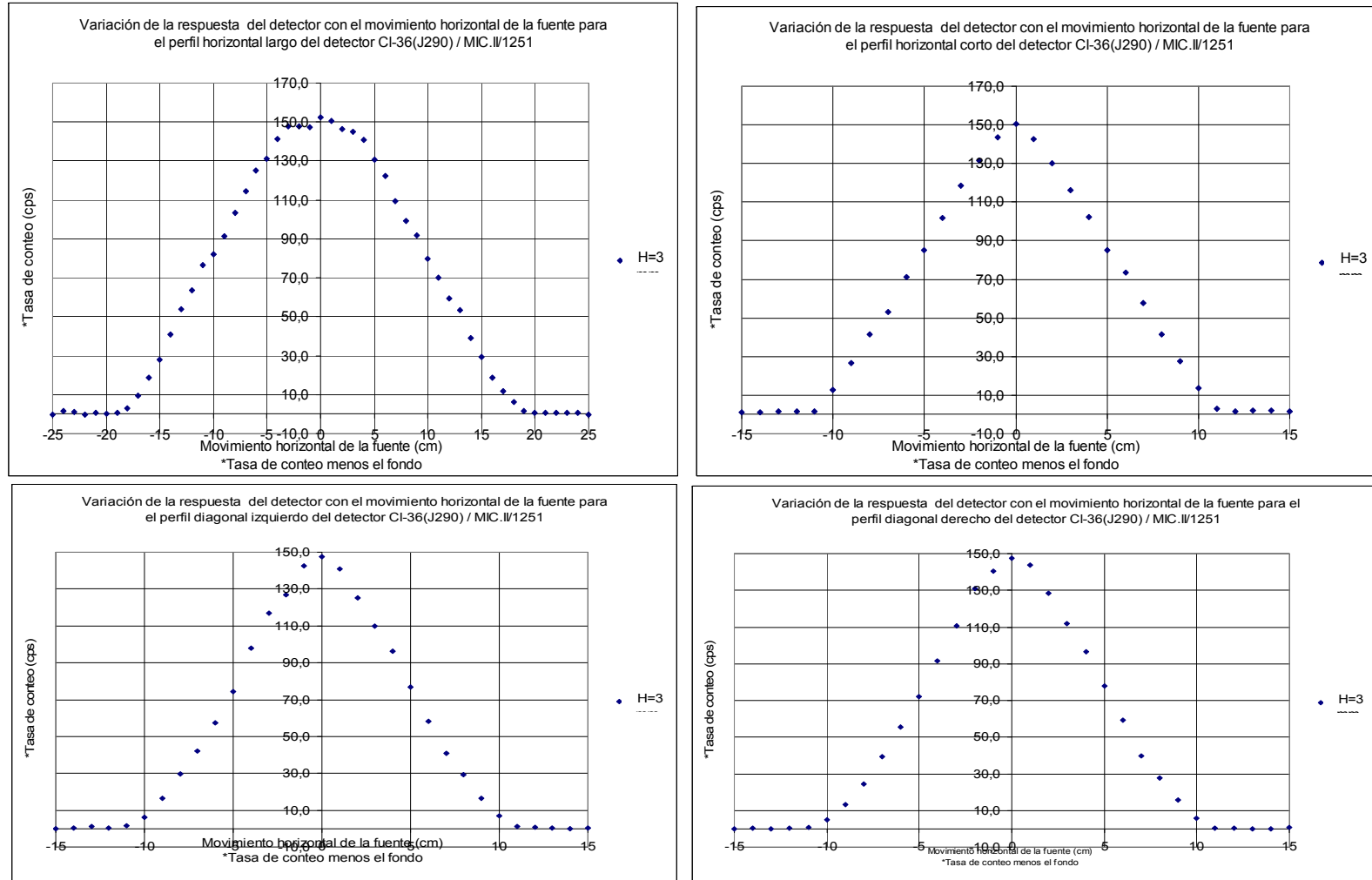


FIGURA 15

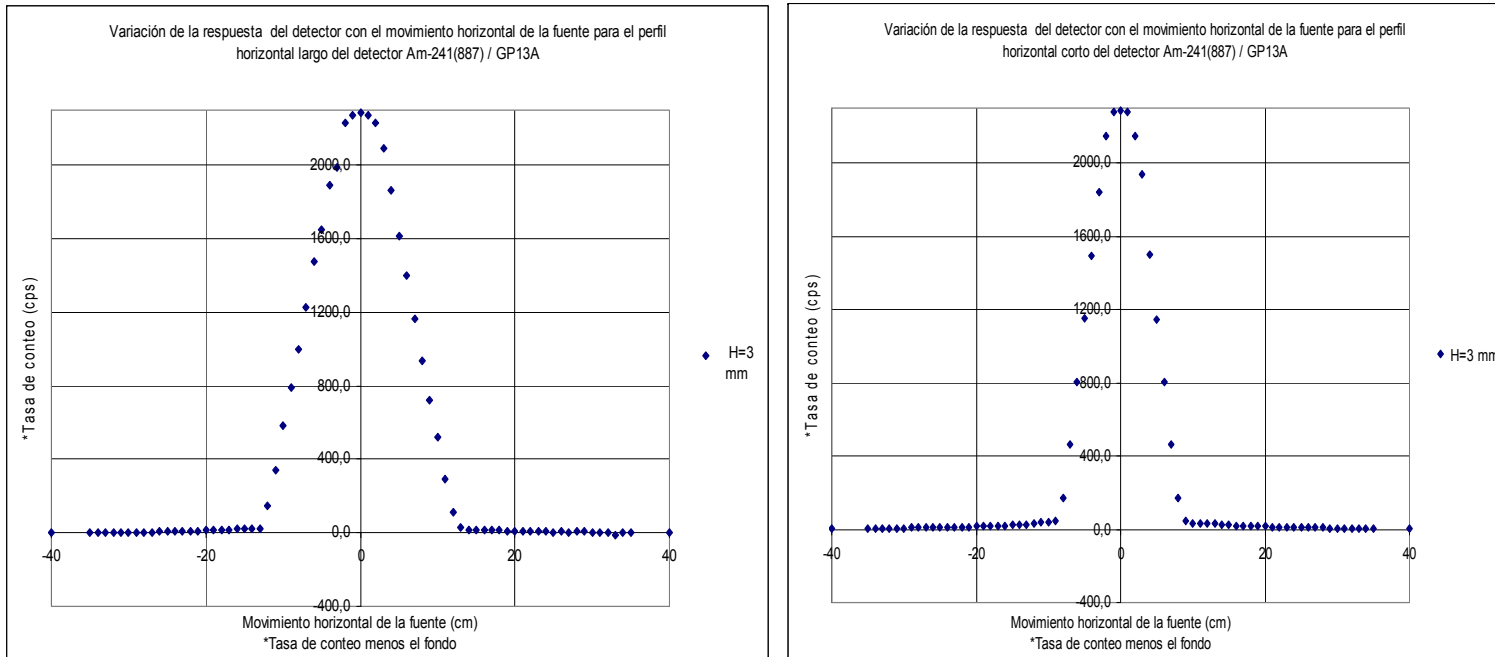


FIGURA 16

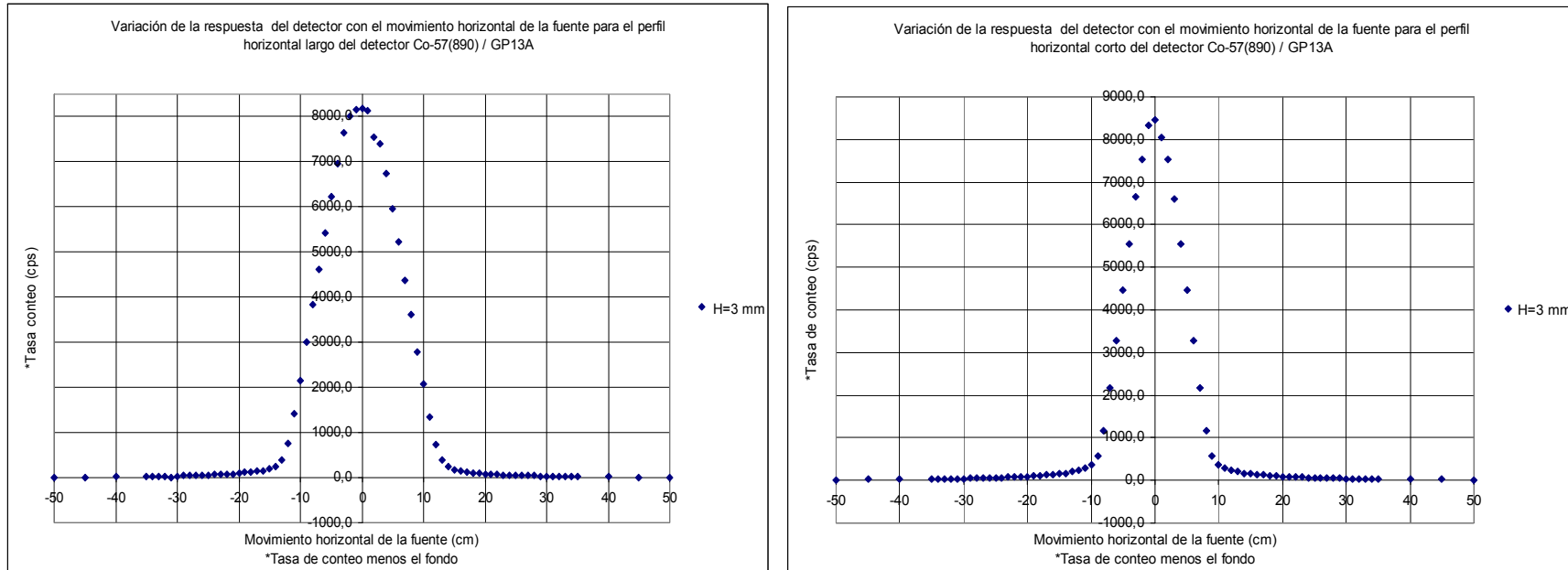


FIGURA 17

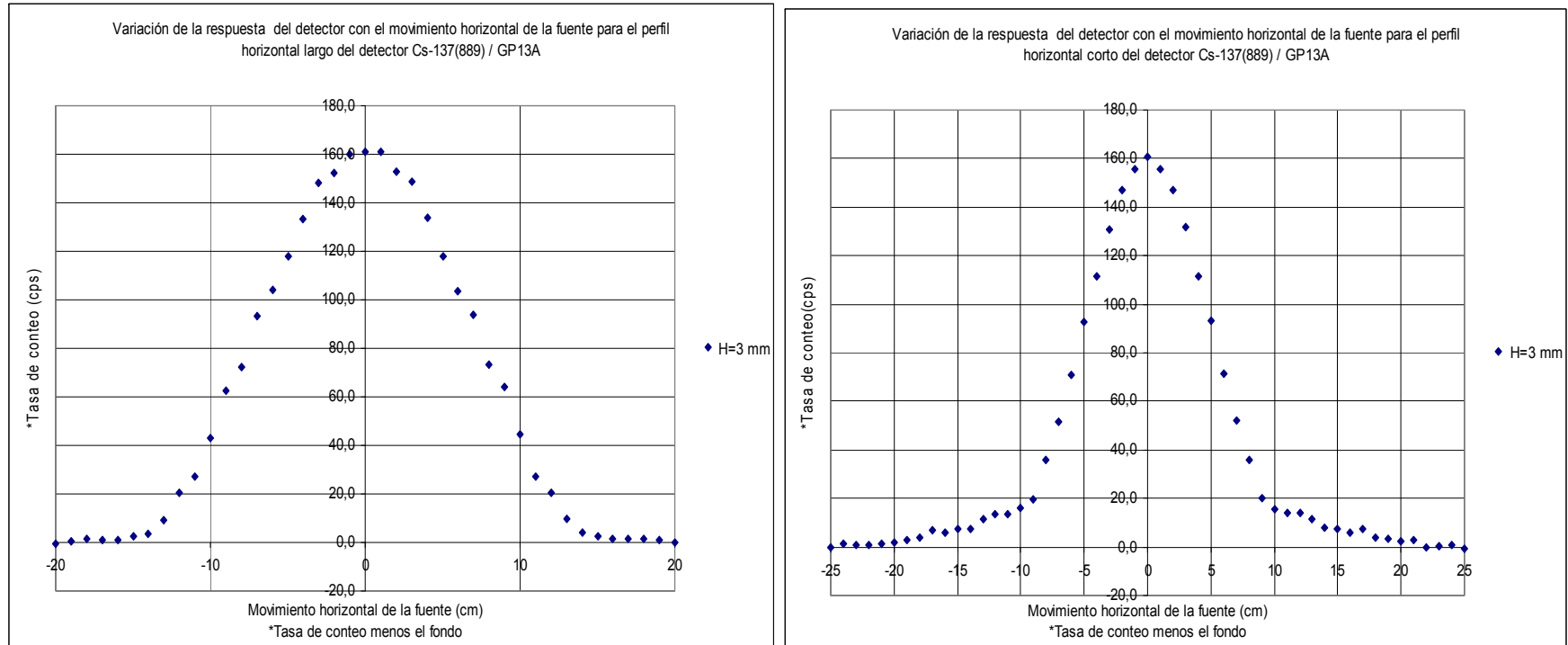


FIGURA 18

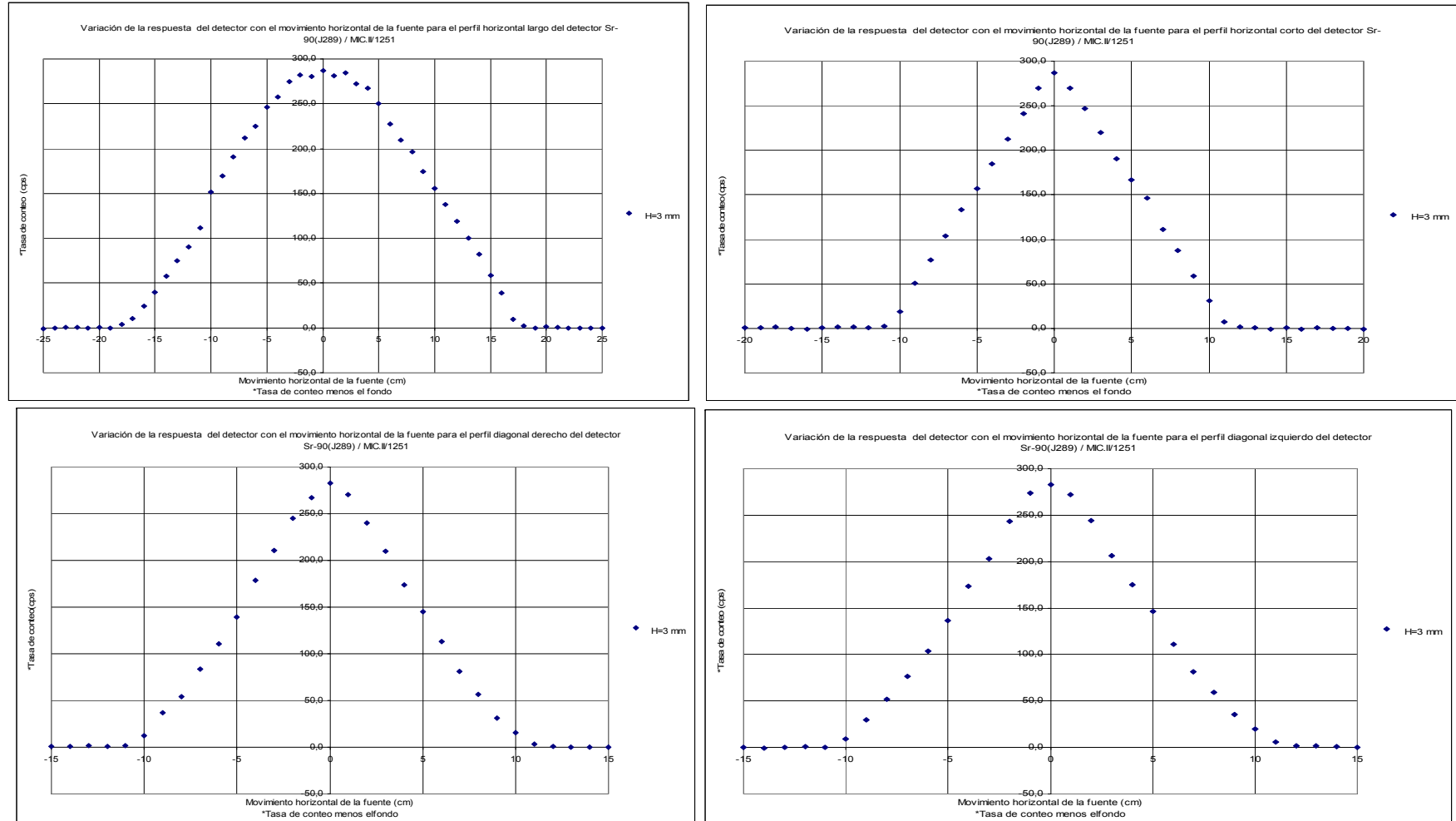


FIGURA 19

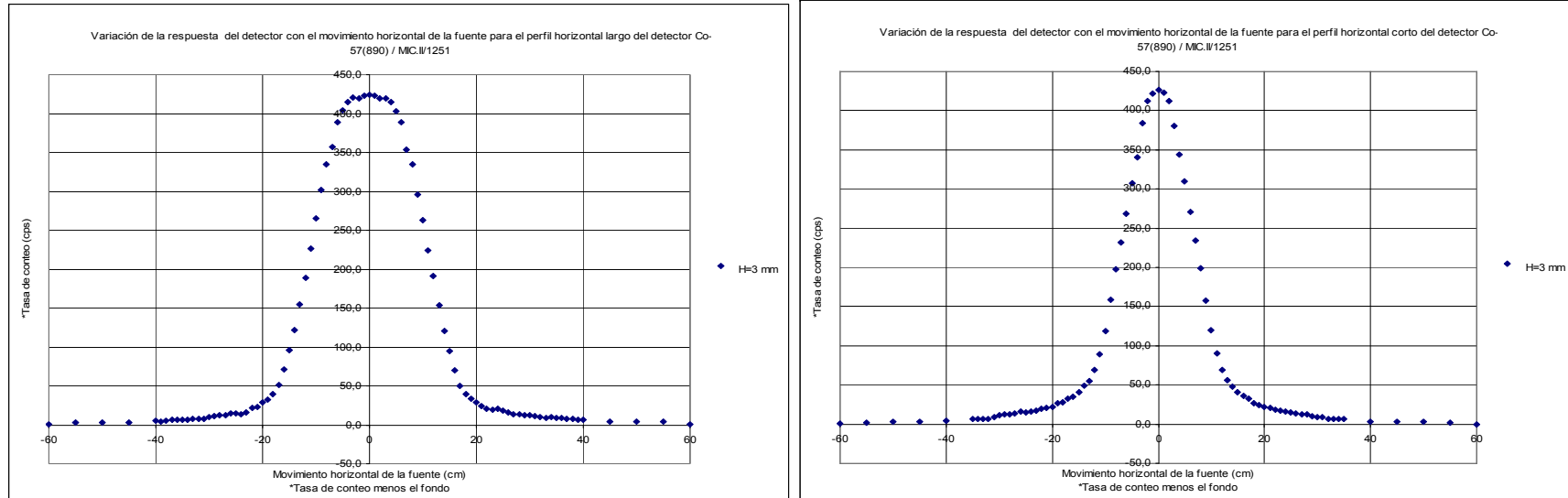


FIGURA 20

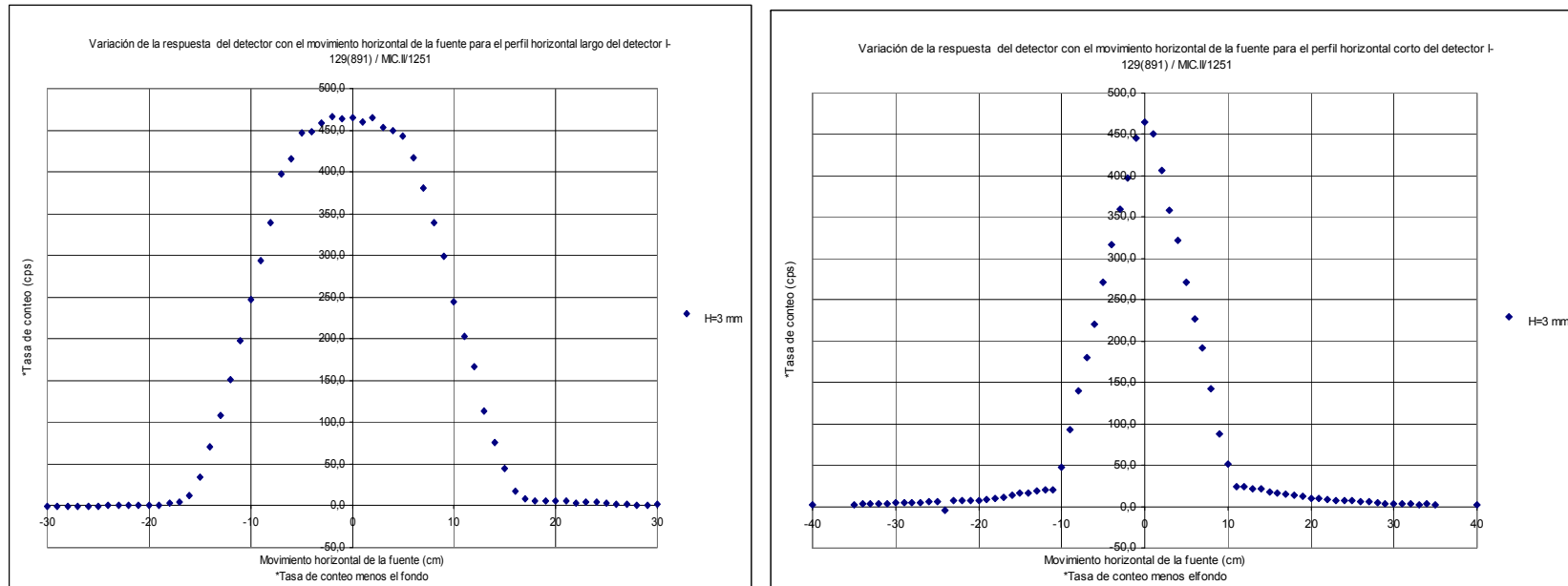


FIGURA 21

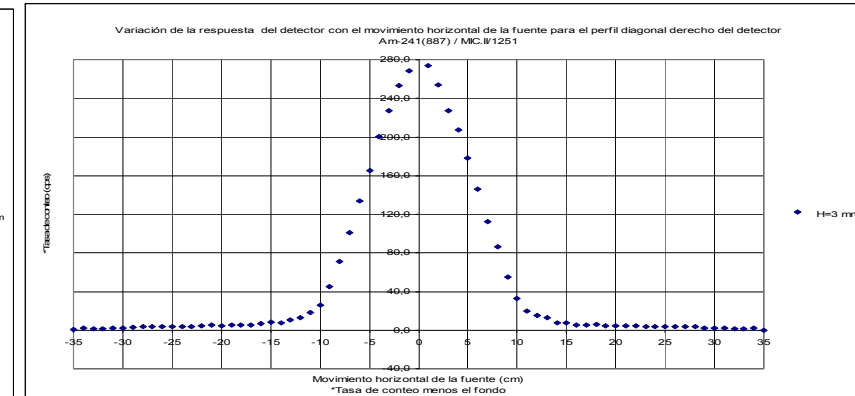
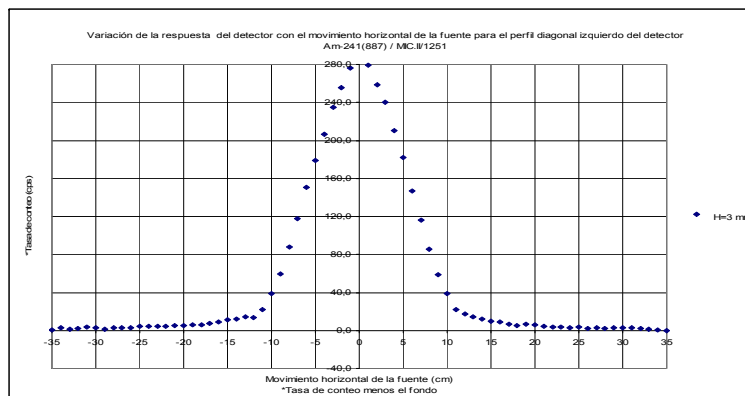
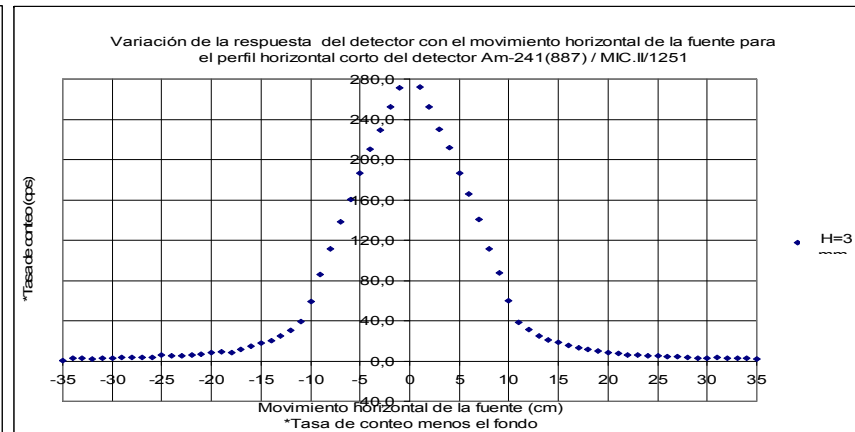
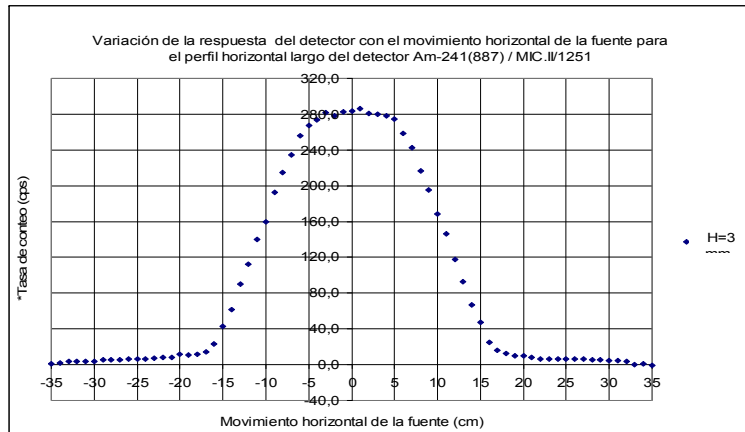
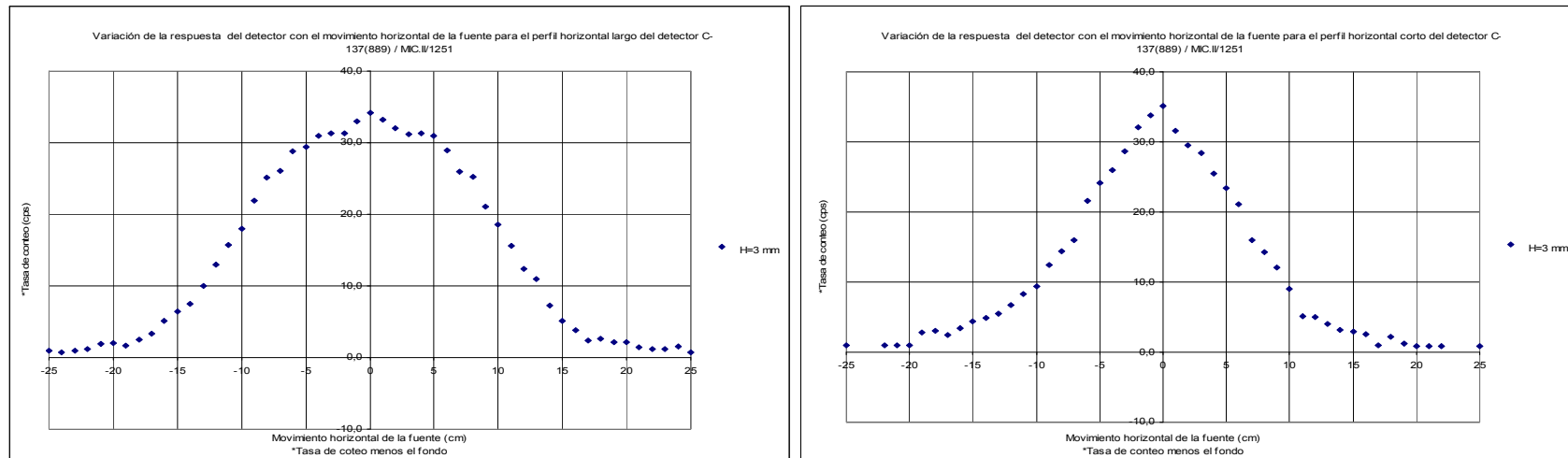
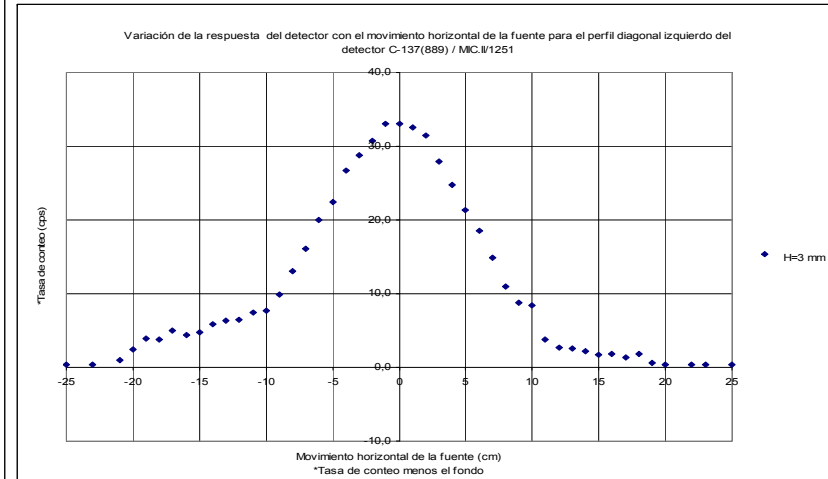
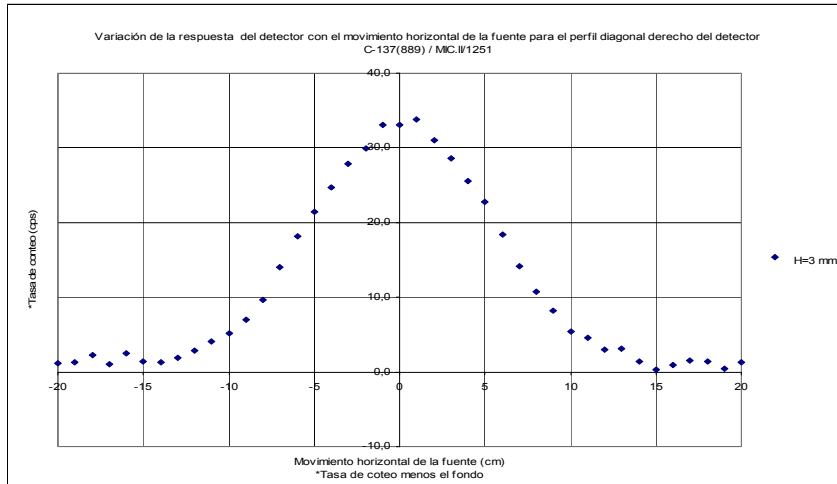


FIGURA 22





3.3 Resultado del estudio de uniformidad de las fuentes

La uniformidad de las fuentes de referencias se determinó según ISO 8769-1^[33] y 8769-2^[34] “la desviación estándar de las mediciones calculada de la porción individual sobre el valor medio por la superficie total expresada como un porcentaje del valor medio” donde la porción de la fuente medida es igual a un área no mayor de 10 cm². Se requiere que la uniformidad de dicha fuente en términos de tasa de emisión superficial no sea superior al $\pm 10\%$.

Para el estudio de la uniformidad de las fuentes se usaron los detectores GP13A, RXE-260 Xenón y el Saphymo Centellante. Las fuentes alfa y beta fueron blindadas con una lámina de acero de iguales dimensiones que la fuente y 3 mm de espesor, suficiente para atenuar la emisión de la fuente y en estas condiciones lograr que la detección esté en el orden del fondo.

Los resultados del estudio de uniformidad de la fuente ²⁴¹Am/886 medida con tres detectores distintos (Tabla 11 - 13) y los resultados obtenidos cumplen con los requisitos de la ISO 8769.

Para las fuentes beta: ⁹⁰Sr /435, ¹⁴C /892 y ³⁶Cl /433 se usaron los mismos detectores que para las alfas y los resultados se muestran en las tablas de la (14 - 22). Todas cumplen con los requisitos de la ISO 8769.

El análisis de varianza es un criterio aceptado para demostrar que no hay diferencias significativas entre las comparadas ISO/REMCO TG 5, ^[27]. Esta prueba consiste en la aplicación de un Fisher para comparar el factor experimental obtenido con el factor tabulado teórico. Si el factor experimental, es menor que el factor tabulado, significa que no hay diferencias significativas entre las muestras para un nivel de confianza del 95 %.

Los resultados del experimento realizado aparecen en los anexos (13 - 24), se corroboró que entre las muestras comparadas, no hay diferencias significativas. Para todas las fuentes analizadas siempre el factor experimental es menor que el teórico. La fuente que tiene menor probabilidad de homogeneidad es la ³⁶Cl medida con el detector GP13A, cuya diferencia entre el factor experimental y el crítico de Fisher es pequeña, pero sigue cumpliendo con el criterio de aceptación.

La homogeneidad de las fuentes gamma no fue determinada, debido a que el espesor del blindaje para atenuar la radiación hasta el orden del fondo radiactivo, superaba varias

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

veces la distancia (fuente - detector) de interés para la calibración; por lo que se decidió no incluirlo dentro de esta investigación.

TABLA 11

Uniformidad de la fuente Am-241(886EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

1	2	3	4	5
1,4%	6,2%	1,7%	2,3%	0,7%
6	7	8	9	10
4,8%	3,4%	1,3%	5,0%	1,3%
11	12	13	14	15
2,4%	1,1%	2,5%	1,0%	3,8%
16	17	18	19	20
3,0%	1,8%	3,0%	4,1%	3,0%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

TABLA 12

Uniformidad de la fuente Am-241(886Mc) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

1	2	3	4	5
3,2%	2,3%	1,7%	2,2%	2,9%
6	7	8	9	10
2,5%	2,6%	1,6%	1,6%	2,5%
11	12	13	14	15
1,3%	2,5%	2,4%	2,2%	2,9%
16	17	18	19	20
1,0%	2,3%	3,1%	2,6%	3,1%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 13

Uniformidad de la fuente Am-241(886Sa) medida con monitor Saphymo detector Centellante

1	2	3	4	5
3,1%	1,0%	3,1%	5,6%	4,1%
6	7	8	9	10
3,6%	2,8%	1,2%	1,3%	1,0%
11	12	13	14	15
1,8%	3,7%	2,9%	2,9%	1,8%
16	17	18	19	20
3,7%	3,4%	1,6%	6,8%	2,2%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

TABLA 14

Uniformidad de la fuente ⁹⁰Sr(435EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

1	2	3	4	5
0,9%	0,6%	1,9%	1,0%	1,5%
6	7	8	9	10
1,4%	0,9%	0,9%	1,9%	1,3%
11	12	13	14	15
0,6%	1,6%	1,5%	1,3%	2,0%
16	17	18	19	20
0,4%	1,2%	1,8%	1,4%	0,7%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 15

Uniformidad de la fuente ^{14}C (892EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

1	2	3	4	5
2,1%	1,6%	0,8%	1,9%	1,8%
6	7	8	9	10
1,2%	1,6%	1,0%	1,4%	1,0%
11	12	13	14	15
1,9%	1,0%	1,6%	0,8%	2,1%
16	17	18	19	20
3,0%	0,7%	2,7%	1,4%	2,3%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

TABLA 16

Uniformidad de la fuente CI-36(433EL) medida con monitor Electra y detector GP13A

1	2	3	4	5
1,1%	0,9%	1,4%	1,6%	0,8%
6	7	8	9	10
1,6%	0,7%	0,5%	0,7%	0,8%
11	12	13	14	15
1,3%	1,7%	0,9%	1,1%	0,4%
16	17	18	19	20
1,8%	1,6%	1,8%	0,8%	1,0%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 17

Uniformidad de la fuente Sr-90(435MC) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

1	2	3	4	5
1,1%	0,6%	0,8%	0,7%	1,2%
6	7	8	9	10
1,6%	1,8%	1,4%	1,4%	2,0%
11	12	13	14	15
1,8%	1,9%	0,9%	1,0%	1,2%
16	17	18	19	20
1,4%	1,2%	0,9%	1,4%	0,8%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

TABLA 18

Uniformidad de la fuente C-14(892MC) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

1	2	3	4	5
1,2%	3,7%	1,9%	3,9%	3,7%
6	7	8	9	10
3,9%	0,8%	4,6%	4,1%	2,3%
11	12	13	14	15
3,6%	4,4%	3,9%	3,2%	4,8%
16	17	18	19	20
2,6%	4,0%	3,3%	2,3%	4,1%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 19

Uniformidad de la fuente ^{137}Cs (433Mc) medida con monitor Microcont II y detector RXE-260 Xenón

1	2	3	4	5
2,7%	0,9%	4,2%	0,9%	4,4%
6	7	8	9	10
2,6%	2,9%	2,5%	1,9%	1,6%
11	12	13	14	15
2,3%	0,5%	3,1%	2,3%	1,5%
16	17	18	19	20
2,1%	0,8%	0,8%	1,8%	1,5%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

TABLA 20

Uniformidad de la fuente ^{60}Co (492Sa) medida con monitor Saphymo y detector Centellante

1	2	3	4	5
1,7%	1,1%	2,9%	2,9%	5,5%
6	7	8	9	10
1,3%	1,3%	1,0%	1,0%	1,6%
11	12	13	14	15
1,3%	1,6%	4,0%	2,5%	2,6%
16	17	18	19	20
1,5%	3,9%	5,1%	2,2%	2,4%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 21

Uniformidad de la fuente ^{43}Ca (433Sa) medida con monitor Saphymo y detector Centellante

1	2	3	4	5
1,1%	1,8%	1,1%	0,9%	1,7%
6	7	8	9	10
2,5%	1,3%	1,4%	1,4%	1,1%
11	12	13	14	15
1,1%	0,9%	1,3%	0,8%	0,7%
16	17	18	19	20
1,4%	3,4%	1,0%	1,5%	0,9%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

TABLA 22

Uniformidad de la fuente ^{90}Sr (435Sa) medida con monitor Saphymo y detector Centellante

1	2	3	4	5
1,1%	0,4%	0,8%	0,8%	0,9%
6	7	8	9	10
1,3%	1,2%	1,2%	1,5%	0,3%
11	12	13	14	15
1,4%	0,3%	1,0%	0,5%	1,0%
16	17	18	19	20
0,9%	1,2%	0,9%	1,0%	1,1%

Uniformidad de la fuente en expresada en %

*Las celdas impares pertenecen a la rotación de la fuente a 0°

*Las celdas pares pertenecen a la rotación de la fuente a 90°

3.4 Resultados del cálculo de la eficiencia de los detectores

Se calculó la eficiencia de los cinco instrumentos que se usaron durante el desarrollo de la tesis, para tres distancias diferentes: 0; 3 y 10 mm y con cada una de las fuentes. Los resultados aparecen reflejados en las tablas de la (23 – 27). Para la calibración de los monitores la distancia de referencia recomendada internacionalmente es de 3 mm. En las tablas antes mencionadas se hace una comparación con las otras eficiencias calculadas.

Dependencia de la eficiencia con la posición relativa fuente - detector

Emisores alfa

En la tabla 23 para el Electra con detector GP13A centellante con fuente de ^{241}Am alfa se observa que al aumentar la distancia relativa entre ambos disminuye sensiblemente la eficiencia y la diferencia en % con relación a la de referencia es casi el doble; por lo que el posicionamiento para los radionucleidos emisores de radiación alfa es fundamental en el resultado de la eficiencia y muy influyente en dicho resultado. Se sabe que las partículas se atenúan rápidamente en su interacción con las partículas del aire, esto es debido al poco alcance de sus electrones.

Emisores beta

Para la fuentes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ y ^{36}Cl las diferencias no pasan del 6 % en todos los detectores usados, excepto para la eficiencia de la fuente de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ medida con CoMo170 que el valor alcanza el 25 %. No se pudo determinar la causa de tanta diferencia con relación a los demás detectores que si tienen un comportamiento similar, aunque esta diferencia puede estar asociada a un error en el posicionamiento debido que es un caso muy puntual. Para el ^{14}C por su baja energía su eficiencia también es muy dependiente de la posición relativa fuente – detector, esta tiene un comportamiento similar en todos los detectores usados para esta investigación, aunque la respuesta de un detector a otro varía. Los emisores beta aunque tienen un alcance mayor que los alfa pero también es apreciable la diferencia de eficiencia en solo unos milímetros.

Emisores gamma

Para los emisores gamma también la eficiencia es dependiente de la posición relativa fuente – detector, pero como las distancias tomadas para este estudio son pequeñas en

relación con el alcance que tienen los fotones, la diferencia entre las eficiencias calculadas para estas distancias es muy pequeña. Aunque hay diferencias de un detector a otro para un mismo radionucleido, debido entre otras cosas a que los detectores también son diferentes y la eficiencia depende entre otros factores del tipo de detector. Por ejemplo los detectores gaseosos como el Xenón RXE 260 son mucho más sensibles a los emisores gamma de baja energía Tabla 24 y 25, por lo que su eficiencia es creciente en este orden: ^{137}Cs , ^{57}Co , ^{129}I , ^{241}Am y ^{238}Pu .

Dependencia de la eficiencia de la energía

Para un mismo detector la eficiencia puede variar de un radionucleido a otro, por ejemplo el detector GP13A del Electra de la Tabla 23, la mayor eficiencia la alcanza el ^{241}Am gamma y por ese orden continúan otros emisores fotónicos como el ^{57}Co , y el ^{129}I , luego les continúan los extremos de energía de los radionucleidos usados como son ^{238}Pu y ^{137}Cs cuya eficiencias son muy próximas. Este detector es poco eficiente para la radiación fotónica de baja energía como la del ^{238}Pu y para los más energéticos como el ^{137}Cs . Esto corrobora lo detallado en el Capítulo I donde hace un análisis de las ventajas y desventajas de este tipo de detector. Para los emisores beta de baja energía como el ^{14}C tiene una eficiencia muy baja, sin embargo los beta de mayor energía como el ^{36}Cl , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ es mucho más eficiente así como para el ^{241}Am alfa.

En las tablas 24 y 25 se muestran los resultados de las eficiencias de dos detectores de xenón del mismo fabricante y similares en sus dimensiones y composición. Como se puede apreciar las eficiencias calculadas también varían de un radionucleido a otro como en casos analizados anteriormente, pero no hay mucha diferencia entre los resultados obtenidos de un instrumento a otro para un mismo radionucleido; en algunos radionucleidos los resultados son similares. Estos detectores tienen una alta eficiencia para los electrones mayores de 60 keV como el ^{36}Cl y el $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ y baja eficiencia para los electrones con energía menor de 60 keV y para los fotones con energías mayores que 50 keV tales como ^{241}Am , ^{57}Co y el ^{137}Cs .

Los resultados del Saphymo CoMo170 aparecen reflejados en la Tabla 26, este se comporta de la misma manera que el resto de los detectores en cuanto a la variación de su respuesta en dependencia del radionucleido. La mayor eficiencia la alcanzan los emisores beta de mayor energía tales como el ^{36}Cl y el $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, pero muy baja eficiencia para los menos energéticos como el ^{14}C . Por otra parte para los emisores

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

gamma de mayor energía, este tiene una respuesta muy baja, en la medida que disminuye la energía de estos aumenta la eficiencia del detector, por lo que la menor eficiencia la tiene el ^{137}Cs debido a que es el más energético.

Los resultados de las eficiencias calculadas para este detector aparecen en la tabla 27. Este es un instrumento atípico porque la magnitud que mide es el flujo en ($\text{min}^{-1}.\text{cm}^{-2}$), pero tiene una alta eficiencia para todos los emisores beta y para los alfa como el ^{241}Am . Tienen una eficiencia muy baja para los emisores fotónicos con la excepción del ^{238}Pu . Llama la atención que la eficiencia de este detector para los emisores beta es más del 100 %, esto significa que el detector está registrando más conteo de lo que emite la fuente. En la revisión del manual de operación del instrumento se pudo constatar que esto es debido a un factor de calibración introducido por el fabricante: $B = f(N_0)$

Donde N_0 es el valor medio de la tasa de conteo calculada para el tiempo de medición, y $f(N_0)$ es un polinomio cuyo coeficiente depende del tipo de detector que está conectado. Con este monitor se hizo un ejercicio de intercomparación con el Laboratorio Nacional de Metrología de las Radiaciones Ionizantes (LNMRI) del Instituto de Radioprotección y Dosimetría de Brasil y los resultados serán expresados más adelante.

Tabla 23

Instrumento: Electra 1B

No. de serie: 4407

Fuente/Código/Radiación	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 0 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 3 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 10 mm	Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en %	
				3 - 0	3 -10
$^{241}\text{Am}/\text{NW886}/\alpha$	43.3 ± 4.3	37.7 ± 3.8	26.1 ± 2.3	14.9	30.8
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}/\text{OE435}/\beta$	31.9 ± 2.8	32.4 ± 2.9	31.8 ± 2.8	1.5	1.9
$^{36}\text{Cl}/\text{OE433}/\beta$	37.4 ± 3.3	38.4 ± 3.4	37.1 ± 3.3	2.6	3.4
$^{14}\text{C}/\text{NW892}/\beta$	15.9 ± 1.4	14.2 ± 1.7	10.9 ± 1.0	12.0	23.3
$^{241}\text{Am}/\text{NW887}/\gamma$	81.2 ± 8.7	78.5 ± 8.5	79.6 ± 8.6	3.4	1.4
$^{129}\text{I}/\text{NW891}/\gamma$	48.9 ± 6.0	39.9 ± 4.9	40.2 ± 4.9	22.6	0.8
$^{238}\text{Pu}/\text{NW888}/\gamma$	5.5 ± 0.8	4.9 ± 0.7	4.6 ± 0.7	12.2	6.1
$^{57}\text{Co}/\text{NW890}/\gamma$	54.2 ± 5.9	48.6 ± 5.3	47.6 ± 5.1	11.5	2.1
$^{137}\text{Cs}/\text{NW889}/\gamma$	5.6 ± 0.8	7.6 ± 1.1	7.1 ± 1.0	26.3	6.5

¹Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 24

Instrumento: Instrumento: MicroCont II

No. de serie: 1251

Fuente/Código/ Radiación	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 0 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 3 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 10 mm	Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en %	
				3 - 0	3 -10
²⁴¹ Am/NW886/ α	33.7 ± 6.0	28.8 ± 2.5	22.4 ± 2.0	17.0	22.2
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y/OE43 5/β	52.0 ± 4.6	49.5 ± 4.6	48.0 ± 4.2	5.0	3.0
³⁶ Cl/OE433/β	49.5 ± 4.3	48.4 ± 4.3	47.0 ± 4.1	2.2	2.8
¹⁴ C/NW892/β	9.9 ± 0.9	7.5 ± 0.7	7.3 ± 0.6	32.0	2.7
²⁴¹ Am/NW887/ Y	8.4 ± 0.9	8.4 ± 0.9	7.9 ± 0.9	0.0	6.0
¹²⁹ I/NW891/γ	6.5 ± 0.8	6.5 ± 0.8	6.3 ± 0.8	0.0	3.0
²³⁸ Pu/NW888/γ	19.1 ± 2.8	19.5 ± 2.8	18.9 ± 2.8	2.1	3.0
⁵⁷ Co/NW890/γ	2.3 ± 0.2	2.2 ± 0.3	2.1 ± 0.2	4.5	4.5
¹³⁷ Cs/NW889/γ	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.2 ± 0.2	0.0	7.7

¹Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).

Tabla 25

Instrumento: MicroCont

No. de serie: 930

Fuente/Código/ Radiación	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 0 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 3 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 10 mm	Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en %	
				3 - 0	3 -10
²⁴¹ Am/NW886/ α	29.4 ± 2.6	24.3 ± 2.1	14.6±1.3	21,0	39.9
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y/OE43 5/β	54.6 ± 4.8	51.6 ± 4.6	50.6 ± 4.4	5.8	1.9
³⁶ Cl/OE433/β	50.1 ± 4.4	48.6 ± 4.3	47.3 ± 4.2	3.1	2.7
¹⁴ C/NW892/β	7.1 ± 0.6	6.6 ± 0.6	5.8 ± 0.5	7.6	12.1
²⁴¹ Am/NW887/ Y	8.3 ± 0.9	8.3 ± 0.9	8.0 ± 0.9	0.0	3.6
¹²⁹ I/NW891/γ	6.6 ± 0.8	6.7 ± 0.8	6.5 ± 0.8	2.5	3.0
²³⁸ Pu/NW888/γ	19.8 ± 2.9	19.3 ± 2.8	19.3 ± 2.8	2.6	0.0
⁵⁷ Co/NW890/γ	2.6 ± 0.3	2.5 ± 0.3	2.3 ± 0.2	4.0	8.0
¹³⁷ Cs/NW889/γ	1.1 ± 0.2	1.3 ± 0.2	1.2 ± 0.2	15,4	7.7

¹Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).

Tabla 26

Instrumento: CoMo170

No. de serie: 875

Fuente/Código/ Radiación	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 0 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 3 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 10 mm	Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en %	
				3 - 0	3 - 10
²⁴¹ Am/NW886/ α	45.4 ± 4.0	44.0 ± 5.2	22.0 ± 2.0	3.2	50.0
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y/OE43 5/β	66.5 ± 5.8.8	65.1 ± 5.7	48.8 ± 4.8	2.2	25.0
³⁶ Cl/OE433/β	66.8 ± 6.0	65.5 ± 5.8	64.0 ± 5.6	2.0	2.3
¹⁴ C/NW892/β	27.2 ± 2.4	24.9 ± 2.3	18.9 ± 1.7	9.2	24.1
²⁴¹ Am/NW887/ γ	1.5 ± 0.2	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.2	0.0	6.7
¹²⁹ I/NW891/γ	5.8 ± 0.7	5.7 ± 0.7	5.2 ± 0.7	1.8	8.8
²³⁸ Pu/NW888/γ	12.8 ± 1.9	12.1 ± 1.8	12.2 ± 1.8	5.8	0.8
⁵⁷ Co/NW890/γ	0.8 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.6 ± 0.1	14.3	14.3
¹³⁷ Cs/NW889/γ	1.7 ± 0.2	1.7 ± 0.3	1.5 ± 0.2	0.0	11.8

¹Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).

Tabla 27

Instrumento: PM-1402M

No. de serie: N042210805

Fuente/Código/ Radiación	Eficiencia del instrumento ¹ (%) DFD = 0 mm	*Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 3 mm	Eficiencia del instrumento ¹ (%)DFD = 10 mm	Diferencia respecto a la eficiencia de referencia en %	
				3 - 0	3 - 10
²⁴¹ Am/NW886/ α	96.6 ± 8.8	83.4 ± 7.3	39.6 ± 3.6	21.0	39.9
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y/OE43 5/β	141.8 ± 12.7	139.1 ± 12.2	132.3 ± 11.6	1.9	1.9
³⁶ Cl/OE433/β	156.9 ± 13.9	153.7 ± 13.5	143.7 ± 12.6	3.1	2.7
¹⁴ C/NW892/β	154.3 ± 13.6	140.8 ± 12.4	100.2 ± 8.8	7.6	12.1
²⁴¹ Am/NW887/ γ	2.2 ± 0.2	1.7 ± 0.2	1.8 ± 0.2	0.0	3.6
¹²⁹ I/NW891/γ	5.3 ± 0.7	4.9 ± 0.6	4.6 ± 0.6	1.5	3.0
²³⁸ Pu/NW888/γ	24.4 ± 3.6	24.8 ± 3.4	23.5 ± 3.4	2.6	0.0
⁵⁷ Co/NW890/γ	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.4 ± 0.2	4.0	8.0
¹³⁷ Cs/NW889/γ	1.9 ± 0.3	1.6 ± 0.2	1.6 ± 0.2	15.4	7.7

¹Eficiencia del instrumento ± incertidumbre expandida (k=2).

3.5 Resultados de la metodología implementada para la calibración de monitores de contaminación superficial.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología implementada permitió la calibración por primera vez en el país de monitores de **contaminación superficial**. Esta calibración se realiza en términos de eficiencia, la eficiencia del instrumento fue determinada en el laboratorio de calibración para diferentes tipos de radiaciones y grupos de energías, utilizando fuentes de referencia para la radiación alfa, beta y gamma. Los factores de calibración del instrumento específico para los radionucleidos de interés, son calculados posteriormente ponderando los valores de eficiencia previamente obtenidos para cada tipo de radiación y grupo de energía con las probabilidades de emisión de los diferentes tipos de radiaciones del radionucleido en cuestión. Los 5 instrumentos usados durante el período de investigación fueron calibrados utilizando esta metodología y los certificados que evidencian los resultados de la **calibración** aparecen reflejados en los Anexos del (3 - 7). En los resultados de la **calibración** expresados en el certificado aparecen los datos de las fuentes patrones, el valor convencionalmente verdadero del cociente de la tasa de emisión superficial y el área de la fuente patrón, el valor medio de las indicaciones del instrumento corregido al fondo radiactivo más su desviación estándar y la eficiencia del instrumento expresada en % con su respectiva incertidumbre expandida para un nivel del 95 %.

En el reporte del certificado (anexos del 3 - 7) en el acápite 4 es especificado el método de calibración y las características de los patrones usados, así como, en el 5 se describe la geometría usada para el proceso y algunas especificaciones que pueden ser de importancia para el uso adecuado del factor de **calibración** recomendado basado en la norma ISO 7503-3 "Evaluación de **contaminación superficial**". La trazabilidad de las mediciones hasta el Sistema Internacional de Unidades solo se puede garantizar en término de eficiencia, debido a que la **calibración** de los patrones están dados en esa magnitud. Sin embargo el usuario necesita convertir la tasa de conteo en Bq/cm^2 , para este fin por recomendaciones de la ISO 7503-3, el laboratorio calcula un factor de **calibración** que le permite al usuario hacer la evaluación de la **contaminación superficial** en término de actividad superficial como están indicadas normas. Este factor es suministrado al usuario en un anexo al certificado de calibración, (3 – 7 epig. 7) en este aparecen los resultados del factor de **calibración** de cada uno de los radionucleidos que el usuario utiliza en su práctica, estos están expresados en $(\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s})$ y $(\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min})$ según las indicaciones del instrumento con sus respectivas incertidumbres

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

estándar expandida para un nivel de confianza del 95 % según recomendaciones de la ISO 7503-3. El usuario en la práctica para hacer uso del factor para la conversión de s^{-1} a Bq/cm^{-2} , solo es suficiente con multiplicar la tasa de conteo neta (corregida al fondo) por el factor del radionucleido seleccionado.

En el anexo al certificado de calibración el laboratorio aclara que estas recomendaciones no forman parte del contenido del certificado, sino una orientación para la evaluación de la **contaminación superficial** basada en la norma ISO 7503-3 “Evaluación de **contaminación superficial**”. El laboratorio solo está comprometido con el contenido del certificado de calibración, porque lo que es trazable hasta el Sistema Internacional de Unidades es la eficiencia.

La metodología implementada tuvo como resultado el establecimiento de un servicio nacional de **calibración** de monitores de contaminación por primera vez en el país. Este servicio ha sido brindado a un grupo importante de usuarios como aparece reflejado en el anexo 8. El 62 % de los usuarios beneficiados pertenecen al Ministerio de Salud Pública, el 15 % son servicios internos brindados al Grupo de Gestión de Desechos del CPHR y el resto del % a otras instituciones campo industrial y de investigaciones del país. Como se puede apreciar en este análisis de los resultados, los principales usuarios beneficiados son los departamentos de Medicina Nuclear del país, por lo que la introducción de este resultado científico tiene una incidencia directa en el control radiológico de los programas de protección radiológica de los pacientes, trabajadores ocupacionalmente expuestos y público en general del Ministerio de Salud Pública y de otras instituciones. Esto posibilitará la cuantificación de las contaminaciones superficiales y el establecimiento de niveles de referencia adecuados y optimizados para la adopción de medidas encaminadas a proteger a los trabajadores ocupacionalmente expuestos y miembros del público, en pleno cumplimiento de lo estipulado en las regulaciones nacionales de Seguridad Radiológica.

El poder cuantificar los niveles de **contaminación superficial** tendrá un impacto científico importante, esto permitirá una mejor comprensión y validación de los modelos de evaluación que predicen la transferencia de los radionucleidos a las superficies y el hombre, tanto en condiciones de operación normal como ante la ocurrencia de sucesos radiológicos.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El anexo 8 es una evidencia de la implementación del servicio, pues este constituye el registro de entrada de muestra que responde a las solicitudes del servicio hecha por los usuarios.

Una vez implementado el servicio, a todos los usuarios se les hizo llegar una carta (anexo 9) con el objetivo de esta comunicación y dándoles algunos detalles de las características de este nuevo servicio, el mismo ha tenido aceptación entre los usuarios.

El equipamiento adquirido por el proyecto OIEA CUB/3/002 "Assuring and demonstrating the safety of radioactive waste management in Cuba" para el país por concepto de equipamiento y de capacitación del personal el país ahorro una inversión de 25294 €. En el país hay aproximadamente 22 departamentos de Medicina Nuclear en las instituciones de salud pública y otro tanto de usuarios en la industria y la investigación. Cada calibración de un instrumento en el área cuesta alrededor de 700 €, y cada instrumento necesita al menos una **calibración** anual. Por lo tanto si el país tuviera que calibrar los equipos fuera de su territorio tendría que invertir anualmente aproximadamente 30800 € sin contar el costo de la transportación y el riesgo que se corre con la rotura o extravío del mismo. Por lo que la implementación del servicio en el país constituye un ahorro considerable de recursos humanos y materiales y garantiza la sostenibilidad de este servicio a un grupo importante de instituciones usuarias.

3.6 Análisis estadístico de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología.

Análisis del resultado de la intercomparación de los procedimientos de calibración de Cuba – Brasil para monitores de contaminación superficial.

Los laboratorios utilizan métodos de calibración distintos, el Laboratorio Nacional de Metrología de las Radiaciones Ionizantes (LNMRI) del Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD) de Brasil, utiliza el método del posicionamiento central descrito anteriormente y el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD) el método de las posiciones sucesivas descrito en el capítulo II. Los resultados de la comparación entre ambos laboratorios se muestran en la tabla 2 del anexo 10. Estos resultados fueron evaluados usando la metodología recomendada en la ISO/IEC 43-1. El número E_n fue seleccionado para la evaluación y considerar que los resultados son satisfactorios cuando $E_n < 1$ y insatisfactorios cuando $E_n > 1$. El número E_n combina la influencia de la

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

diferencia entre los valores de las eficiencias reportadas por los laboratorios y las incertidumbres. El número E_n se calcula por la siguiente ecuación:

$$E_n = \frac{\varepsilon_{iIRD} - \varepsilon_{iCPHR}}{\sqrt{U_{iIRD}^2 + U_{iCPHR}^2}}$$

ε_{iIRD} : Eficiencia reportada por el IRD

ε_{iCPHR} : Eficiencia reportada por el CPHR

U_{iIRD}^2 : incertidumbre estándar combinada reportada por el IRD para un nivel de confianza del 95 %.

U_{iCPHR}^2 : incertidumbre estándar combinada reportada por el CPHR para un nivel de confianza del 95 %.

Los resultados muestran que los valores de ambos laboratorios son comparables excepto el ^{36}Cl porque el número $E_n > 1$. El resultado del ^{36}Cl fue rechazado y se inició la investigación del problema con el objetivo de aclarar y reevaluarlo. Como resultado de la investigación realizada se concluyó que los procedimientos para la **calibración** de monitores de **contaminación superficial** son similares. El sustento de esta afirmación es el resultado del ejercicio de comparación entre ambos laboratorios en términos de tasa de emisión superficial. El número E_n según la ISO/IEC 43-1 muestra los resultados satisfactorios para tres fuentes comunes e insatisfactorio solo para el ^{36}Cl . La investigación de los resultados insatisfactorios condujo a una investigación más profunda de la determinación de la eficiencia del monitor con una fuente de ^{137}Cs , usando el método simple y el de multifuentes. La concordancia de los dos métodos, cuando fue utilizada la eficiencia para el ^{36}Cl determinada por el CPHR, se deduce que los resultados del CPHR para esta fuente pueden ser considerados como satisfactorios. No obstante se necesita hacer una investigación más profunda en espera de las conclusiones finales.

Posteriormente a la intercomparación de los procedimientos de calibración de Cuba – Brasil para monitores de **contaminación superficial**, se calibró el instrumento que se utilizó para el ejercicio de intercomparación usando la metodología implementada en el LSCD del CPHR. El resultado de esta **calibración** se comparó con los resultados del

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ejercicio de intercomparación, siguiendo el mismo criterio de aceptación. En las tablas de la (28 - 30) se muestran los resultados de esta comparación, en la tabla 28 aparecen los resultados intercomparados y analizados anteriormente.

En tabla 29 se comparan los resultados obtenidos del ejercicio de intercomparación del IRD con los obtenidos en el certificado de **calibración** del CPHR¹, como se puede apreciar todas las fuentes cumplen el criterio de aceptación excepto el ³⁶Cl. En la tabla 28 se comparan los resultados obtenidos por el CPHR en el ejercicio de intercomparación y los resultados obtenidos en el certificado de **calibración** del CPHR¹ como se puede observar todas las fuentes cumplen el criterio de aceptación $E_n < 1$ por lo que los resultados se consideran satisfactorios según la ISO/IEC 43-1, este hecho demuestra la reproducibilidad de la metodología bajo otras condiciones.

Tabla 28. Resultado del ejercicio comparación entre el IRD y el CPHR

Fuente	Eficiencia IRD $\epsilon_{i \text{ IRD}} \pm U_{i \text{ IRD}}$	Eficiencia CPHR $\epsilon_{i \text{ CPHR}} \pm U_{i \text{ CPHR}}$	En
⁹⁰ Sr	136,5 ± 12,6	138,0 ± 12,1	0,1
³⁶ Cl	180,8 ± 19,5	152,7 ± 13,4	1,2
¹⁴ C	158,0 ± 14,5	140,9 ± 12,4	0,9
²⁴¹ Am(α)	81,1 ± 7,5	83,4 ± 7,3	0,2

Tabla 29. Resultado de la comparación entre el IRD y los resultados obtenidos en el certificado de calibración del CPHR¹

Fuente	Eficiencia IRD $\epsilon_{i \text{ IRD}} \pm U_{i \text{ IRD}}$	Eficiencia CPHR ¹ $\epsilon_{i \text{ CPHR}} \pm U_{i \text{ CPHR}}$	En
⁹⁰ Sr	136,5 ± 12,6	139,1 ± 13,9	0,1
³⁶ Cl	180,8 ± 19,5	153,7 ± 13,4	1,1
¹⁴ C	158,0 ± 14,5	140,8 ± 12,4	0,9
²⁴¹ Am(α)	81,1 ± 7,5	83,4 ± 7,3	0,2

CPHR¹ es la calibración del instrumento por el CPHR posterior al ejercicio de intercomparación

Tabla 30. Resultado de la comparación entre el CPHR y los resultados obtenidos en el certificado de calibración del CPHR¹

Fuente	Eficiencia CPHR $\epsilon_{i \text{ CPHR}} \pm U_{i \text{ CPHR}}$	Eficiencia CPHR ¹ $\epsilon_{i \text{ CPHR}} \pm U_{i \text{ CPHR}}$	En
⁹⁰ Sr	138,0 ± 12,1	139,1 ± 13,9	0,06
³⁶ Cl	152,7 ± 13,4	153,7 ± 13,4	0,05
¹⁴ C	140,9 ± 12,4	140,8 ± 12,4	0,01
²⁴¹ Am(α)	83,4 ± 7,3	83,4 ± 7,3	0,00

CPHR¹ es la calibración del instrumento por el CPHR posterior al ejercicio de intercomparación

Análisis de la factibilidad de la metodología implementada.

La factibilidad de la metodología implementada fue evaluada por el experto denominado por el Organismo Internacional de Energía Atómica en el marco del proyecto OIEA CUB/3/002 "Assuring and demostrating the safety of radioactive waste magnagement in Cuba". El criterio de experto está emitido en el anexo 12, donde expresa que los buenos resultados obtenidos han demostrado la calidad y rigor científico de la presente tesis y asegurarán la sostenibilidad del servicio implementado para los clientes potenciales del País y de América Latina.

3.7 Comparación entre el método del posicionamiento central y el de la posiciones contiguas

Las comparaciones de los métodos de calibración se hicieron usando la metodología recomendada en la ISO/IEC 43-1, por lo que el criterio de aceptación es el mismo que se uso en el epígrafe 3.6. Los resultados de la comparación entre ambos métodos se muestran en las tablas de la (43 – 49) del anexo 25.

En la tabla 43 aparecen reflejados los resultados de la comparación de los métodos para el caso particular en que el área del detector (21.2 cm^2) es menor que el área de la fuente (10×10) cm como aparece reflejado en la figura 23. Se puede que no hay diferencias significativas entre las eficiencias comparadas de ambos métodos, el número $E_n < 1$ para todas las fuentes comparadas, es decir, se cumple el criterio de aceptación.

En la tabla 44 aparecen reflejados los resultados de la comparación de los métodos para el caso particular en que el área del detector (6.7×15) cm es aproximadamente igual al área activa de la fuente (10×10) cm, en la figura 24 se observar lo descrito en este párrafo. En este caso el detector tiene forma rectangular, es más estrecho que la fuente, pero su longitud es mayor. Se hizo coincidir el centro geométrico de la fuente con el del detector y se midió la tasa de conteo en esa posición y en las posiciones sucesivas a ambos lados de la posición central hasta cubrir toda el área sensible del detector. Como resultado se obtuvo que no existe diferencias significativas entre las eficiencias comparadas de ambos métodos, excepto ^{137}Cs que no cumple con el criterio de aceptación. Las causas no fueron determinadas, pero pudieran estar relacionadas con el posicionamiento del detector. Recomendamos que esta incongruencia sea nuevamente evaluada. En la tabla 45 se comparó el método del posicionamiento central y el de la

posiciones contiguas para este mismo monitor. Los resultados obtenidos difieren grandemente, por lo que no son comparables los métodos. En todos los casos $E_n > 1$ por lo que este resultado no es aceptado.

En la tabla 48 aparecen los resultados de la comparación entre el método del posicionamiento (4, 5 y 6) y el de las posiciones contiguas para el monitor Saphymo / 875 cuya área sensible (10 x 17) cm, es algo mayor que el área activa de la fuente (10 x 10) cm, como aparece representado en la figura 25. Los resultados obtenidos muestran que no existen diferencias significativas entre las eficiencias comparadas entre ambos métodos, excepto para el ^{137}Cs que no cumple con el criterio de aceptación. Este resultado para el Cesio pudiera estar relacionado con el posicionamiento del detector. En la tabla 49 se comparó el método del posicionamiento central y el de las posiciones contiguas para este mismo monitor. En los resultados obtenidos hay diferencias significativas entre los métodos, por lo que no son comparables. En todos los casos $E_n > 1$ por lo que este resultado no es aceptado.

En la tabla 46 aparecen los resultados de la comparación entre método del posicionamiento (4, 5 y 6) y el de las posiciones contiguas para el monitor MicroCont II/1251 cuya área sensible (21.1 x 11.0) cm, es mucho mayor que el área activa de la fuente (10 x 10) cm, como aparece reflejado en la figura 26. Como resultado se obtuvo que existen diferencias significativas entre las eficiencias comparadas de ambos métodos, excepto ^{238}Pu que cumple con el criterio de aceptación. Este resultado para el plutonio pudiera estar relacionado con el posicionamiento del detector. Este resultado no es aceptado. En la tabla 47 se comparó el método del posicionamiento central y el de las posiciones contiguas para este mismo monitor. Los resultados obtenidos difieren grandemente, por lo que no son comparables los métodos. En todos los casos $E_n > 1$ por lo que este resultado no es aceptado.

3.8 Metodología implementada para la calibración de monitores de contaminación superficial.

Método de calibración.

Método de comparación de las indicaciones del instrumento con los valores convencionalmente verdaderos de la tasa de emisión superficial de la fuente plana patrón según PR/LSCD/037 y en concordancia con el reporte técnico No. 16 del OIEA.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se simula una geometría semiinfinita de irradiación según recomendaciones del reporte CIRM 6 de la NPL. Las fuentes patrones alfa y beta fueron calibradas en el período 16/12/05-06/06/06 por Deutscher Klibrierdienst (DKS), trazable al laboratorio primario Phisicalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) de Alemania. Las fuentes patrones gamma fueron calibradas en el período 27/02/06-01/03/06 por Dosimetry and Radiological Metrology Service (DRMS), trazable al laboratorio primario Nacional Physical Laboratory (NPL) del Reino Unido.

El método de las porciones contiguas se realiza determinando la respuesta del detector a una fuente de **calibración** colocada en posiciones adyacentes debajo del monitor, sin superponerse, hasta que toda el área del detector sea barrida (Fig. 1). Las respuestas son entonces corregidas al fondo y sumadas juntas para dar la respuesta total esperada de una fuente de calibración de área igual al área total barrida por las posiciones individuales de la fuente.

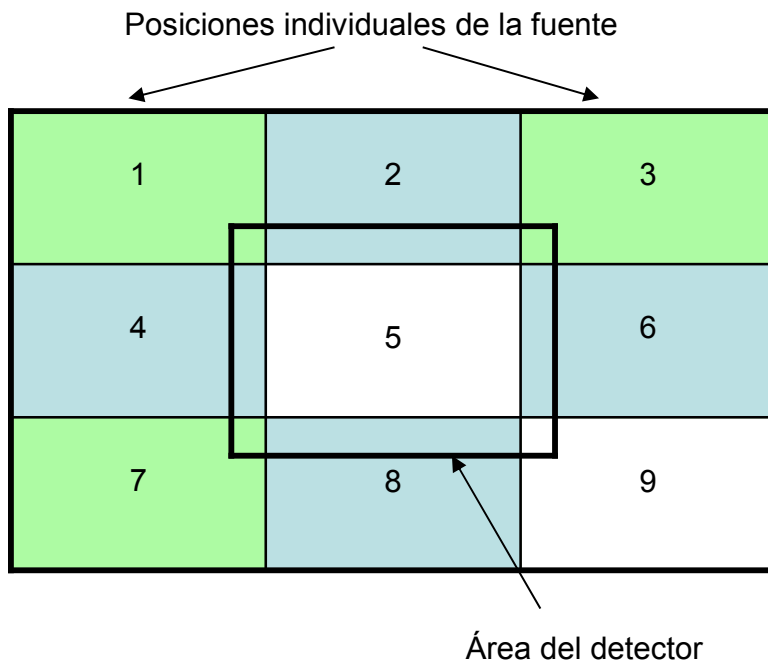


Figura 1: Representación gráfica del método de las posiciones contiguas

Preparación:

- Trazar una cuadrícula adyacente pero que las posiciones de la fuente no se solapen (Fig. 1), extendiendo en todas las direcciones más allá del área del detector escogida, determinado por el contorno del detector.
- Fijar el detector concéntricamente sobre la cuadrícula (con el centro del detector coincidiendo con el centro de la posición central de la fuente), de manera que la distancia fuente detector sea de 3 mm.

Mediciones

- anotar la tasa de conteo del fondo
- colocar la fuente en la primera posición sobre la cuadrícula, asegurando que esta quede dentro de los límites de la línea.
- medir la respuesta del detector y anotar el valor observado
- calcular el valor medio de la respuesta del detector
- mover la fuente para la próxima posición sobre la cuadrícula, realizar mediciones y calcular el valor medio

- continuar las mediciones hasta que todas las posiciones sobre las cuadrículas sean estudiadas
- anotar la tasa de conteo del fondo

Análisis

- calcular la media de la tasa de conteo del fondo medido (B_i)
- restar la media del fondo (B_b), de cada media de la tasa de conteo observado (B_i) con la fuente en cada una de las posiciones sobre la cuadrícula.

La eficiencia del instrumento es determinada comparando su respuesta total con la tasa de emisión superficial corregida por el decaimiento de la fuente, por unidad de área de la fuente de calibración y por el área de la ventana del detector del instrumento. Esta puede ser expresada algebraicamente como sigue:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - B_b)}{q_{2\pi} \cdot W_s} \quad (3.1)$$

donde ε es la eficiencia del detector

B_i es la respuesta del detector en posiciones i de la fuente (s^{-1})

B_b es el fondo (s^{-1})

$q_{2\pi}$ es la tasa de emisión superficial (s^{-1})

W_s área de la fuente (cm^2)

W área del detector (cm^2)

Cálculo de la incertidumbre expandida de las mediciones para el método de las posiciones contiguas.

Este cálculo se realiza como aparece reflejado en el Capítulo II epígrafe 2.4

Métodos para la evaluación de contaminación de superficie

Una contaminación de superficie puede ser evaluada por métodos de mediciones directas o indirectas. Las mediciones directas son llevadas a cabo con medidores y monitores de contaminación superficial .

Cálculo de la actividad superficial

La actividad superficial, expresada en $Bq \cdot cm^{-2}$, puede obtenerse multiplicando la lectura neta del instrumento de medición por un factor de calibración que dependerá del (los) radionucleido (s) contaminante (s):

$$A_s = (r - r_B) \cdot FC \quad (3.2)$$

Donde:

A_s es la actividad superficial evaluada, expresada en $Bq \cdot cm^{-2}$,

r es la indicación del instrumento de medición en s^{-1} ,

r_B es la lectura de fondo del instrumento de medición en s^{-1} ,

FC es el factor de calibración del instrumento de medición para el radionucleido a evaluar, expresado en $s \cdot Bq \cdot cm^{-2}$.

Cálculo del factor de calibración para un radionucleido determinado

Según la Norma ISO 7503:2005 [3], el factor de calibración del instrumento de medición para un radionucleido en particular puede calcularse a partir de su esquema de desintegración y de la eficiencia del instrumento para los diferentes tipos de radiaciones emitidos por dicho radionucleido, mediante la expresión:

$$FC = \frac{1}{\left(\sum_j \mathcal{E}_{i,j} \cdot \gamma_j \cdot \mathcal{E}_{s,j} \right) \cdot W} \quad (3.3)$$

Donde:

$\mathcal{E}_{i,j}$ es la eficiencia del instrumento, dada en el certificado de **calibración**, para la radiación "j". Expresa la cantidad de conteos netos del detector entre la cantidad de partículas del tipo "j" que emergen de la cara frontal de la fuente, para un área de la fuente igual al área de la ventana activa del detector y para condiciones geométricas preestablecidas. Los tipos de radiación "j" a considerar para la determinación de la eficiencia de los instrumentos de medición son los definidos por la Norma ISO 7503:

- Radiación alfa
- Radiación beta de energía media en el intervalo de 40.0 keV a 70.0 keV y electrones con energía en el intervalo de 40.0 keV a 70.0 keV,
- Radiación beta de energía media en el intervalo de 70.0 keV a 140.0 keV y electrones con energía en el intervalo de 70.0 keV a 140.0 keV,
- Radiación beta de energía media en el intervalo de 140.0 keV a 400.0 keV y electrones con energía en el intervalo de 140.0 keV a 400.0 keV,
- Radiación beta de energía media superior a 400.0 keV y electrones con energía superior a 400.0 keV,
- Fotones de energía en el intervalo de 5.0 keV a 15.0 keV,
- Fotones de energía en el intervalo de 15.0 keV a 90.0 keV,
- Fotones de energía en el intervalo de 90.0 keV a 300 keV, y
- Fotones de energía superior a 300.0 keV.

γ_j es la probabilidad de emisión de la radiación “j” por desintegración del elemento radiactivo, expresada en $s^{-1}Bq^{-1}$. Los valores de estos parámetros pueden ser deducidos a partir de bases de datos nucleares actualizadas, como la biblioteca ENSDF del Centro Nacional de Datos Nucleares (RSIC) de los Laboratorios Nacionales de Brookhaven en los Estados Unidos [4]. La Tabla 1 resume los valores de γ_j para algunos de los radionucleidos de uso más frecuente.

$\mathcal{E}_{S,j}$ es la eficiencia de la fuente de contaminación para la radiación “j”. Indica la cantidad de partículas de la radiación “j” que emerge de la cara frontal de la fuente por cada partícula de la radiación “j” emitida por la fuente. Cuando no se tengan datos específicos sobre las fuentes de contaminación sujetas a medición, pueden utilizarse los valores de $\mathcal{E}_{S,j}$ recomendados en la Norma ISO 7503:2005:

- $\mathcal{E}_{S,j} = 0.50$ para la radiación beta de energía media > 140.0 keV, para los electrones con energía > 140.0 keV y para la radiación gamma,
- $\mathcal{E}_{S,j} = 0.25$ para la radiación beta de energía media entre 40.0 keV y 140.0 keV, para los electrones con energía entre 40.0 keV y 140.0 keV y para la radiación alfa.

W es el área de la ventana sensible del instrumento de medición, expresada en cm^2 .

Tabla 1: Probabilidades de emisión en $s^{-1}Bq^{-1}$ para los grupos de radiaciones definidos en la Norma ISO 7503:2005, en radionucleidos de uso frecuente

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Radionucleido	Grupos de radiaciones según ISO 7503:2005								
	α	β y e^- 40 – keV	β y e^- 70 – 140 keV	β y e^- 140 - 400 keV	β y e^- >400 keV	Fotones 5 – 15 keV	Fotones 15 – 90 keV	Fotones 90 - 300 keV	Fotones >300 keV
¹⁴ C	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
³² P	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
⁶⁰ Co	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.000
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
⁹⁹ Mo	0.000	0.001	0.178	0.023	0.827	0.000	0.040	0.100	0.190
^{99m} Tc	0.000	0.000	0.109	0.000	0.000	0.000	0.073	0.891	0.000
¹²⁵ I	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.443	0.000	0.000
¹³¹ I	0.000	0.057	0.086	0.918	0.000	0.006	0.074	0.063	0.913
¹³⁷ Cs/ ^{137m} Ba	0.000	0.000	0.000	0.946	0.149	0.000	0.069	0.000	0.851
¹⁷⁷ Lu	0.000	0.178	0.183	0.794	0.000	0.033	0.058	0.176	0.002
¹⁸⁸ Re	0.000	0.003	0.051	0.088	0.983	0.031	0.047	0.150	0.043
²⁰¹ Tl	0.000	0.108	0.208	0.034	0.000	0.444	0.968	0.128	0.000
²⁴¹ Am	1.000	0.107	0.028	0.000	0.000	0.427	0.386	0.000	0.000
²²⁶ Ra	1.000	0.000	0.006	0.016	0.000	0.008	0.005	0.034	0.000

Cálculo del factor de calibración para una mezcla de radionucleidos

Cuando ocurre una **contaminación superficial** con una mezcla de radionucleidos, es posible estimar la actividad superficial de la mezcla contaminante siempre que se conozcan las fracciones de actividad de cada componente.

El factor de calibración es posible calcularlo entonces mediante la expresión:

$$FC = \frac{1}{W \cdot \sum_n \eta_n \cdot \left(\sum_j \epsilon_{i,j} \cdot \gamma_j \cdot \epsilon_{s,j} \right)_n} \quad (3.4)$$

Donde:

η_n es la fracción del radionucleido n en la mezcla contaminante. Los símbolos restantes tienen el mismo significado que en la ecuación (3.3).

La suma exterior, en el denominador de la ecuación (4), ocurre a través de todos los radionucleidos presentes en la mezcla.

Una vez calculado el factor de calibración del instrumento, la actividad pudiera estimarse mediante la expresión (1). La distancia entre la ventana del instrumento y la superficie a evaluar ha de ser igual a la distancia entre la ventana y la superficie de la fuente de referencia, adoptada durante la calibración del instrumento.

Evaluación de incertidumbres

La incertidumbre relativa combinada del factor de calibración obtenido mediante la ecuación (3.3), correspondiente a una desviación estándar, puede calcularse a partir de las incertidumbres relativas, correspondientes a una desviación estándar, de los parámetros de la ecuación, utilizando la siguiente expresión:

$$\frac{U(FC)}{FC} = \sqrt{\frac{U^2(W)}{W^2} + \frac{1}{\left(\sum_j \epsilon_{i,j} \cdot \epsilon_{s,j} \cdot \gamma_j\right)^2} \cdot \sum_j \epsilon_{i,j}^2 \cdot \epsilon_{s,j}^2 \cdot \gamma_j^2 \cdot \left(\frac{U^2(\epsilon_{i,j})}{\epsilon_{i,j}^2} + \frac{U^2(\epsilon_{s,j})}{\epsilon_{s,j}^2} + \frac{U^2(\gamma_j)}{\gamma_j^2}\right)} \quad (3.5)$$

Donde: U(x) representa la incertidumbre de la variable x, correspondiente a una desviación estándar. El resto de los símbolos son idénticos a los utilizados en las ecuaciones (1), (2) y (3).

La incertidumbre relativa, correspondiente a una desviación estándar, en la estimación de la actividad superficial a partir de las expresiones (1), (2) y (3) puede estimarse mediante la fórmula:

$$\frac{U(A_S)}{A_S} = \sqrt{\frac{U^2(r) + U^2(r_B)}{(r - r_B)^2} + \frac{U^2(FC)}{FC^2}} \quad (3.6)$$

Sustituyendo la expresión (5) en (6) se obtiene la fórmula general para el cálculo de la incertidumbre relativa combinada de la actividad superficial evaluada a partir de las incertidumbres, correspondientes a una desviación estándar, de cada una de las variables que intervienen en la estimación de la actividad superficial:

$$\frac{U(A_S)}{A_S} = \sqrt{\frac{U^2(r) + U^2(r_B) + U^2(W)}{(r - r_B)^2 + W^2} + \frac{1}{\left(\sum_j \varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon_{sj} \cdot \gamma_j\right)^2} \cdot \sum_j \varepsilon_{ij}^2 \cdot \varepsilon_{sj}^2 \cdot \gamma_j^2 \cdot \left(\frac{U^2(\varepsilon_{ij})}{\varepsilon_{ij}^2} + \frac{U^2(\varepsilon_{sj})}{\varepsilon_{sj}^2} + \frac{U^2(\gamma_j)}{\gamma_j^2}\right)} \quad (3.7)$$

Cuantificación de las incertidumbres correspondientes a una desviación estándar

La incertidumbre asociada a los parámetros utilizados en los cálculos de los factores de calibración puede presentarse o estimarse de diversas formas. Las siguientes recomendaciones para la estimación de las incertidumbres han sido deducidas de las referencias [5,6].

Las incertidumbres $U(r)$ y $U(r_B)$ podrán ser evaluadas de las siguientes formas, según sea conveniente y atendiendo a las características de los instrumentos de medición utilizados:

- a) Anotando 10 valores indicados por el instrumento (x_1, x_2, \dots, x_{10}) a intervalos de tiempo fijos. El resultado de la medición se calcula como la media aritmética de estos valores, según: $\bar{x} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} x_i$ y la desviación estándar según la

expresión: $S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{90}}$. La incertidumbre $U(x)$ para una desviación

estándar es igual a la desviación estándar $S(x)$.

- b) Anotando el valor máximo (x_{\max}) y el valor mínimo (x_{\min}) de la indicación del instrumento durante el tiempo de medición seleccionado. El resultado de la

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

medición se calcula mediante la expresión: $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y la incertidumbre

$U(x)$, para una desviación estándar, puede estimarse adoptando una distribución

uniforme: $U(x) = \frac{1}{\sqrt{12}} \cdot (x_{\max} - x_{\min})$ ó $U(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$, para $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$, siendo a la

mitad del rango de variación.

Cuando el valor de la incertidumbre (I) de la magnitud x se tome de un certificado de calibración, de una tabla de datos de referencia u hoja de especificaciones, en los que figure como un múltiplo de la desviación típica estimada, la incertidumbre de la magnitud x correspondiente a una desviación estándar, se calculará mediante la división por el

factor de cobertura (k) pertinente: $U(x) = \frac{I}{k}$.

Cuando se indique la incertidumbre de la magnitud x en forma de intervalo de confianza, especificándose el nivel de confianza, tal como 95 ó 99% y no se especifique el tipo de distribución estadística de esta magnitud, se asumirá que tiene una distribución normal y la incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará dividiendo el intervalo de confianza por el factor de cobertura correspondiente. Por ejemplo, para los niveles indicados anteriormente los factores de cobertura serían 1.960 y 2.576 respectivamente.

Cuando la variable x tenga una distribución normal y se conozcan los valores x_{\max} y x_{\min}

tales que el mejor estimado de $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y exista un 50% de probabilidad que la

variable x esté en el intervalo (x_{\min}, x_{\max}) , la incertidumbre correspondiente a una

desviación estándar se calculará como: $U(x) = 1.48 \cdot a$, donde $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ es la mitad

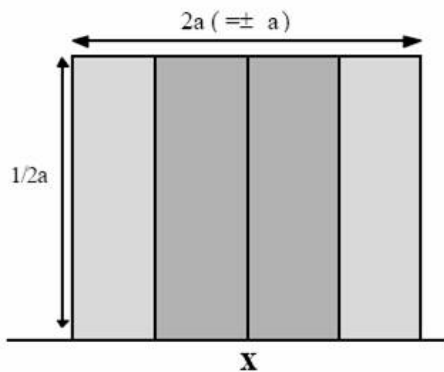
de la longitud del intervalo.

Cuando se realice una estimación mediante repetidas observaciones de un proceso de variación aleatoria, se indique una incertidumbre como una desviación típica s o σ , la incertidumbre de la variable correspondiente, para una desviación estándar, se obtendrá directamente como $U = s$.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuando la variable x tenga una distribución normal y se conozcan los valores x_{\max} y x_{\min} tales que el mejor estimado de $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y exista una probabilidad igual a $2/3$ (67) que la variable x esté en el intervalo (x_{\min}, x_{\max}) , la incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará como: $U(x) = a$, donde $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ es la mitad de la longitud del intervalo.

Cuando se conozca que la variable x tiene un 100% de probabilidad de estar en el intervalo entre los valores: x_{\min} y x_{\max} , y no exista información sobre alguna distribución en particular, la variable x puede considerarse con distribución uniforme (Densidad de probabilidad según la Figura 1).



$$\text{Mejor estimado de } x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$$

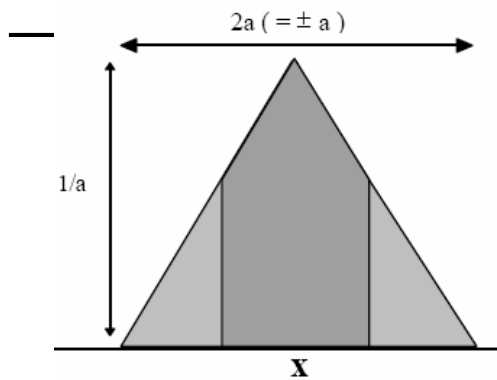
$$U(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}, \text{ donde: } a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$$

Figura 1: Densidad de probabilidad de distribución uniforme

La distribución rectangular como la mostrada en el ejemplo anterior es un modelo predefinido razonable en ausencia de información más específica sobre la función de densidad de probabilidad de la variable x . Cuando sea realista pensar que los valores más probables se encuentran cerca del punto central del intervalo, puede sustituirse la distribución rectangular por una trapezoidal, triangular o normal y deducir la varianza apropiada.

Por ejemplo, para una distribución triangular (Figura 2) la incertidumbre de la variable x , correspondiente a una desviación estándar estaría dada por la expresión:

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN



$$U(x) = \frac{a}{\sqrt{6}}, \text{ donde: } a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$$

$$\text{El mejor estimado de } x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$$

Cuando la variable x tenga una distribución normal y se conozcan los valores x_{\max} y x_{\min} tales que se considere que el intervalo (x_{\min}, x_{\max}) contiene la “casi totalidad” de los posibles valores de x , el mejor estimado se calculará como $x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ y asumirá que el intervalo (x_{\min}, x_{\max}) contiene el 99.73% de los valores de x , lo que corresponde a 3 desviaciones estándar. La incertidumbre correspondiente a una desviación estándar se calculará entonces como: $U(x) = \frac{a}{3}$, donde $a = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ es la mitad de la longitud del intervalo.