

## **Experiencias en la Planificación y Respuesta para las Emergencias Radiológicas en una Instalación Radiactiva**

***Amador Balbona, Z. H., Pérez Pijuán, S., Torres Berdeguez, M. B., Ayra Pardo, F. E.***  
*Centro de Isótopos,  
Ave. Monumental y Carretera La Rada, Km 3, Guanabacoa, Apartado 3415, Ciudad de La  
Habana, Cuba.  
dsr@centis.edu.cu*

### ***Resumen***

Se reconoce internacionalmente la importancia de la planificación y el aseguramiento para la respuesta eficaz a las emergencias radiológicas. En el trabajo se presentan las experiencias sobre esta temática en el Centro del Isótopos (CENTIS), la instalación radiactiva donde se manipula el inventario radiactivo mayor en Cuba. Debido a que CENTIS también es el remitente y transportista principal de materiales radiactivos, se incluye esta práctica. La revisión de las situaciones anormales se lleva a cabo durante los años 1997 al 2005, a partir de la clasificación adoptada por la Autoridad Regulatoria del país. Se registran los detalles de estas ocurrencias en la Base de Datos de Sucesos Radiológicos (BDSR). Se obtiene una correspondencia entre el impacto radiológico evaluado en el Plan de Emergencia para los posibles sucesos y el de los registrados. Se cumplen los programas de entrenamiento y realización de los ejercicios. Se recogen los resultados de 3 simulacros a plena escala efectuados. Se concluye que la experiencia operacional y la infraestructura mantenida, determinan la capacidad de respuesta para emergencias radiológicas en el CENTIS.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El Centro del Isótopo (CENTIS) de la República de Cuba se localiza en un área rural, aproximadamente a 30Km al sudeste de La Habana. La propia facilidad consiste en cinco edificios y 6E-02 Km<sup>2</sup> de propiedad. Se manipulan fuentes abiertas en un edificio con un área de 3500 m<sup>2</sup>. Existe además un objeto de obra para el tratamiento y almacenamiento de desechos radiactivos; con un área de 260 m<sup>2</sup>.

CENTIS transporta el inventario radiactivo importado y los radiofármacos y compuestos marcados que fabrica, para la mayoría de los usuarios en el país.

La planificación y preparación para la respuesta a los sucesos radiológicos son establecidas en el Plan de Emergencia y sus procedimientos, para asegurar un daño mínimo a los trabajadores, el público y las instalaciones.

La Base de Datos de Sucesos Radiológicos (BDSR) se crea y mantiene desde 1997, considerando un sistema de clasificación [1].

## 2. EVALUACIÓN DE RIESGOS

### 2.1. Sucesos radiológicos postulados

A partir de los informes de instalaciones radiactivas análogas [2÷3] y la experiencia internacional, se identifican para el CENTIS los sucesos radiológicos potenciales siguientes:

- a) incendios en los almacenes de materiales radiactivos y campanas radioquímicas,
- b) descarga líquida de actividad,
- c) pérdida del blindaje de una fuente de radiación,
- d) pérdida de contención,
- e) accidente de transporte terrestre con incendio y daño severo de bultos tipo A,
- f) pérdida o robo de material radiactivo.

Se evalúan las dosis de los trabajadores y del personal de intervención. Se considera la manipulación de actividades máximas y un tiempo de exposición estimado. Las fuentes puntuales son adoptadas para la estimación de la exposición externa, porque se seleccionan distancias de 1÷2 m.

Las fuentes planas son asumidas al calcular las dosis equivalente en manos ( $H_p(0.07)$ ) y la dosis efectiva comprometida ( $E(50)$ ).

Para estimar  $E(50)$  de los grupos de respuesta, se tienen en cuenta las dimensiones de los locales, los parámetros del sistema de ventilación y se adopta un factor de protección del respirador filtrante de gases y vapores con máscara de rostro completo igual a 20 [4].

Se utilizan el factor de re-suspensión igual a  $1E-04m^{-1}$ , las tasas de exposición externa para fuentes puntuales y las tasas de dosis por contaminación en piel para depósitos uniformes, reportadas en [5]. Las dosis efectivas por unidad de incorporación por inhalación para cada radionúclido se seleccionan de [6] y [7]. Se adopta un factor de transferencia superficial igual a  $1E-03 A/m^2$  [8] y un tiempo de exposición de una hora para las manos, debido a la posible rotura de los guantes durante las operaciones.

Se identifican dos escenarios de incendio en los almacenes de materiales radiactivos del CENTIS. El primero en el área de recepción/despacho con propagación al adyacente almacén de radiofármacos y el segundo en el almacén de desechos radiactivos. Se supone que hay algunos bultos tipo A en el almacén de radiofármacos, con las actividades totales máximas autorizadas. El inventario radiactivo anual en el almacén de desechos es adoptado. En ambos casos los términos fuente son calculados utilizando la metodología de Flew y Lister [9], pero considerando la fracción de liberación por radionúclido ( $F_L$ ) sugerida por McGuire [10]. La fracción de liberación por bulto se adopta de [8] para el primer escenario. Se muestran los resultados en las Tablas I y II. Además se asume un tiempo de exposición durante la respuesta de 15 minutos.

Se asume que los radionúclidos de interés son descargados durante media hora a nivel de terreno. El modelo de la nube de Gauss para la dispersión atmosférica es aplicado con la desviación normal expresada según el esquema de categorización de Pasquill para condiciones

meteorológicas neutras y velocidad del viento igual a 6m/s [11]. Todas las vías de exposición para el grupo crítico, excepto la ingestión de leche, son consideradas a una distancia de 200m de la fuente. Se obtiene la leche a 200÷250 m del punto de emisión.

La ocurrencia de incendios en las campanas radioquímicas con tritio y carbono 14 es incluida, debido a las operaciones de soldadura del ánupula a la instalación de destilación. Se asume que una fracción de la actividad del HT incorporada igual a 5E-05, se convierte en HTO en el cuerpo humano [12]. Se considera que el trabajador controla el incendio con el extintor del local y esta operación dura 2 minutos.

Se considera el derrame de desechos radiactivos líquidos de bajo nivel de actividad de  $^{131}\text{I}$ , provenientes del sistema de canalización especial. Se postula el error humano como la causa de este suceso. La actividad de 4.4E+07 Bq presente en un volumen de 6 m<sup>3</sup> del sistema de tratamiento de los desagües se diluye en un orden debido a su mezcla con las aguas albañales y su paso a través de un sistema de filtración. Finalmente, la concentración de  $^{131}\text{I}$  a la distancia de 500 m aguas abajo (área transversal igual a 0.2 m<sup>2</sup>) es reducida en tres órdenes e igual a 7.3E+03 Bq/m<sup>3</sup>. El tiempo de esta descarga es de 30 min.

La pérdida del blindaje de una fuente de radiación sólo es considerada para el Molibdeno, durante la operación de ingreso a la celda caliente, porque este se recibe en un frasco plástico. Se supone que los trabajadores presentes se exponen durante 5 segundos a 1m de distancia de la fuente, mientras se retiran del lugar. Posteriormente el responsable de seguridad radiológica del área recogerá con una telepizna de 1m el recipiente caído para introducirlo en la celda. Esta operación dura 30 segundos.

Se evalúa la pérdida de contenciones con 0.16 TBq de  $^{131}\text{I}$ , 12 GBq de  $^{125}\text{I}$  y 22.7 GBq de  $^{32}\text{P}$  en los lugares de trabajo de zona controlada y de un ánupula con el tritio gaseoso (0.37 TBq). Se adopta para el trabajador 1 min. de exposición y en el caso del trabajador de respuesta cinco veces esta cifra. No se evalúa la exposición en manos, ya que el derrame se recoge con telepizna.

Se consideran la descarga atmosférica de actividad y la contaminación, debidas al accidente de transporte terrestre con incendio y daño severo a bultos tipo A. El modelo de la nube de Gauss para la dispersión atmosférica también se adopta para las condiciones meteorológicas neutras. Las hipótesis básicas son: fuente puntual de descarga a nivel de terreno, superficie abierta en la dirección del viento (ningún obstáculo), fracción de liberación de 1E-02 [8] y tiempo de descarga de 30 min. La exposición del trabajador de respuesta es evaluada a 2 m desde la fuente y para 15 min. Se supone la permanencia durante una hora de un infante con menos de 1 año de edad, a la distancia de 100 m del lugar del accidente.

## 2.2. Sucesos externos

Los posibles eventos externos naturales que pueden ocurrir en el emplazamiento son los terremotos, tornados y huracanes.

Los terremotos no tienen la fuerza dispersiva suficiente para provocar una emisión significativa de material radiactivo al medio ambiente. Su consecuencia radiológica fundamental es el vuelco y ruptura de recipientes con la contaminación localizada de superficies [13].

**Tabla I. Actividad descargada producto del incendio del almacén de radiofármacos**

Radionúclido	Actividad total (Bq)	F <sub>L</sub>	Actividad descargada (Bq)
<sup>131</sup> I	1.6E+11	1E-03	1.6E+08
<sup>125</sup> I	9.3E+10	1E-03	9.3E+07
<sup>32</sup> P	2.3E+10	1E-05	2.3E+05
<sup>35</sup> S	2.4E+09	1E-04	2.4E+05
<sup>99</sup> Mo	1.9E+12	1E-05	1.9E+07
<sup>201</sup> Tl	1.1E+10	1E-05	1.1E+05

**Tabla II. Actividad descargada producto del incendio del almacén de desechos radiactivos**

Radionúclido	Actividad total (Bq)	F <sub>L</sub>	Actividad descargada (Bq)
<sup>131</sup> I	1.5E+10	1E-02	1.5E+08
<sup>125</sup> I	2.1E+10	1E-02	2.1E+08
<sup>32</sup> P	9.3E+08	1E-04	9.3E+04
<sup>35</sup> S	1.0E+10	1E-03	1.0E+07
<sup>3</sup> H	2.0E+13	1E-01	2.0E+12
<sup>14</sup> C	9.3E+10	1E-01	9.3E+09
<sup>99</sup> Mo	7.4E+10	1E-04	7.4E+06
<sup>99m</sup> Tc	2.0E+12	1E-04	2.0E+08

Otra posible consecuencia es la rotura de tuberías soterradas de la canalización especial [14]. Se supone que esta rotura ocurre en el punto más bajo y que la tubería con 5.1E-02 m de diámetro está llena en un 30 por ciento de su capacidad con desechos radiactivos de baja actividad, con la concentración máxima para su tipo (370 MBq/m<sup>3</sup>) y un volumen aproximado de 0.4 m<sup>3</sup>. El terreno en el que se produce el derrame está constituido por marga arcillosa de abundantes poros que se satura con hinchamiento, por lo que su permeabilidad es muy baja. Este pequeño derrame es absorbido completamente. No obstante, la dilución de esta actividad en las aguas subterráneas tiene una contribución insignificante a la dosis del público.

La probabilidad de ocurrencia del tornado máximo probable en el emplazamiento es muy baja (3.5E-05/año). El alcance y magnitud de los daños convencionales serán dominantes con respecto a cualquier consecuencia radiológica al público, ya que el material radiactivo se diluye en el gran volumen de aire [13].

La probabilidad de ocurrencia del huracán máximo probable en el emplazamiento es baja. Su efecto se disminuye a través de las medidas preventivas. No existirán consecuencias radiológicas para el público debido al inventario radiactivo limitado y su gran dilución con los vientos del huracán.

La caída de un avión tiene una probabilidad muy baja en el emplazamiento ( $1E-08$ /año). La explosión y el incendio asociados con este evento destruirían el edificio de la planta. Para la evaluación del impacto radiológico del incendio se adoptan las mismas consideraciones de la descarga atmosférica de actividad debida a los incendios en los almacenes de materiales radiactivos, descritas anteriormente.

### **3. PREPARACIÓN Y RESPUESTA PARA EMERGENCIAS RADIOLÓGICAS**

#### **3.1. Plan de Emergencia**

Los 6 tipos de sucesos radiológicos evaluados en la sección 2.1 se postulan en el Plan de Emergencia de la instalación y se establecen las acciones de control y de protección para cada caso. Además se incluye la respuesta ante la ocurrencia en horario extralaboral del incendio en los almacenes de materiales radiactivos y el accidente de transporte.

Se garantizan medios de protección individual adecuados. Se verifican anualmente los monitores de tasa de dosis y de dosis en el Laboratorio Secundario de Calibración de Cuba. Se comprueban los monitores de contaminación superficial cada dos meses.

El entrenamiento inicial del personal abarca la evaluación de las instrucciones y procedimientos para cada tipo de ocurrencia. La revisión de las lecciones de los eventos es incluida en un programa de entrenamiento periódico.

Se realizan tres ejercicios a plena escala con la simulación de incendios y el chequeo de las comunicaciones con las organizaciones exteriores de respuesta.

Se revisan el Plan de Emergencia y los procedimientos después de los ejercicios y cada dos años.

La planificación y los preparativos para la respuesta a emergencias radiológicas en el transporte se incluyen en el Plan de Emergencia del centro [15]. Los sucesos radiológicos postulados son: la colisión del vehículo sin incendio, la colisión del vehículo con incendio y daño de bultos y la pérdida o robo de bultos radiactivos.

#### **3.2. Revisión de la Base de datos de Sucesos Radiológicos**

Desde 1997 al 2005, se ha registrado en la BDSR conformada en Excel, un total de 49 situaciones anormales, 15 de ellas son incidentes, debido a que han implicado dosis adicionales a los trabajadores [1]. Esta base de datos contiene: la descripción del suceso, la fecha, su causa (error humano o falla de equipo) y su clasificación según [1].

Se procesa la información registrada para determinar los años de mayor frecuencia de eventos y para estos se crea una carta de control. Se calcula el Límite de Control Superior (LCS) como la suma del promedio de eventos y el triple de la desviación estándar del número de ocurrencias, tomando cada mes como el período de referencia [15].

### 3.3. Evaluación de las dosis en la respuesta a emergencia

Durante las emergencias ha sido implementado el uso de los dosímetros personales electrónicos de lectura directa DOSICARD de la firma Eurisys Mesures, junto con una dosimetría TLD certificada. Los DOSICARD registran dosis en un rango de 1  $\mu\text{Sv}$  a 10 mSv y tasas de dosis hasta 1 Sv/h. El nivel de registro de los dosímetros TLD es 100  $\mu\text{Sv}$  hasta 10 Sv. En ambos casos se miden las dosis equivalentes personales (Hp(10)) por radiación fotónica con energías desde 50 KeV en el primer caso y 15 KeV en el segundo, hasta 2 MeV. Sin embargo, con los DOSICARD puede disponerse de la distribución temporal de las dosis y tasas de dosis, facilitando el estudio de las operaciones de mayor aporte.

Las mediciones de las incorporaciones “in vivo” se realizan para los emisores gamma. El equipo modelo Wallac 1409 se emplea para el monitoreo de  $^{32}\text{P}$  y tritio con el coctel de centelleo líquido INSTAL-GEL. Las incertidumbres reportadas no superan el 20 por ciento.

## 4. RESULTADOS

En la Tabla III se muestran los de dosis efectiva (E), dosis equivalente en manos (Hp(0.07)) y la dosis equivalente en tiroides (Ht), obtenidas de la evaluación de los sucesos radiológicos postulados. Para los casos en que es despreciable el impacto radiológico, no se informan los resultados de los cálculos.

Nótese que el incendio en el almacén de radiofármacos aporta la mayor exposición durante las acciones de control del suceso. Igualmente ocurre en el escenario de la pérdida de contención de la solución con  $^{131}\text{I}$ , con respecto a los otros tres casos analizados.

La pérdida o robo de material radiactivo podría implicar la aparición de efectos determinísticos en el público, debido al desconocimiento por este de sus riesgos. Es esta la razón por la cual no se incluye dicho escenario en la Tabla III.

En la BDSR se registra una cantidad máxima anual de cinco eventos durante dos años (2001 y 2002). El 54 por ciento de las ocurrencias se debe al error humano. Los valores máximos de las dosis de los trabajadores y del personal de respuesta son 1.2 mSv como E, 0.7mSv como E(50) y 29 mSv como Hp (0.07).

Han ocurrido 15 derrames en un período de 8 años de operaciones con  $^{131}\text{I}$ . Se ejecutan la evacuación de los trabajadores y la intervención con máscara de rostro completo, para restablecer las operaciones.

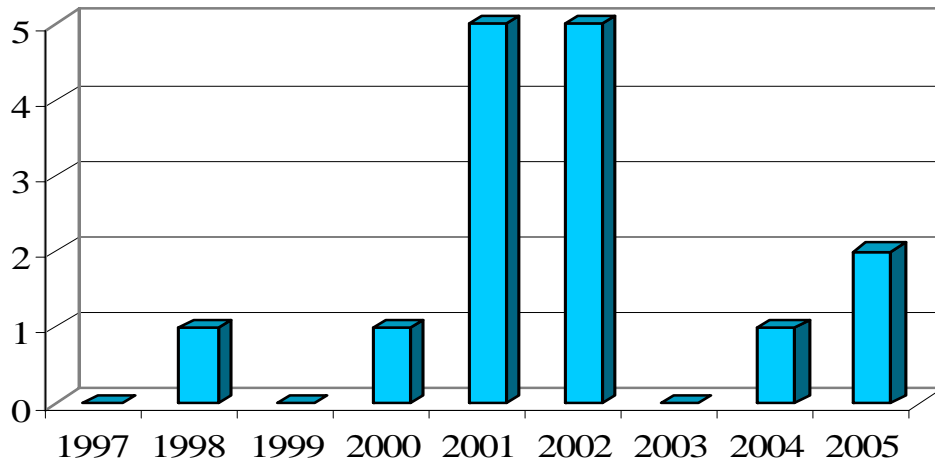
No se han presentado incendios ni ejecutado descargas líquidas por encima de los niveles autorizados.

El incidente de mayor contribución a E(50) tiene lugar en la zona supervisada durante la apertura de un bulto radiactivo con 37 GBq de <sup>131</sup>I, debido a que se recibió con el bulbo roto.

No existe reporte de un evento radiológico en el transporte de material radiactivo. Puede verse la tasa anual de sucesos en la Figura 1. La tasa promedio máxima de eventos por mes (Cpromedio) es aproximadamente igual a 1 para el 2001 y el 2002, los cuales son los años más significativos, debido a la coincidencia de algunos factores como el cambio de proveedores de <sup>131</sup>INa y de otros materiales. Se producen dos derrames en el mismo día (10 de febrero de 2001), lo cual es significativamente inusual. El primero de ellos ocurre debido a una falla de equipo y después por error del operador, ocurre el otro incidente. Se obtiene un LCS igual a 4. Se muestran los resultados anteriores en una carta control (Figura 2).

**Tabla III. Dosis proyectadas para los sucesos postulados en el CENTIS**

Suceso	Trabajador	Trabajador de respuesta		Público	
	E (mSv)	E (mSv)	Hp (0.07) (mSv)	E (mSv)	Ht (mSv)
Incendio en el almacén de radiofármacos y compuestos marcados	-	14	391	2E-01	3.3
Incendio en el almacén de desechos radiactivos	-	3.6	69.2	0.2	3.8
Incendio en la campana de tritio	1E-03	-	-	-	-
Incendio en la campana de <sup>14</sup> C	9.5E-03	-	-	-	-
Descarga líquida de desechos radiactivos	-	-	-	6E-03	1E-01
Pérdida de blindaje de la solución con <sup>99</sup> Mo	1.3E-01	8E-01	-	-	-
Pérdida de la contención de la solución con <sup>131</sup> I	3E-01	1.5	-	-	-
Pérdida de la contención de la solución con <sup>125</sup> I	1.5E-02	7E-02	-	-	-
Pérdida de la contención de la solución con <sup>32</sup> P	4E-02	2E-01	-	-	-
Pérdida de la contención de tritio gaseoso	2E-06	1E-05	-	-	-
Accidente de transporte	-	7	-	2E-02	2E-01

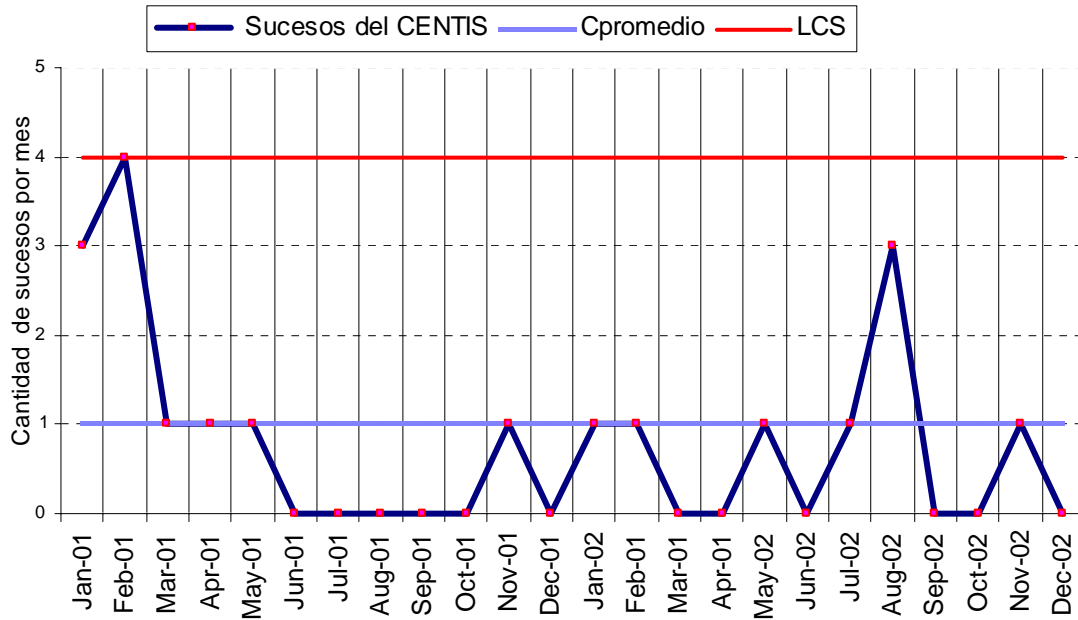


**Figura 1. Cantidad anual de sucesos radiológicos en el CENTIS**

#### 4. CONCLUSIONES

- a) Los sucesos radiológicos más probables en el CENTIS son los derrames radiactivos. Los incendios tienen el mayor impacto, pero son menos probables.
- b) Para los incidentes radiológicos en el CENTIS no se requiere la evacuación del público más allá del área inmediata a su emplazamiento.
- c) Los sucesos externos tienen una influencia baja para la seguridad siempre que no provoquen un incendio en los almacenes con materiales radiactivos.
- d) Los sucesos registrados desde 1997 al 2005 tienen un impacto radiológico pequeño.
- e) No han ocurrido sucesos radiológicos durante la transportación de materiales radiactivos.
- f) La ejecución de las acciones de control y protección planificadas ha sido eficaz.
- g) La experiencia acumulada y el mantenimiento de la infraestructura requerida, determinan la capacidad de respuesta para emergencias radiológicas en el CENTIS.





**Figura 2. Carta control de sucesos radiológicos para los años 2001 y 2002**

### REFERENCIAS

1. Centro Nacional de Seguridad Nuclear, “Guía para Emergencia”, Resolución No. 32, La Habana, Cuba (2001).
2. U.S Nuclear Regulatory Commission, “Source-Term Development for Evaluation of Emergency Preparedness Needs for Non-reactor Facilities”, Health Physics, Vol. 50, No. 3, pp. 399-403, (1986).
3. Amersham Corporation, “Emergency Preparedness at a Non-Fuel Cycle Facility”, 24th Annual Meeting of the Health Physics Society, pp. 3-15 Albuquerque, (1989).
4. British Standards Institution, “Guide to Implementing an Effective Respiratory Protective Device Programme”, BS 4275, London, UK (1997).
5. D. Delacroix, J. P. Guerre, P. Leblanc and C. Hickman, “Radionuclides and Radiation Protection Data Handbook 2002”, CEA/SACLAY, France, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 98 No. 1, Nuclear Technology Publishing, (2002).
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organisation, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization, “International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources”, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, Austria (1996).
7. International Atomic Energy Agency, “Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides”, Safety Guide RS-G-1.2, Vienna, Austria (1999).
8. International Atomic Energy Agency, Advisory Material for the IAEA “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, Safety Guide No. TS-G-1.1 (ST-2), Vienna, Austria (2002).

9. Flew, E.M., Lister, B.A.J., “Assessment of the Potential Release of Radioactivity from Installations at AERE, Harwell, Implications for Emergency Planning”, Proceeding of IAEA’ Symposium, Vienna, Austria (1969).
10. McGuire, S.A., “A Regulatory Analysis on Emergency Preparedness for Fuel Cycle and Other Radioactive Material Licensees”, Rep. NUREGF 1140 (Draft), USNRC, Washington DC, USA (1985).
11. International Atomic Energy Agency, “Atmospheric Dispersion Models for Applications in Relation to Radionúclidos Releases “, IAEA-TECDOC-379, Vienna, Austria (1986).
12. U.S. Department of Energy, “Primer on tritium safe handling practices“, DOE Handbook DOE-HDBK-1079-94, Washington D.C., USA (1994).
13. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Preliminary Screening of Fuel Cycle and By-Product Material Licenses for Emergency Planning”, NUREG/CR-3657, USNRC, Washington DC, USA (1985).
14. International Atomic Energy Agency, “Environmental Monitoring in Emergency Situations”, Safety Series N° 18, IAEA, Vienna, Austria (1966).
15. Project Hanford Management System docs online, “Generating and Using Control Charts”, HNF-PRO-4294, (2005).