

EXPERIENCIAS EN EL CONTROL DE LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL EN EL TRANSPORTE DE MATERIALES RADIATIVOS EN CUBA

Amador, Z. H.¹, Soria, M. A.

Centro de Isótopos (CENTIS).

RESUMEN

El Centro de Isótopos es el principal transportista de material radiactivo en la República de Cuba. El objetivo del presente trabajo es mostrar las experiencias en el control de la exposición de los trabajadores vinculados a esta práctica. Se procesan los datos correspondientes al periodo de trabajo 1996-2013. Se controlan anualmente como promedio 7 trabajadores y 128 en total. Se reportan los valores máximos, mínimos y promedios de las dosis efectivas (E) y las dosis colectivas (S), para todo el personal y para choferes y distribuidores. Se estudia la causa del comportamiento de S. Desde el 2009 se controla la dosis equivalente en manos (Hp(0.07)). El principio ALARA es implementado en todas las operaciones. Los índices de transporte máximos y mínimos por remesa de los radisótopos de mayor contribución a la exposición ocupacional son determinados. Su relación con la distribución de E, es evaluada. Se halla que durante todos los años, excepto en un caso, se recibe una E inferior al 50% de la restricción de dosis (5 mSv⁻¹). En el 2003 se registra la E máxima para el periodo igual a 5.71 mSv⁻¹, por lo que la cantidad de personas expuestas no determina el valor de S. Esta dosis corresponde a un chofer, sin embargo, la E máxima para los distribuidores durante los 14 años de la práctica es igual a 2.88mSv. Del 2006 al 2009 laboran fundamentalmente 3 choferes como promedio, sin distribuidor, sin embargo reciben individualmente como máximo 1.04 mSv⁻¹. El promedio de Hp(0.07) para 5 años es 1.25 mSv. No se han reportado sucesos radiológicos en cerca de 4250 expediciones. Las medidas de segregación y el diseño de los bultos tipo A propios del CENTIS que cumplen con las regulaciones internacionales aplicables, son las más efectivas para reducir la exposición ocupacional.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Isótopos (CENTIS) de la República de Cuba se encuentra a 30 Km. aproximadamente al sudeste de La Habana. Durante los últimos 18 años ha sido el principal remitente y transportista de materiales radiactivos en nuestro país y ha ejecutado por carretera aproximadamente 250 expediciones como promedio anual. Se transportan cerca de 2000 bultos radiactivos por año para los usuarios de radiofármacos y compuestos marcados del país con ¹³¹I, ³²P, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹²⁵I, ⁵¹Cr, ⁵⁹Fe, ¹⁸⁸Re, ¹⁵³Sm, ¹⁷⁷Lu y ⁸⁹Sr. Alguno de estos productos son importados para su distribución, con almacenamiento en tránsito en el CENTIS y otros son producidos, para lo cual se adquiere la materia prima radisotópica, cuyos bultos son los de mayor índice de transporte por remesa. El análisis del procesamiento de los datos provenientes de la vigilancia radiológica individual y del inventario radiactivo transportado se presenta en este trabajo. Los resultados muestran que la exposición ocupacional se ha mantenido por debajo de la restricción de dosis efectiva anual aplicable.

¹ E-mail: zabalbona@centis.edu.cu

El programa de seguridad radiológica implementado cubre todas las funciones de CENTIS como diseñador, productor, remitente y transportista de bultos radiactivos. Por ello se establece y documenta en forma sistemática y estructurada el control aplicado a la satisfacción de los requisitos de seguridad radiológica y los establecidos por las regulaciones de transporte [1-6].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con la información conservada y mantenida de la exposición ocupacional y del inventario radiactivo manipulado por año, durante las operaciones de transporte terrestre, se realiza nuestro análisis, incluyendo las experiencias en la segregación de los bultos y su diseño, para su control.

2.1. Exposición ocupacional

Como parte del programa de seguridad radiológica para el transporte de material radiactivo [1], a partir de la evaluación de las exposiciones potenciales [2], cuyos resultados arrojaron que las dosis efectivas pueden ser superiores a 6 mSv y los requisitos establecidos en [3], se implementa la vigilancia radiológica individual. A través de una dosimetría acreditada, se controlan las dosis efectivas anuales (E) de un total de 135 trabajadores y 7 como promedio anual. Laboran y se controlan como promedio anualmente 3 choferes y el resto como distribuidores. Entre 1996-2000, en el país existía dosimetría filmica y el período de control era trimestral, siendo el nivel de registro igual a 200 μ Sv. Sin embargo, desde del 2001 se emplea la dosimetría TLD y el control es mensual, con 100 μ Sv como nivel de registro. La incertidumbre reportada es inferior al 20 %. A partir de los datos registrados, se determinan los valores máximo, mínimo y promedio de E para choferes y distribuidores (grupo de trabajo) y para todo el personal en general. Igualmente se calcula la dosis efectiva promedio individual en todo el período evaluado.

La dosis efectiva colectiva (en lo adelante dosis colectiva) se calcula según [3] como: $S = \sum_i E_i N_i$, donde E_i es la dosis efectiva anual promedio del grupo i y N_i es el número de individuos de dicho grupo. Para el análisis, se hallan los valores máximo, mínimo y promedio de S por grupo y todo el personal en el período evaluado. Para determinar el peso en S de los valores de E superiores a 2 mSv, se calcula el cociente entre la sumatoria dichos valores y la dosis colectiva total. Es decir, se normaliza la S correspondiente a esta dosis efectiva individual, tomada como referencia, en correspondencia con la distribución anual observada de E para todos los trabajadores (denotada como $SE > 2\text{mSv}$).

2.2. Inventario radiactivo por remesa

Se procesan los registros de apertura [4] de los bultos con la materia prima radisotópica de los radisótopos de mayor contribución a la exposición ocupacional, a saber, el ^{131}I y el ^{99}Mo .

Los productos son distribuidos por carretera en la capital del país y despachados en el aeropuerto para su transportación a las provincias orientales. Se utilizan bultos tipo A diseñados y ensayados por el CENTIS [5] y aprobados por la Autoridad Reguladora Cubana

(el Centro Nacional de Seguridad Nuclear (CNSN)). Se determina la distribución porcentual, con respecto al total de bultos aprobados (69), por tipo de bulto y categoría. Los índices de transporte (IT) máximos y mínimos por remesa para cada año, así como las actividades totales, anualmente recepcionadas, de ^{131}I y el ^{99}Mo . Se evalúa el comportamiento de S con respecto a su valor medio para el período y su relación con la actividad transportada.

2.3. Segregación de los bultos

Las remesas son segregadas por el personal durante la carga de los bultos radiactivos en el vehículo, en correspondencia con el tipo y categoría de los bultos. Especialmente todos los bultos que posean IT altos son ubicados lejos del personal acompañante y después de los de IT inferiores. En el almacén de donde son extraídos los bultos se ubican en estantería por cliente. Existe aproximadamente una hora de exposición a estos por semana debido a las intervenciones para despachos luego de las producciones. Se aplica la restricción de dosis de 5 mSv a^{-1} para el cálculo de las distancias de segregación [7].

2.4. Diseño de bultos tipo A del CENTIS

El diseño de los bultos tipo A del CENTIS también permite mantener la exposición ocupacional por debajo de las restricciones anuales, pues en todos los casos se emplean blindajes que cumplen con el requisito de la tasa máxima en contacto con las superficies externas de los bultos que manipulan los trabajadores (2 mSv h^{-1} [1-2]).

Los componentes de 6 proveedores son estudiados y sus frecuencias absolutas de uso son obtenidas. Considerando [1-2, 6] y el principio de optimización (ALARA en Inglés), se aplica un método cualitativo para la selección de la segunda barrera de contención hasta el 2014, en que se adopta la lata con tapa de fácil apertura. Los métodos de ensayo para demostrar la capacidad de resistencia a las condiciones normales de transporte para contenidos líquidos y sólidos [1-2, 6] se realizan en las instalaciones creadas en el CENTIS.

La tasa de dosis en contacto y el índice de transporte (IT) se determinan con el empleo del código Microshield Versión 5.0.3 [8] para la fecha de despacho y los emisores de fotones. En el caso de los emisores de electrones se utiliza el método de Monte Carlo (código MCNPX versión 2.6.0 [9]). Las evaluaciones tienen en cuenta el decaimiento radiactivo, la geometría cilíndrica de la fuente para la determinación en contacto con el embalaje externo y la geometría puntual para 1 m de distancia, los materiales de los componentes del bulto y del blindaje, la actividad máxima por producto para la fecha de producción y las distancias para cada superficie externa del bulto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Exposición ocupacional

Los valores máximos y mínimos de E se muestran en la Tabla No. 1. Como puede apreciarse, la dosis efectiva anual máxima es 5.71 mSv y se registra en el 2003. Aunque en [10] se señala que las operaciones de distribución de material radiactivo aportarían una dosis efectiva individual entre 8 y 10 mSv al año, la E máxima registrada para el personal con estas funciones está comprendida en este intervalo, pero supera la restricción de dosis adoptada posteriormente igual a 5 mSv^a. La investigación que se ejecuta, refleja que dicho valor no se corresponde con los registros individuales, ni las condiciones de exposición del trabajador. Como se conoce, el valor de cero es registrado cuando no se supera el nivel de registro en Cuba (100 µSv por mes).

Tabla 1. Valores máximo y mínimo de la dosis efectiva anual

Año	Emáx (mSv)	Emín (mSv)
1996	0,86	0,00
1997	0,55	0,00
1998	1,37	0,00
1999	1,06	0,00
2000	1,88	0,10
2001	1,57	0,24
2002	2,88	0,00
2003	5,71	0,11
2004	0,82	0,00
2005	0,49	0,00
2006	0,00	0,00
2007	0,28	0,00
2008	0,53	0,10
2009	1,04	0,26
2010	1,35	0,26
2011	0,88	0,00
2012	2,07	0,00
2013	2,76	0,00

En la Figura 1 se presenta la dosis efectiva promedio anual. Se observa que los valores máximos se presentan en el bienio 2002-2003. En el primer caso es la exposición de los distribuidores la que determina el comportamiento de E promedio, sin embargo como ya se explicó, en el segundo caso es la de un chofer, lo cual se refleja en la Tabla 2.

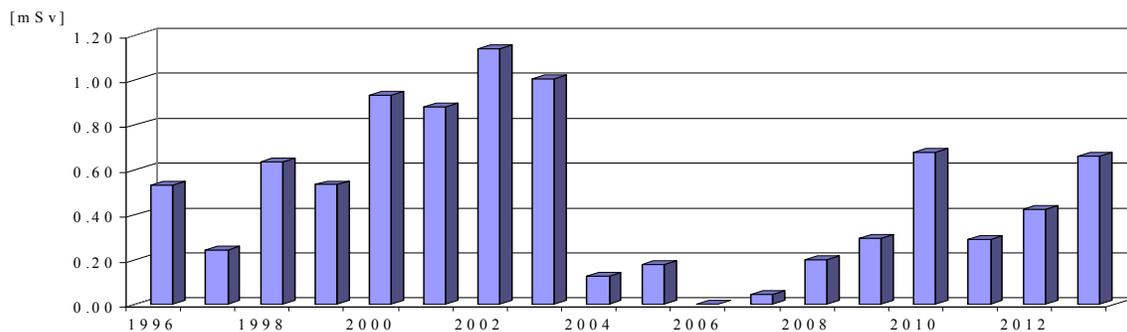


Figura 1. Dosis efectiva promedio de los trabajadores controlados

Tabla 2. Valores máximo y mínimo de la dosis efectiva anual para choferes y distribuidores

Año	Choferes		Distribuidores	
	E máx (mSv)	E mín (mSv)	E máx (mSv)	E mín (mSv)
1996	0,86	-	0,20	0,00
1997	0,55	-	0,42	0,00
1998	1,37	-	0,81	0,10
1999	0,97	0,29	1,06	0,24
2000	1,56	0,67	1,88	0,00
2001	1,57	0,00	1,53	0,11
2002	2,07	0,00	2,88	0,00
2003	5,71	0,35	1,2	0,00
2004	0,44	0,00	0,82	0,00
2005	0,40	0,00	0,49	0,00
2006	0,00	0,00	0	0,10
2007	0,28	0,00	0	0,26
2008	0,53	0,00	0,1	0,26
2009	1,04	0,00	0,46	0,00
2010	1,23	0,38	1,35	0,00
2011	0,88	0,00	0,71	0,00
2012	0,61	0,00	2,07	0,00
2013	2,07	0,00	2,76	0,00

La Tabla No. 3 refleja las dosis colectivas anuales (S). En las Figuras 2 y 3 se presenta la relación de S con la cantidad de trabajadores controlados y la dosis efectiva máxima anual. El incremento del personal implica el mismo comportamiento para S; pero reduce E. A pesar, de esto en el 2003 el valor de S está determinado por el incremento de E. Debe notarse que posteriormente la reducción de las exposiciones individuales es quien determina S.

Tabla 3. Dosis colectiva anual de las operaciones del transporte de materiales radiactivos

Año	S (mSv-hombre a ⁻¹)	S choferes (mSv-hombre a ⁻¹)	S distribuidores (mSv-hombre a ⁻¹)
1996	1,06	0,86	0,20
1997	0,97	0,55	0,42
1998	2,54	1,37	1,17
1999	3,20	1,26	1,94
2000	6,53	3,43	3,10
2001	7,05	2,95	4,10
2002	7,98	2,76	5,22
2003	10,06	7,04	3,02

2004	1,26	0,44	0,82
2005	1,42	0,40	1,02
2006	0,00	0,00	0,00
2007	0,48	0,48	0,00
2008	0,99	0,89	0,10
2009	1,76	1,04	0,72
2010	5,42	2,92	2,50
2011	2,32	1,02	1,30
2012	3,39	1,20	2,19
2013	5,27	2,07	3,20

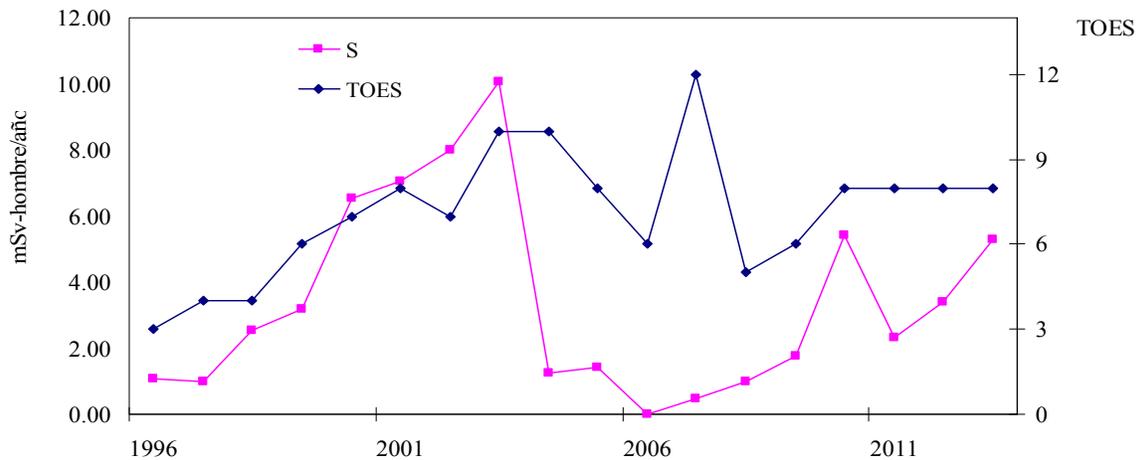


Figura 2. Dosis colectiva versus cantidad de trabajadores controlados

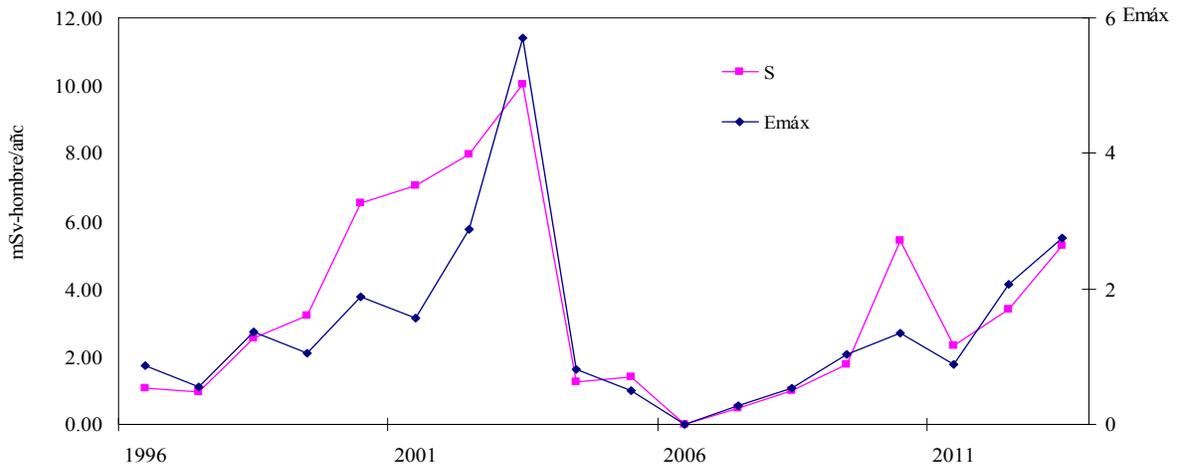


Figura 3. Dosis colectiva versus dosis efectiva máxima por año

El incremento del personal implica igual comportamiento de S, pero reduce E. Hay más distribuidores que choferes desde el 2000. No obstante, en el 2003 el incremento de la dosis individual de un chofer contribuyó al mayor valor de S total registrado, aproximadamente igual a 10 mSv-hombre a⁻¹.

La dosis colectiva promedio para el período es de 3,43 mSv-hombre a⁻¹. En el 2006 todo el personal recibió una E inferior a 100 µSv, por lo que S mínimo en los 18 años reportados es igual a cero.

3.2. Inventario radiactivo por remesa

En la Tabla 3 se presentan los IT máximos y mínimos por remesa para cada año, así como las actividades totales, anualmente recepcionadas, de ¹³¹I y el ⁹⁹Mo. El valor máximo registrado es igual a 7 y pertenece a un bulto que fue recibido en 1999. Sin embargo, los bultos con ⁹⁹Mo son los que mayoritariamente poseen IT superiores. Las actividades promedios de Mean ¹³¹I y ⁹⁹Mo son 6.32 TBq y 42.2 TBq, respectivamente. Las actividades máximas se registran en el 2013 y 2012, respectivamente. El incremento de la actividad de ¹³¹I se presenta en 1998, 2001, 2004, 2007 y 2009-2013. El inicio de la producción de los generadores de Tecnecio en el 2003, determina el incremento de la actividad transportada de ⁹⁹Mo. Su variación anual refleja el mayor crecimiento (44.2 TBq) en el 2012.

El máximo IT de su bulto radiactivo se registra en el 2002. Este radisótopo se ha recibido tanto en bulto B(U) como tipo A desde el 2008. Como es conocido el empleo del primer tipo contribuye a la reducción de la exposición ocupacional, pero el incremento de la actividad implica el mismo comportamiento en S, como se aprecia en la Figura 1. En los 2 últimos años el incremento de las exposiciones individuales determina el valor de S.

La Fig. 4 muestra el comportamiento de S con respecto a su valor medio para el período. Al analizar este gráfico con la Tabla 3 se aprecia que en el 2012 la actividad máxima recibida de ⁹⁹Mo hace que la dosis colectiva se iguale a la promedio.

Tabla 3. Valores máximo y mínimo del IT y la actividad total recibida por año de los radisótopos de mayor contribución a E

Año	IT máximo ¹³¹ I	IT mínimo ¹³¹ I	Actividad ¹³¹ I (Bq a ⁻¹)	IT máximo ⁹⁹ Mo	IT mínimo ⁹⁹ Mo	Actividad ⁹⁹ Mo (Bq a ⁻¹)
1996	--	--	--	2.5	--	3.20E+11
1997	1.7	0.5	7.33E+11	2.5	--	5.92E+11
1998	0.9	0.1	4.90E+12	2.5	1.3	5.39E+11
1999	7.0	0.4	4.87E+12	3.1	0.6	6.60E+11
2000	4.0	0.3	4.84E+12	3.1	0.6	5.35E+11
2001	1.0	0.2	4.88E+12	3.1	0.2	1.38E+12
2002	2.4	0.2	4.60E+12	4.1	1.9	1.59E+12
2003	2.9	0.6	3.94E+12	3.5	0.9	1.49E+13
2004	1.7	0.1	4.71E+12	3.3	0.2	2.73E+13
2005	1.4	0.1	4.08E+12	3.3	0.2	2.77E+13
2006	1.7	0.1	3.28E+12	3.6	1.5	2.29E+13
2007	1.3	0.1	4.91E+12	3.4	1.4	2.52E+13
2008	2.1	0.1	4.33E+12	3.4	0.1	2.32E+13
2009	2.9	0.1	5.76E+12	3.1	0.1	4.01E+13
2010	1.5	0.1	7.09E+12	3.0	1.6	3.19E+13

2011	3.0	0.1	1.05E+13	3.2	1.8	3.19E+13
2012	0.5	0.2	1.54E+13	3.1	0.4	2.46E+14
2013	0.5	0.2	1.86E+13	3.0	0.3	6.79E+13

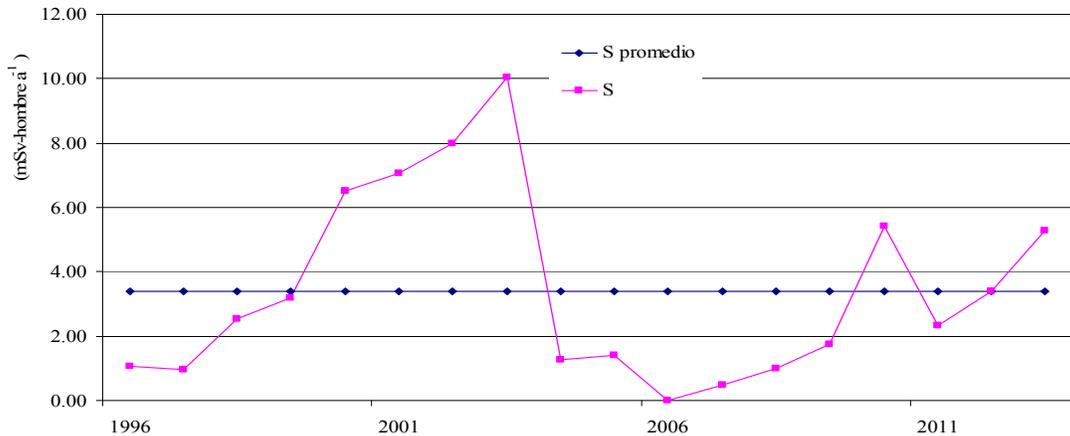


Fig. 4. Dosis colectiva versus dosis colectiva promedio para el período de estudio.

3.3. Medidas de segregación de los bultos

Las distancias de segregación de los bultos radiactivos respecto a los trabajadores del transporte permiten cumplir con la restricción de dosis efectiva anual. De la Tabla 4 se determina que el 68 % de la nomenclatura de los bultos conformados en el CENTIS son tipo A de categoría amarilla III, 20 % de amarilla II y el 9% pertenece a la blanca I. Los bultos con valores superiores de IT se ubican en el área de carga del vehículo, según procedimiento [4], de manera que se reduzca el aporte de estos al nivel de radiación en los puestos del chofer y el distribuidor.

3.4. Diseño de bultos tipo A del CENTIS

En la Tabla 4 se presentan las características radiológicas de los 69 bultos radiactivos del CENTIS. Como se aprecia el IT mayor corresponde a los generadores de Tecnecio de 74 GBq y es 3,8 (lo cual, como se conoce, significa que la tasa de dosis máxima es $38 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a 1 m de distancia del bulto [2 y 3]).

Tabla 4. Características de los bultos tipo A diseñados en el CENTIS

Diseño	Radionúclido	Actividad (Bq)	Categoría	IT máximo
A01/A02, A06/ A07	^{131}I	1.85E+09	III	0.7
A01/A06	^{131}I	3.70E+09	III	0.9
		5.55E+09		1.4
		7.40E+09		1.8

		9.25E+09		2.4
A03/A08	¹³¹ I	7.40E+07	II	0.2
		1.48E+08		0.5
		2.22E+08		0.7
		2.96E+08		1
		3.70E+08		1.2
A10	¹³¹ I	7.40E+09	III	2.1
A12/A13	¹³¹ I	3.70E+09	III	0.3
		5.55E+09		0.4
		7.40E+09		0.6
		9.25E+09		0.7
		1.11E+10		0.9
		1.48E+10		1.2
Excepted	¹²⁵ I	3.70E+05	---	---
Excepted	³² P	2.00E+07	---	---
A03/A08	³² P	3.70E+08	I	0
		7.40E+08		
A03/A08	⁹⁰ Y	1.11E+09	I	0
A02/A07	¹⁸⁸ Re	1.11E+09	II	0.2
GBTec02	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	5.99E+09	II	0.3
		7.99E+09	III	0.4
		2.00E+10	III	1.1
		3.00E+10	III	1.6
		3.70E+10	III	2.1
		7.40E+10	III	3.8
MET01/MET02	¹³¹ I	7.40E+08	III	1
A02/A07	¹³¹ I	7.40E+08	III	0.5
MET01/MET02	³² P	7.40E+08	I	0
A03/A08	³² P	7.40E+08	I	0
MET01/MET02	^{99m} Tc	7.40E+09	II	0
A05/A09	^{99m} Tc	7.40E+09	I	0
MET01/MET02	¹⁸⁸ Re	1.85E+09	III	1.8
A02/A07	¹⁸⁸ Re	7.40E+09	III	1.1
MET01/MET02	¹²⁵ I	3.70E+08	II	0.5
A03/A08	¹²⁵ I	3.70E+08	I	0

4. CONCLUSIONES

Los 18 años de trabajo del CENTIS como remitente y transportista de materiales radiactivos muestran experiencias positivas en el control de la exposición ocupacional, útiles para operadores análogos en Latinoamérica. El análisis de los datos de la vigilancia radiológica individual de los trabajadores del CENTIS para el transporte de materiales radiactivos, muestra que anualmente el (57-100) % recibe una dosis efectiva inferior al 10% del límite anual e inferior a la restricción de dosis aplicada. El incremento de las producciones del CENTIS entre 2000-2003 motivó una desviación de la dosis colectiva anual de su valor medio para el período de estudio. Las actividades de capacitación del personal y auditorías

dirigidas a evaluar su desempeño, contribuyen a revertir esta distribución, aún cuando las actividades máximas transportadas se registran en el 2012 y 2013.

Se concluye que las medidas de segregación de los bultos radiactivos en el procedimiento de carga del vehículo y el diseño de los bultos tipo A propios del CENTIS que cumplen con las regulaciones internacionales aplicables, son las medidas más efectivas en el mantenimiento de la exposición ocupacional en niveles aceptablemente bajos.

5. REFERENCIAS

1. MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, Resolución 121/2000 “Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos”, Gaceta Oficial de la República de Cuba, Ciudad de La Habana (2000).
2. ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos. Edición de 2012, Colección de Normas de Seguridad, Requisitos de Seguridad Específicos, N° SSR-6, Viena (2013).
3. EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection And Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, Vienna (2014).
4. Centro de Isótopos, Manual de Seguridad Radiológica para la Transportación de Materiales Radiactivos, DSR.DOC.012, La Habana (2014).
5. Centro de Isótopos, Amador Z. H., Expediente de los Bultos Tipo A del CENTIS, DSR.DOC.013, Ciudad de La Habana (2014).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advisory Material for IAEA Safety Standards Specific Safety Requirements, No. SSG-6, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2012 Edition (2014).
7. ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Programas de Protección Radiológica para el Transporte de Materiales Radiactivos, Guía de Seguridad No. TS-G-1.3, Viena (2011).
8. Afti Company, Grove Engineering, Microshield Version 5.0.3 (1998).
9. John S. Hendricks, et. al. LA-UR-08-2216, MCNPX 2.6.0 Extensions, Los Alamos National Laboratory, April 11 (2008).
10. Pérez S., Gatti A.M., Reyes R., Seguridad y Protección radiológicas en el Diseño del Centro de Producción de Radiofármacos y Compuestos Marcados de Cuba, Nucleus No, 24, p,36-44, Ciudad de La Habana, Cuba (1998).