

ANÁLISIS POR MEDIO DE INDICADORES DE LA GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS EN UNA INSTALACIÓN RADIATIVA

Zayda Amador Balbona, William Argudín Bocourt

Centro de Isótopos (CENTIS)
Ave. Monumental y Carretera La Rada, Km. 3 1/2,
Mayabeque, Cuba
zabalbona@centis.edu.cu

ABSTRACT

La evaluación de la gestión de los residuos radiactivos en el Centro de Isótopos de la República de Cuba es el objetivo de este trabajo. Para ello, se evalúan todas las operaciones del sistema de gestión a través de indicadores utilizados por esta instalación radiactiva hace más una década. Se procesa la información disponible desde 1996 hasta el 2012. Se identifican los principales generadores de desechos a través del indicador generación anual de desechos radiactivos de cada grupo de trabajo por local y por trabajador y se analizan el inventario radiactivo presente en el almacén disponible, la relación entre la variación del volumen de desechos tecnológicos anual de desechos y la actividad manipulada total anual, la relación generación-desclasificación y el porcentaje de efluentes líquidos gestionados como desechos. Se reflejan indicadores de la desclasificación incondicional, así como los de las descargas gaseosa y líquida. Se concluye que con todos estos indicadores es posible determinar dónde están las causas del comportamiento en la generación de los desechos radiactivos, si se trata de un aumento de la actividad manipulada, de los locales de trabajo o de los trabajadores o una aplicación inadecuada de los procedimientos de su recolección. No solamente se controla la gestión, sino también se determina en qué aspectos se puede trabajar para lograr el objetivo de minimizar la formación de estos residuos, para así poder reducir los costos de la producción. Se cumplen las regulaciones nacionales de vertimiento al medio ambiente y los resultados son aceptables.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que el Centro de Isótopos (CENTIS) de la República de Cuba dispone de instalaciones para la gestión de sus desechos radiactivos, es importante poder controlar y evaluar su comportamiento, como parte del Sistema de Gestión de la Seguridad Radiológica de esta instalación [1].

La gestión de los desechos radiactivos en el CENTIS debe cumplir con los objetivos siguientes [2]:

- Mantener todas las exposiciones, tanto de los trabajadores como del público en el valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse (vigilancia radiológica). Se debe cumplir lo establecido en la política del CENTIS al respecto.
- Controlar la generación de desechos (tanto en actividad como en volumen) y minimizarla.
- Optimizar los costos de la gestión de estos desechos.

La vigilancia de las descargas líquidas del centro, es indispensable para el cumplimiento de la restricción de dosis al público. La planta de producción posee un sistema de canalización especial (barrera de protección para los miembros de público), cuya función es controlar los

desagües provenientes de campanas radioquímicas, lavamanos y duchas de descontaminación, y fregaderos “activos” ubicados en la zona controlada, antes de su vertimiento al ambiente para evitar una exposición inaceptable del público por vía hídrica.

A través del monitoreo diferido se miden semanalmente los parámetros establecidos en [3] para mantener la vigilancia de las descargas gaseosas y asegurar el cumplimiento de la restricción de dosis al público.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Control de los desechos

La información para la evaluación de los indicadores específicos de la gestión de los desechos radiactivos se presenta en la Tabla 1. Se procesa la información disponible desde 1996 hasta 2012, de un total de 5854 registros. Para determinar el inventario de los desechos almacenados se utiliza la información con que se cuenta desde el 2005. El análisis de la generación de desechos radiactivos con respecto a la desclasificación se realiza a partir de los datos desde el año 2000.

Tabla 1. Datos sobre la gestión de los desechos radiactivos.

| Dato | Tipo de dato |
|--|---|
| No. de tarjeta. | Numérico (6 dígitos). |
| Lugar de origen. | Texto (Relación de locales de interés por Departamento, cuadro de lista combinado). |
| Radisótopo. | Cadena arreglo R(I) (cuadro de lista combinado) |
| Fecha de entrada. (F _{ENTRADA}). | Fecha. |
| Estado del desecho. | Texto (líquido/ sólido). |
| Contenido. | Texto. |
| Tasa de dosis en contacto (μSv/h). | Numérico (notación científica). |
| Actividad (Ci), (A). | Numérico (notación científica). |
| Concentración de actividad (CA). | Numérico (notación científica). |
| Contaminación superficial (Bq/cm ²). | Numérico (2 dígitos). |
| Volumen (L). | Numérico. |
| Tipo de recipiente. | Numérico (incluye el tipo de generador ⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc). |
| Locación de almacenamiento. | Texto (código de letras y números para los nichos). |
| Fecha de entrada. | Fecha corta [d/m/a]. |

| | |
|---|----------------------|
| Fecha proyectada de desclasificación (F_{PD}). | Campo calculado (*). |
| Reutilizable. | Lógico (SI/NO). |
| Observaciones. | Texto. |
| Evacuado. | Lógico (SI/NO). |
| Reutilizado. | Lógico (SI/NO). |
| Fecha de baja. | Fecha. |
| Vía de evacuación (basurero, reutilización, incinerador). | Texto. |

* Condición: $T_{1/2}(I) \leq 80$ días, de lo contrario no se calcula.

Casos:

- se tiene la A ó CA: $F_{PD} = F_{ENTRADA} + DT$, (1)

- $DT = \frac{T_{1/2}(I)}{\ln 2} \times \ln (C_O / C_{DESCLAS.(I)})$, (2)

donde:

$C_{DESCLAS.(I)}$: Concentración de desclasificación para el radisótopo R(I). Valores establecidos en [50]. Estos valores deben estar protegidos y sólo pueden ser modificados por el personal autorizado.

- no se tiene la A ó CA: $F_{PD} = F_{ENTRADA} + 10 \times T_{1/2}(I)$, (3)

Obsérvese que se crea el campo “reutilizable”, lo cual facilita el control con vistas a la reutilización de los materiales y medios que pueden ser incorporados nuevamente a las operaciones con materiales radiactivos, esto contribuye a minimizar el volumen generado.

2.2. Control de las dosis al público por las descargas líquidas

La vigilancia de las descargas líquidas del centro, es indispensable para el cumplimiento de la restricción de dosis al público. La planta de producción posee un sistema de canalización especial (barrera de protección para los miembros de público), cuya función es controlar los desagües provenientes de campanas radioquímicas, lavamanos y duchas de descontaminación, y fregaderos “activos” ubicados en la zona controlada, antes de su expulsión al ambiente para evitar una exposición inaceptable del público por vía hídrica.

La información para la evaluación de los indicadores específicos del control de las descargas líquidas se presenta en la Tabla 2. Se procesa la información disponible desde 1996 hasta el 2012, de un total de 233 registros.

2.3. Control de las dosis al público por las descargas gaseosas.

Semanalmente se miden los parámetros establecidos en [3] para mantener la vigilancia de las descargas gaseosas y asegurar el cumplimiento de la restricción de dosis al público. La información relevante para la evaluación de los indicadores específicos para el control de la exposición del público por las descargas gaseosas, así como el tipo de datos, se muestra en la Tabla 3. Se procesa la información disponible desde el 2001, de un total de 452 registros.

Tabla 2. Datos sobre las dosis al público por las descargas líquidas

| Dato | Tipo de dato |
|----------------------------------|--|
| Fecha de muestreo. | Fecha corta [día/mes/año] . |
| Tanque muestreado. | Numérico con texto asociado. (Cuadro de lista combinado). |
| Volumen (m ³). | Numérico. |
| Radionúclidos. | Texto. |
| Actividad total γ (Ci/L). | Numérico (notación científica). |
| Actividad total β (Ci/L). | Numérico (notación científica). |
| Actividad total. | Numérico (notación científica). |
| pH. | Numérico (1 dígito). |
| Evacuable. | Lógico (SI/NO). |
| Fecha proyectada de evacuación. | Campo calculado (*). |
| Tanque de retención. | Numérico con texto asociado (Cuadro de lista combinado). |
| Fecha de evacuación. | Fecha corta [día/mes/año] |
| Traslado a PTDR. | Lógico (SI/NO). |
| Fecha de traslado. | Fecha corta [día/mes/año]. |

Tabla 3. Datos sobre las dosis al público por las descargas gaseosas

| Dato | Tipo de dato |
|--|---------------------------------|
| Fecha. | Fecha. |
| Tiempo de muestreo (min). | Numérico (real). |
| Gasto volumétrico de la toma de muestra (m ³ /h). | Numérico (real). |
| Concentración de aerosoles (Bq/m ³). | Numérico (notación científica). |
| Concentración de gases (Bq/m ³). | Numérico (notación científica). |
| Actividad total aerosoles (Bq). | Numérico (notación científica). |
| Actividad total gases (Bq). | Numérico (notación científica). |

3. RESULTADOS

En la Tabla 4 se presenta la evaluación del indicador específico inventario radiactivo en los desechos almacenados en el período 2005 a 2012. Esta información permite determinar la estrategia para la desclasificación de los desechos con radisótopos de vida corta, según los niveles de desclasificación incondicional [2]. La actualización trimestral de este indicador permite alertar sobre una retención excesiva y no justificada de estos. Esta frecuencia se adopta a partir del 2011.

Tabla 4. Indicador específico inventario radiactivo en el depósito de desechos

| Radisótopo | Volumen (m ³) | | | | | | | |
|--------------|---------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| I-125 | 0.17 | 0.23 | 0.85 | 3.06 | 4.79 | 6.17 | 6.57 | 4.10 |
| I-131 | 0.09 | 0.17 | 0.19 | 0.29 | 0.34 | 1.07 | 3.38 | 3.18 |
| P-32 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.10 | 0.16 | 0.22 | 0.44 | 0.45 |
| Sr-90/Y-90 | 0.69 | 0.86 | 1.02 | 1.30 | 1.44 | 1.51 | 1.54 | 1.18 |
| Y-90 | 0.09 | 0.09 | 0.12 | 0.21 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.17 |
| Tc-99m | 0.10 | 0.18 | 0.27 | 0.51 | 0.78 | 1.05 | 1.54 | 1.48 |
| Mo-99/Tc-99m | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.45 |
| Cr-51 | -- | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.002 |
| Re-188 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.03 |
| W-188/Re-188 | -- | -- | -- | 0.0001 | 0.0001 | 0.01 | 0.01 | -- |
| S-35 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Co-57 | -- | -- | -- | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Sm-153 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | -- |
| Tl-201 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.01 |
| Ge-68/Ga-68 | -- | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | -- |
| Ga-68 | -- | -- | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | -- |
| Lu-177 | -- | -- | -- | -- | 0.01 | 0.01 | 0.01 | -- |
| H-3 | 0.31 | 0.33 | 0.35 | 0.37 | 0.39 | 0.39 | 0.39 | 0.39 |
| C-14 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Eu-154 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| Eu-152 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 |
| Am-241 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Cs-137 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| Ba-133 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

Obsérvese que los mayores volúmenes corresponden a ¹²⁵I, ⁹⁰Sr, ^{99m}Tc y ¹³¹I, teniéndose como promedio en el primer caso, aproximadamente 4.94 m³. Esta situación implica la necesidad de una toma de decisión en cuanto a la agilización de las medidas para ejecutar la desclasificación de los desechos sólidos con ¹²⁵I. En el segundo caso también esto es válido, pero además, se requiere medir la contaminación superficial del contenido de los bultos para determinar que tengan solamente ⁹⁰Y y no ⁹⁰Sr.

En el total de los volúmenes se incluyen los desechos líquidos, cuya desclasificación no ha sido ejecutada, lo cual requiere de la adopción de medidas para la toma de muestra y la medición de las magnitudes de desclasificación incondicional [2].

El indicador específico relación volumen de desechos radiactivos generados y volumen desclasificado también se ha incluido este año como trimestral y por las razones ya expuestas. La evaluación de este indicador se muestra en la Figura 1. Aquí se consideran las aguas de la canalización especial declaradas como desecho, es decir, que pasan a retención para el decaimiento radiactivo y su posterior descarga. El comportamiento de este indicador

es aceptable en el período 2000-2005, excelente en el 2008 con el valor de 0.73 y negativo en el 2006 y 2009-2011. Se considera negativo este indicador cuando supera la unidad (indica que se producen más desechos que los que son liberados del control regulador, lo cual afecta la disponibilidad de almacenamiento del depósito).

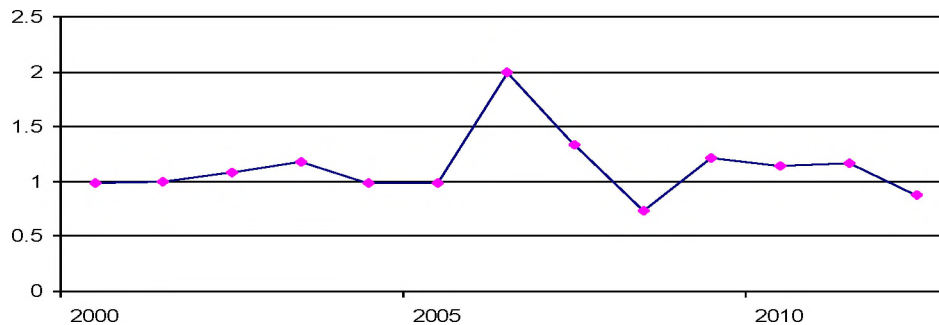


Figura 1. Relación generación y desclasificación de desechos radiactivos

Como indicadores específicos solamente anuales se evalúan los siguientes:

- Relación entre la variación del volumen de desechos tecnológicos anual de desechos y la actividad manipulada total anual.
- Variación anual del volumen de desechos tecnológicos por local y volumen por trabajador para el centro.
- Variación anual del volumen de desechos tecnológicos por local y volumen por trabajador para cada grupo de trabajo.
- Relación volumen de desechos generados y volumen desclasificado.

Es deseable que la generación de los desechos radiactivos no aumente al aumentar la actividad manipulada. El propósito es minimizar la generación de los mismos [2].

Los umbrales de la gestión eficiente en seguridad radiológica para los indicadores de la gestión de desechos son los siguientes:

- Inventario radiactivo en los desechos almacenados: Deben tenerse solamente las cantidades correspondientes a 2 y medio años de retención de los desechos con radisótopos de período de semidesintegración menor o igual a 80 días, lo cual puede determinarse por las fechas calculadas para la baja del almacén.

- Disminución del volumen de desechos radiactivos.
- $<0.12 \text{ m}^3/\text{local}$ y $<0.12 \text{ m}^3/\text{trabajador}$
- $<0.30 \text{ m}^3/\text{local}$ y $<0.25 \text{ m}^3/\text{trabajador}$. Cuando se calculan los volúmenes de desechos por local y por TOE para cada departamento, las cifras son superiores a los del centro porque los divisores son inferiores para cada grupo.
- <1 .

Para la gestión aceptable se aplica para los indicadores b) y c) la igualdad de los valores reportados y para el d) la condición ≤ 1.5 .

La variación del volumen total anual de desechos tecnológicos (no incluyen los desechos declarados de la canalización especial, pues se tratan en las descargas líquidas) se muestra en la Tabla 5. El valor máximo registrado es de 5.06 m³ en el 2004 y no se corresponde con el valor máximo de actividad manipulada, lo cual es un buen indicador de la gestión de estos residuos. El último bienio (2009-2010) reporta un comportamiento adecuado porque aunque aumenta la actividad que se utiliza, se logra reducir el volumen de residuos radiactivos. Igualmente ocurre entre el 2009 y el 2008. Se puede observar que con anterioridad existe irregularidad en el cumplimiento de este objetivo.

Tabla 5. Actividades manipuladas anualmente de los radisótopos y generación de desechos radiactivos tecnológicos

| Año | Actividad ¹³¹ I (Bq a ⁻¹) | Actividad ⁹⁹ Mo (Bq a ⁻¹) | Actividad ³² P (Bq a ⁻¹) | Volumen total de desechos radiactivos tecnológicos (m ³) |
|------|---|---|--|--|
| 1996 | -- | 3.20E+11 | -- | 1.10 |
| 1997 | 7.33E+11 | 5.92E+11 | -- | 2.38 |
| 1998 | 4.90E+12 | 5.39E+11 | -- | 3.15 |
| 1999 | 4.87E+12 | 6.60E+11 | 1.19E+10 | 2.36 |
| 2000 | 4.84E+12 | 5.35E+11 | 3.64E+11 | 1.84 |
| 2001 | 4.88E+12 | 1.38E+12 | 3.43E+11 | 3.17 |
| 2002 | 4.60E+12 | 1.59E+12 | 2.35E+11 | 3.88 |
| 2003 | 3.94E+12 | 1.49E+13 | 2.35E+11 | 3.90 |
| 2004 | 4.71E+12 | 2.73E+13 | 1.93E+11 | 5.06 |
| 2005 | 4.08E+12 | 2.77E+13 | 9.75E+10 | 3.16 |
| 2006 | 3.28E+12 | 2.29E+13 | 5.45E+10 | 2.55 |
| 2007 | 4.91E+12 | 2.52E+13 | 8.27E+10 | 2.83 |
| 2008 | 4.33E+12 | 2.32E+13 | 2.03E+11 | 4.46 |
| 2009 | 5.76E+12 | 4.01E+13 | 2.24E+11 | 3.39 |
| 2010 | 7.09E+12 | 3.19E+13 | 3.17E+11 | 2.71 |
| 2011 | 1.05E+13 | 3.19E+13 | 3.12E+11 | 4.99 |
| 2012 | 1.54E+13 | 4.42E+14 | 1.68E+11 | 3.11 |

Desde 1995-2012 en la Figura 2 se presenta la evaluación del indicador específico variación anual del volumen por local y el volumen por trabajador para el centro, siendo este último el que ha determinado mayoritariamente la generación. Son reflejadas también las cantidades de locales y trabajadores por año. Es necesario aclarar que los volúmenes por local y por trabajador se reflejan en litros (L), para poder mostrar en el mismo gráfico las cantidades de locales y trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOES). En 1995 se trasladaron desechos con ¹²⁵I desde el Centro de Sanidad Animal (CENSA), donde se laboró por un período con autorización del CNSN, y solamente se aprecia el indicador volumen por local.

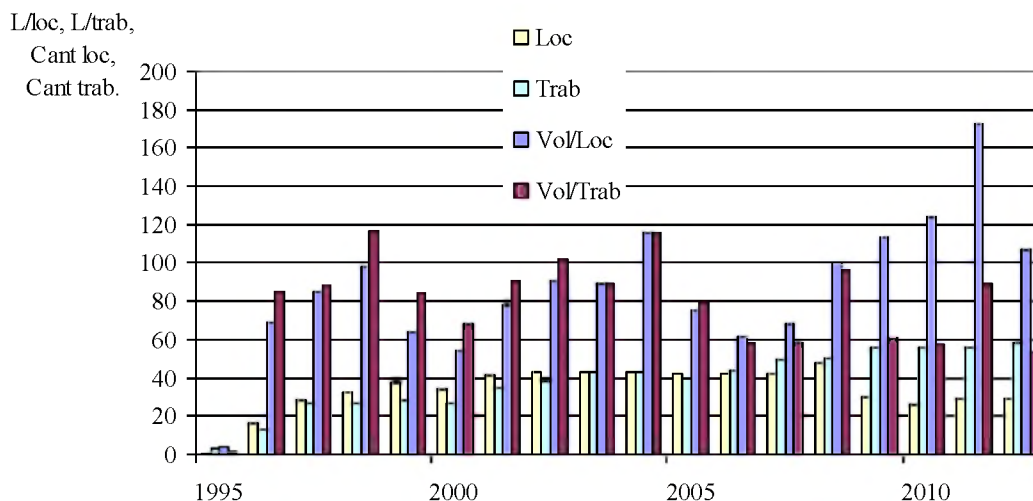


Figura 2. Cantidad de trabajadores y locales y volumen anual de desechos radiactivos generados por cada trabajador y laboratorio

A partir del 2000, se establecen los indicadores para cada grupo de trabajo para identificar a los principales generadores e incidir en la ejecución de acciones correctivas para la minimización de los desechos radiactivos. Se puede determinar que los grupos de Radioinmunoanálisis o Diagnosticadores Clínicos (RIA) y de Radiofarmacia han producido en los años 2003-2010 la mayor cantidad de desechos y el grupo de Desarrollo solamente lo hizo cuando el primer estudio de farmacocinética se realiza a finales del 2001. Se trata de la evaluación del anticuerpo monoclonal humanizado h-R3 marcado con ^{125}I en primates. Esto puede ser observado en las Figuras 3 y 4.

Como puede apreciarse, con estos indicadores es posible determinar dónde están las causas del comportamiento en la generación de los desechos radiactivos, si se trata de un aumento de la actividad manipulada, de los locales de trabajo o de los trabajadores o una aplicación inadecuada de los procedimientos de recolección de los mismos, es decir, que no se segreguen de forma correcta los desechos y se unan sin medir los limpios y contaminados, etc. Esto significa que no solamente se controla la gestión, sino que también se determina en qué aspectos se puede trabajar para lograr el objetivo de minimizar la generación de los desechos radiactivos, para así poder reducir los costos de la producción.

Al evaluar el indicador específico para el control de las dosis al público por las descargas líquidas por ciento de efluentes gestionados como desechos, para el período 1996-2010, se puede observar que entre el 21.1% y 100% de los efluentes líquidos de la Planta de Producción se ha gestionado como desecho radiactivo, lo cual se refleja en la Tabla 6.

Además, se muestra la actividad promedio manipulada de ^{131}I y la concentración promedio de este radisótopo en dichas aguas, cuyos volúmenes han sido desde 14 m^3 (2009) hasta 73.3 m^3 (1999). Este radisótopo es el que ha predominado con concentraciones radiactivas o actividades específicas superiores al nivel incondicional de desclasificación [3] 62.3 Bq/L , en las oportunidades en que se han tenido que gestionar las aguas como desechos radiactivos.

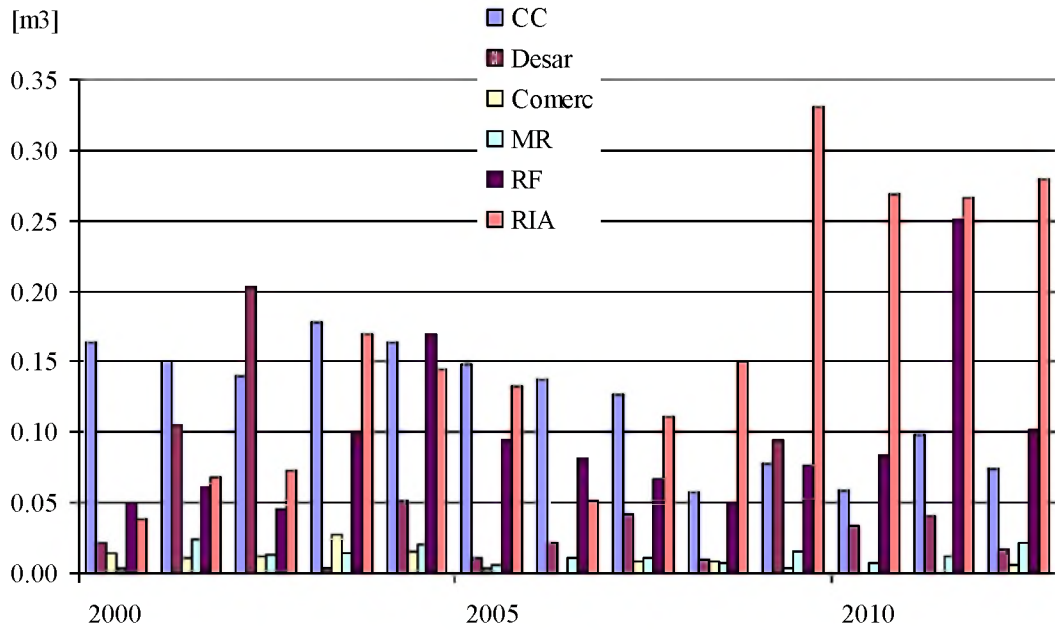


Figura 3. Generación anual de desechos radiactivos de cada grupo de trabajo por local

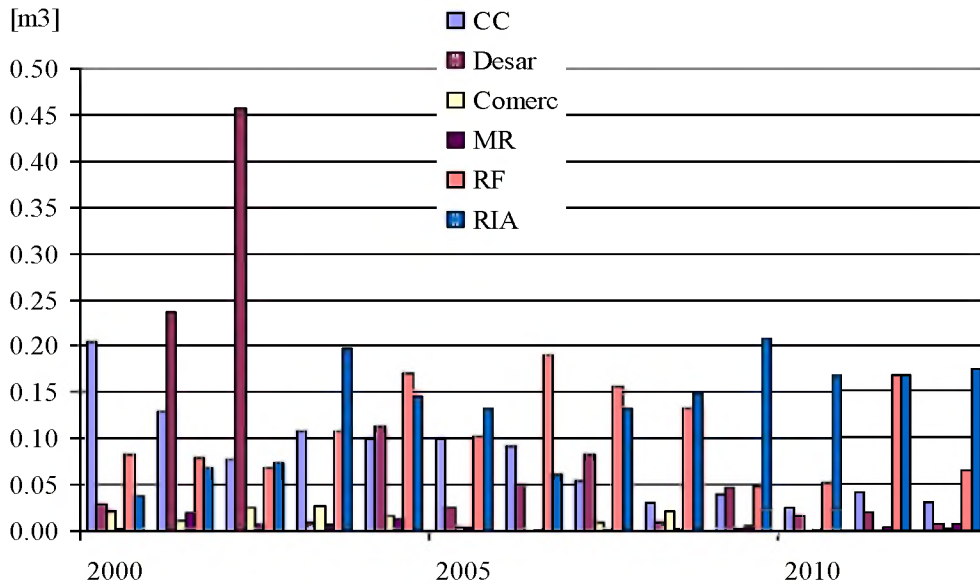


Figura 4. Generación anual de desechos radiactivos de cada grupo de trabajo por TOE

La Tabla 7 muestra las actividades que por año se han descargado para cada radisótopo y en la Tabla 8 se reflejan sus respectivas actividades específicas o concentraciones radiactivas máximas, con sus correspondientes niveles incondicionales de desclasificación (NID). Para el ^{32}P se observan valores de actividad anual descargada y de actividad específica máxima superiores los niveles de desclasificación incondicional en las Tablas 7 y 8, en el trienio 2002-2005.

Tabla 6. Concentración radiactiva media anual de ^{131}I en los efluentes líquidos y porcentaje de efluentes líquidos gestionado como desechos

| Año | Actividad manipulada promedio anual ^{131}I (Bq a^{-1}) | Concentración radiactiva media ^{131}I en los efluentes (Bq L^{-1}) | Volumen (m^3) | Porcentaje de efluentes gestionados como desechos (%) |
|------|---|---|--------------------------|---|
| 1998 | 9.99E+10 | 1.71E+02 | 38.0 | 65.0 |
| 1999 | 1.08E+11 | 1.29E+02 | 73.3 | 81.3 |
| 2000 | 1.03E+11 | 8.16E+01 | 30.0 | 46.7 |
| 2001 | 9.97E+10 | 7.99E+01 | 38.0 | 21.1 |
| 2002 | 7.80E+10 | 3.75E+02 | 26.0 | 55.6 |
| 2003 | 8.21E+10 | 5.58E+01 | 22.0 | 100.0 |
| 2004 | 1.13E+11 | 2.74E+01 | 27.8 | 95.5 |
| 2005 | 9.06E+10 | 8.28E+02 | 32.0 | 87.5 |
| 2006 | 7.19E+10 | 5.31E+00 | 22.0 | 88.9 |
| 2007 | 1.04E+11 | 1.47E+01 | 36.0 | 28.6 |
| 2008 | 9.09E+10 | 1.05E+02 | 36.0 | 31.3 |
| 2009 | 1.34E+11 | 6.36E+01 | 14.0 | 57.1 |
| 2010 | 1.48E+11 | 4.50E+02 | 18.0 | 40.0 |
| 2011 | 2.18E+11 | 7.42E+02 | 48.0 | 11.1 |
| 2012 | 3.03E+11 | 1.16E+02 | 10.0 | 80.0 |

Esto se debe a que desde el 2002 al 2006 se medía en el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), suponiendo que toda la emisión beta en las aguas sospechosas se debía a este radisótomo, lo cual se ha comprobado que es incorrecto. Además, estos límites son aplicados en las aguas que se descargan del sistema de canalización especial, antes de su unión con el resto de las aguas del CENTIS, de su paso por el tanque séptico y su incorporación al manto freático después del lecho filtrante, bajo el cual se obtiene el DBO del agua de lluvia. Para el resto de los radionucleidos medidos se ha cumplido con los límites de descarga correspondientes [3].

Este grupo de indicadores se utiliza desde el 2005, pero la presencia de emisores beta fue determinada adecuadamente a finales del 2009 por el Departamento de Metrología de los Radionúclidos del CENTIS y completada en el 2010 [4 y 5]. Con estos indicadores se logra un control y evaluación integrales de las descargas líquidas del CENTIS, pues con ellos se garantiza el cumplimiento de los niveles incondicionales de descarga, los que aseguran que los miembros del público reciban dosis iguales o inferiores a $10\mu\text{Sv a}^{-1}$ y una dosis efectiva colectiva no superior a $1\text{ Sv-hombre a}^{-1}$ por esta vía.

Los umbrales de la gestión eficiente en seguridad radiológica para estos indicadores son los siguientes:

- a) Porcentaje de efluentes declarados como desechos radiactivos: Debe disminuir aunque aumente la actividad.

- b) Cociente de de la actividad anual de cada radisótopo presente y la de desclasificación incondicional en la descarga: < 1.
- c) Cociente de la concentración radiactiva máxima y la de desclasificación incondicional para cada radisótopo en la descarga: <1.

Para la gestión aceptable se aplica que se pueda presentar un crecimiento de los efluentes líquidos declarados como desechos radiactivos pero menor al aumento de la actividad manipulada, y que los cocientes b) y c) puedan ser iguales a la unidad.

Tabla 7. Actividad anual de las descargas líquidas

| | ¹³¹ I (Bq a ⁻¹) | ¹²⁵ I (Bq a ⁻¹) | ³² P (Bq a ⁻¹) | ⁹⁹ Mo (Bq a ⁻¹) | ⁹⁰ Sr (Bq a ⁻¹) |
|------|---|---|--|---|---|
| NID | 10 MBq | 100 MBq | 1 MBq | 100 MBq | 1 MBq |
| Año | | | | | |
| 1998 | 1.04E+06 | No medido | No manipulado | No medido | No manipulado |
| 1999 | 1.05E+06 | | No medido | | |
| 2000 | 8.12E+05 | | | | |
| 2001 | 6.73E+05 | | | | |
| 2002 | 6.84E+05 | | 2.42E+07 | | |
| 2003 | 6.84E+05 | | 6.19E+06 | | |
| 2004 | 7.29E+04 | 6.20E+05 | 1.87E+08 | 1.22E+03 | No medido |
| 2005 | 6.96E+04 | 3.84E+05 | 1.01E+07 | 2.19E+05 | |
| 2006 | 1.61E+04 | 1.39E+05 | 7.75E+05 | 1.36E+04 | |
| 2007 | 1.37E+05 | 6.08E+05 | No medido | 1.87E+05 | |
| 2008 | 2.07E+02 | 1.29E+06 | | 1.86E+05 | |
| 2009 | 4.01E+05 | 2.75E+05 | | 1.03E+06 | |
| 2010 | 7.96E+03 | 1.06E+05 | 9.13E+05 | 2.31E+03 | 3.60E+05 |
| 2011 | 5.08E+05 | 3.57E+05 | 7.33E+05 | 1.01E+05 | 9.5E+05 |

La evaluación de los indicadores que se seleccionan para el control de las dosis al público por las descargas gaseosas en el II semestre del 2012 se muestra en la Tabla 9.

Este grupo de indicadores se utilizan para dar así cumplimiento al requisito regulador del reporte sobre el comportamiento de las descargas gaseosas [6].

Los indicadores anuales que se evalúan para este elemento básico son:

- Actividad anual.
- Relación de la dosis efectiva anual para el grupo crítico y la restricción de dosis al público.

Tabla 8. Actividad específica máxima de cada radisótopo en las descargas líquidas

| | ^{131}I (Bq L ⁻¹) | ^{125}I (Bq L ⁻¹) | ^{32}P (Bq L ⁻¹) | ^{99}Mo (Bq L ⁻¹) | ^{90}Sr (Bq L ⁻¹) |
|---------------------------|---|---|--|---|---|
| NID (Bq L ⁻¹) | 6.23E+01 | 9.13E+01 | 5.71E+02 | 2.28E+03 | 4.89E+01 |
| Año | | | | | |
| 1998 | 1.43E+02 | No medido | No manipulado | No medido | No manipulado |
| 1999 | 4.26E+01 | | No medido | | |
| 2000 | 4.17E+01 | | | | |
| 2001 | 4.55E+01 | | | | |
| 2002 | 4.12E+01 | | | | |
| 2003 | 2.24E+00 | | | | |
| 2004 | 1.70E+01 | 6.97E+01 | 2.88E+04 | 1.19E-01 | No medido |
| 2005 | 1.17E+01 | 8.22E+01 | 5.71E+02 | 8.70E+01 | |
| 2006 | 7.83E+00 | 1.73E+01 | 2.72E+02 | 6.76E+00 | |
| 2007 | 1.58E+01 | 4.49E+01 | No medido | 2.18E+01 | |
| 2008 | 2.63E+01 | 7.95E+01 | | 7.09E+00 | |
| 2009 | 5.05E+01 | 6.40E+01 | | 2.23E+02 | |
| 2010 | 3.65E+00 | 1.16E+01 | 4.69E+00 | 3.86E-01 | 4.0E+01 |
| 2011 | 5.04E+01 | 1.58E+01 | 3.71E+01 | 7.77E+00 | 4.6E+01 |

Como se aprecia en la Tabla 10, la actividad anual descargada de ^{131}I se ha comportado entre 11.2 MBq a 67.9 MBq, siendo la concentración radiactiva máxima registrada para el período analizado igual a 29.9 Bq m⁻³. Ninguno de estos valores supera los niveles establecidos de descarga [3], a saber 100 MBq a⁻¹ y 59.4 Bq m⁻³.

Se extrapolan linealmente los resultados del modelo para la evaluación de las dosis al grupo crítico, referido en [7] para las condiciones normales de operación, para 52 semanas de trabajo por año y la actividad de ^{131}I en las descargas gaseosas. Igualmente se reporta que este radisótopo aporta el 88.5% de dicha dosis. La comparación de los resultados que se obtienen con la restricción de dosis al público resulta útil para evaluar la seguridad de los procesos con este radisótopo.

Nótese en la Figura 5, que las dosis efectivas anuales al público debido a las descargas gaseosas del CENTIS se han comportado por debajo del 3% de la restricción de dosis adoptada igual a 10 μSv a⁻¹.

Con vistas a comparar la fracción de liberación estimada en la etapa de diseño del CENTIS de 1E-05 para los radioyodos [8], se calcula la fracción de liberación promedio de todas las mediciones efectuadas desde el 2001.

Aunque no resulta de interés para los indicadores de gestión de la seguridad radiológica, es importante destacar que las mediciones efectuadas arrojan una fracción de liberación promedio igual a 6.75E-06, lo cual es 6.75E-01 veces inferior al proyectado para los gases (1E-05) [8].

Tabla 9. Indicadores periódicos de las descargas gaseosas II semestre 2012

| | III trimestre | IV trimestre |
|--|---------------|--------------|
| Actividad descargada / actividad de desclasificación incondicional trimestral. | 0.460 | 0.240 |
| Concentración radiactiva máxima/ concentración radiactiva de desclasificación incondicional (Bq/m ³) | 0.099 | 0.027 |

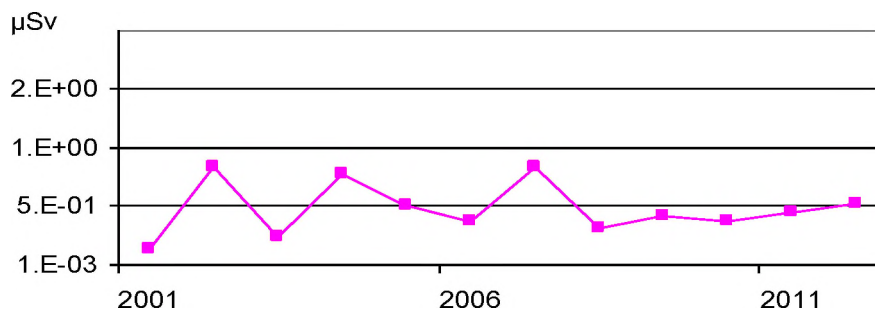


Figura 5. Indicador dosis efectiva anual al público debido a las descargas gaseosas

Precisamente para evaluar la seguridad de los procesos se determinan la concentración radiactiva media y la actividad media, por descarga, entre los que se efectúan en la celda caliente y la caja de guantes. Aunque se conoce que en el primer caso la actividad que se utiliza es más de 50 veces superior, las características de las operaciones determinan que las pérdidas de ¹³¹I al aire no mantengan esta misma relación. La concentración radiactiva media por descarga en la caja de guantes es 1.03 veces superior a la de la celda caliente (Tabla 11). En el caso de la actividad promedio por descarga la relación es de 1.04. Es importante mantener una vigilancia sobre el proceso de producción en la caja de guantes, ya que se requiere disponer de una disolución nueva de Tiosulfato de Sodio para retener el ¹³¹I durante la evaporación (se ubica un embudo acoplado a un recipiente con dicha solución cuando se lleva a sequedad el producto, sobre la boca del bulbo). Además, el TOE deberá evitar un pH ácido, ya que esto aumentaría la volatilidad del ¹³¹I. Este es un hallazgo de la aplicación de los indicadores concentración radiactiva y actividad total, ambos por descarga, para los procesos con ¹³¹I, cuyas descargas gaseosas son controladas.

Puede apreciarse la utilidad de la información que se recoge con los indicadores seleccionados en este elemento, lo cual permite un control y evaluación más integrales de la seguridad radiológica, pues con anterioridad solamente los valores de las magnitudes de los niveles incondicionales de descarga (concentración radiactiva y actividad anual en la descarga) y su relación con los establecidos [3], eran reportados en los informes anuales de gestión de los desechos radiactivos, siendo solamente conocidos por el área que genera esta información y el CNSN.

Tabla 10. Actividad manipulada, concentración radiactiva máxima y actividad anual de la descarga gaseosa de ^{131}I

| Año | Actividad manipulada anual ^{131}I (TBq a ⁻¹) | Concentración radiactiva máxima de ^{131}I (Bq m ⁻³) | Actividad anual de descarga ^{131}I (Bq a ⁻¹) |
|------|--|---|--|
| 2001 | 4.88 | 2.87E+00 | 1.12E+07 |
| 2002 | 4.60 | 2.45E+01 | 6.79E+07 |
| 2003 | 3.94 | 4.85E+00 | 1.99E+07 |
| 2004 | 4.71 | 1.03E+01 | 6.32E+07 |
| 2005 | 4.08 | 4.38E+00 | 4.10E+07 |
| 2006 | 3.28 | 1.61E+01 | 2.95E+07 |
| 2007 | 4.91 | 1.91E+01 | 6.72E+07 |
| 2008 | 4.33 | 2.99E+01 | 2.61E+07 |
| 2009 | 5.76 | 1.96E+01 | 3.46E+07 |
| 2010 | 7.09 | 2.02E+01 | 3.07E+07 |
| 2011 | 10.5 | 1.37E+01 | 3.62E+07 |
| 2012 | 15.4 | 1.82E+01 | 4.26E+07 |

Tabla 11. Concentración radiactiva media y actividad media por descarga para las operaciones en celda caliente y caja de guantes

| Puesto de trabajo | Concentración radiactiva media de ^{131}I por descarga (Bq m ⁻³) | Actividad media de ^{131}I por descarga (Bq semana ⁻¹) |
|-------------------|---|---|
| Celda caliente | 6.08E+00 | 4.54E+05 |
| Caja de guantes | 6.25E+00 | 4.70E+05 |

Los umbrales de la gestión eficiente en seguridad radiológica para estos indicadores son los siguientes:

- Cociente de la actividad descargada y la actividad de desclasificación incondicional trimestral: <1.
- Actividad total descargada: Debe ser igual o inferior a la actividad de desclasificación incondicional.
- Cociente de la concentración radiactiva máxima y la actividad específica de desclasificación incondicional: <1.
- Relación de la dosis efectiva anual para el grupo crítico y la restricción de dosis al público: <1.

Para la gestión aceptable se aplican los indicadores c) y d) iguales a 1.

4. CONCLUSIONES

- a) Con los indicadores para los desechos radiactivos no solamente se controla la gestión, sino que también se determina en qué aspecto se puede trabajar para lograr el objetivo de minimizar su generación, para así poder reducir los costos de la producción.
- b) En el 2009 al poderse establecer los protocolos para la determinación de los emisores beta puros en los efluentes líquidos e incorporarse sus resultados en los indicadores para las descargas líquidas, se garantiza el cumplimiento de las restricciones de dosis para los miembros del público por esta vía.
- c) El grupo de indicadores trimestrales para las descargas gaseosas se utiliza desde el 2009, para dar así cumplimiento al requisito regulador del reporte sobre el comportamiento de las descargas gaseosas [3].
- d) En las descargas gaseosas se tiene como hallazgo de la aplicación de los indicadores concentración radiactiva y actividad total, ambos por descarga, para los procesos con ^{131}I , el hecho de que la fracción de liberación de las operaciones en la caja de guantes es mayor que en la celda caliente, por lo que se requiere supervisar la preparación de nueva solución de Tiosulfato de Sodio para la filtración previa del aire que se extrae y el control del pH durante la producción.
- e) Con anterioridad solamente los valores de las magnitudes de los niveles incondicionales de descarga eran conocidos por el área que genera esta información y el Centro Nacional de Seguridad Nuclear (CNSN), con la propuesta de nuestros indicadores, ya pasan a conocerse hasta por la dirección del CENTIS.

REFERENCIAS

1. Z. A., “Desarrollo de los indicadores de gestión de la seguridad radiológica en el Centro de Isótopos”, Trabajo en opción al título de Máster en Ingeniería en Instalaciones Energéticas y Nucleares, Cuba (2011).
2. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Resolución 35/2003, Reglamento para la Gestión Segura de Desechos Radiactivos, Ciudad de La Habana, Cuba (2003).
3. Centro Nacional de Seguridad Nuclear, Resolución No. 1/2004, Guía sobre Niveles de Desclasificación Incondicional de: Materiales Sólidos con Muy Bajo Contenido Radiactivo y Descargas de Líquidos y de Gases al Medio Ambiente, Ciudad de La Habana, Cuba (2004).
4. Centro de Isótopos, Resultados de la validación del protocolo para la determinación del contenido de ^{90}Sr en descargas líquidas, Departamento de Metrología de los Radionúclidos, Ciudad de La Habana, Cuba (2009).
5. Centro de Isótopos, Resultados de la validación del protocolo para la evaluación de la concentración de actividad del ^{32}P y el ^{90}Sr en las aguas sospechosas, Departamento de Metrología de los Radionúclidos, Ciudad de La Habana, Cuba (2010).
6. Centro Nacional para la Seguridad Nuclear, Licencia Institucional de Operación para la Producción de Radisótopos, LH25-L14 (056)11, La Habana, Cuba (2011).
7. Centro de Isótopos, Colectivo de autores, Informe Final de Seguridad, CENTIS/DSR-144-001-C, La Habana, Cuba (2011).
8. 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).