

Cuantificación de yodo-131 en descargas de aguas residuales de laboratorios de medicina nuclear en Mérida, Yucatán, México

William Manrique¹, Elsa Rodríguez¹, Diana Cabañas², Yajaira Basulto²

Fecha de recepción: noviembre de 2015 – Fecha de aprobación: enero de 2016

RESUMEN

Los residuos hospitalarios en México, son considerados en general como Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos (RPBI), incluyendo entre ellos los residuos de isótopos radiactivos generados en medicina nuclear, los cuales requieren tratamientos especiales. De acuerdo a los registros de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), existen 139 laboratorios de medicina nuclear en México, de los cuales, ocho se encuentran en el estado de Yucatán, concentrados todos en la ciudad de Mérida. El objetivo de la presente investigación fue determinar la presencia de residuos de yodo-131 en agua residual y aire ambiental de laboratorios de medicina nuclear en la ciudad de Mérida, mediante una metodología propuesta, para dar a conocer si existe contaminación al manto freático causado por un mal manejo de dichos residuos. Se monitoreó durante 9 meses los niveles de radiación de yodo-131 en agua y aire, encontrando concentraciones dentro de los límites máximos permitidos (LMP) por la normatividad mexicana en ambos casos, sin embargo, al hacer comparaciones con legislaciones de otros países, el nivel de radiación encontrado en agua no cumple con la legislación de países como España, Alemania y Estados Unidos. A su vez, se estableció mediante un análisis estadístico, que la radiación emitida por pacientes en radioterapia con yodo-131 mantiene una tasa de decaimiento o eliminación constante independientemente de la dosis administrada al paciente, durante los primeros tres días de tratamiento, por lo cual se sugiere mantener un monitoreo continuo durante los ocho días de decaimiento de este radioisótopo para un mejor control y prevención de la contaminación al manto freático.

Palabras clave: yodo-131, residuos radiactivos, medicina nuclear.

Quantification of iodine-131 in wastewater discharges from nuclear medicine laboratories in Merida, Yucatan, Mexico

ABSTRACT

Hospital waste in Mexico are generally considered as hazardous waste Infectious Biological (RPBI), including among them radioactive waste generated in nuclear medicine, which require special treatment. According to records of the National Commission for Nuclear Safety and Safeguards (CNSNS), there are 139 nuclear medicine laboratories in Mexico, eight of them are in the state of Yucatan, all concentrated in the city of Merida. The objective of this research was to determine the presence of iodine-131 in environmental air and waste water from nuclear medicine laboratories in Merida city, through a set of proposed methodology, to make known whether the groundwater contamination caused by improper handling of such waste. Was monitored during 9 months (March to November 2007) the levels of radiation of iodine-131 in water and air, radiation levels were founded within the maximum allowed (LMP) for the regulation, however, to make comparisons with laws of other countries, the level of radiation found in water does not comply with the laws of countries like Spain, Germany and the United States. In turn, it was established with a statistical analysis the radiation emitted by radiotherapy in patients with iodine-131 is significantly high and maintains a elimination constant during the first three days of treatment, which is suggested by maintaining a continuous monitoring during the eight days of decay of the radioisotope to a better control and prevention measures to avoid contamination to groundwater.

Index words: iodine-131, radioactive waste, nuclear medicine.

¹Centro de Investigaciones Regionales, UADY. Avenida Itzaés # 490, Centro. Mérida, Yucatán, México.

²Facultad de Ingeniería Química, UADY. Mérida, Yucatán, México.

Correo electrónico: mvergara@uady.mx; rangulo@uady.mx; cvargas@uady.mx; yanet_basulto@hotmail.com

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de enero de 2016. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.3, 2015, ISSN1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

Los residuos radiactivos son regulados para su manejo, control y disposición final por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), quien a su vez, se rige por las normas internacionales expedidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Un residuo radiactivo es una sustancia en forma líquida, sólida o gaseosa no reutilizable ni reciclable que contiene una cantidad de radionúclidos (elementos radiactivos) tal que su vertido o su dispersión pueden tener repercusiones en la salud humana y el medio ambiente.

La producción total anual de residuos radiactivos en la Unión Europea es de 40,000 m³, de los cuales, aproximadamente un 80% tiene una radiactividad media y baja con una vida corta (CSN, 2007). En Yucatán, no existen registros previos que den a conocer las actividades en milicurios (mCi) o milibequerels (mBq) de desechos radiactivo, tampoco existe una metodología establecida para cuantificar dichas actividades en descargas de aguas residuales, ya que por disposición de la CNSNS cada laboratorio establece su propia metodología para su informe anual de actividades (CNSNS, 2007).

Adicionalmente, en Mérida y en general en el estado de Yucatán, las descargas de aguas residuales reciben como único tratamiento su depósito temporal a fosas sépticas y posteriormente se vierten en forma directa al manto freático, lo que lo hace muy susceptible a la contaminación y con ello a repercutir en el medio ambiente y a la salud pública.

El uso de la radiación en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades se ha convertido en una herramienta básica en medicina. Con ella se ha podido realizar exploraciones del cerebro y los huesos, tratar el cáncer, estudios renales y marcaje de anticuerpos, dar seguimiento a hormonas y otros compuestos químicos (Baró *et al.*, 2000; Seoáñez, *et al.*, 2000).

En los laboratorios de medicina nuclear se emplean principalmente dos radioisótopos: yodo-129 y yodo-131. Los principales usos médicos del yodo-131 son la captación tiroidea de yodo, centelleografía de tiroides, tratamiento de hipertiroidismo y para el cáncer de tiroides.

La radioterapia con yodo-131 se aplica a personas que padecen de cáncer para destruir las células neoplásicas malignas que se diseminan rápidamente (Iturbe, 2001) y para radioterapia de personas con afecciones tiroideas.

Cuando se ingiere una pequeña dosis de yodo-131 (de 5 mCi a 30 mCi), éste es adsorbido por el torrente sanguíneo en el tracto gastrointestinal y es concentrado por la sangre en la glándula tiroides,

donde comienza a destruir las células, excretándose por los riñones de 35-75% en 24 horas (Baró *et al.*, 2000). Éste tratamiento hace que la actividad de la tiroides se reduzca.

En laboratorios de medicina nuclear de Yucatán el yodo-131 se adquiere en presentaciones precalibradas y el proveedor es el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Las dosis recomendadas para adultos son las siguientes:

- Captación tiroidea:
0.22x10⁶ Bq (6 µCi).
- Centelleografía de tiroides:
1.11x10⁶ Bq - 3.7x10⁶ Bq (30 µCi - 100 µCi).
- Hipertiroidismo:
111x10⁶ Bq - 370x10⁶ Bq (3 mCi - 10 mCi).
- Carcinoma tiroideo:
3.7x10⁹ Bq - 7.4x10⁹ Bq (100 mCi - 200 mCi).

En la Tabla 1 se observan las características del yodo-131 utilizado en estos laboratorios. La cantidad promedio anual es aproximadamente de 10 veces mayor a la actividad máxima (Manrique, 2006).

Análisis comparativo de la Normatividad

En la siguiente revisión de la normatividad de diferentes países, se presentan los límites máximos permitidos (LMP) de yodo-131 específicamente en agua y aire, homogeneizando las unidades dadas por las diferentes leyes, para comparar dichos límites con los que se aplican en México, como se muestra en la Tabla 2.

En cuanto al LMP en agua, Alemania y Estados Unidos son los países con menor LMP y tanto México como España poseen el LMP más grande, por lo cual, la seguridad es menor. Para el LMP en aire, no se puede generalizar la comparación, ya que el límite de España no está establecido en las mismas unidades, en este caso México es el que posee el límite menor y Alemania por el amplio rango que establece su normatividad es el que posee el LMP mayor.

Normatividad en España

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), es el encargado de establecer y publicar los límites máximos de radionúclidos en general. En el manual general de protección radiológica está establecido el límite máximo permitido para el yodo-131 de 1x10⁵ Bq/m³ en agua y un límite máximo de radiación en el aire de 3x10³ Bq/año para el público en general (CSN, 2002).

Normatividad de Alemania

En la República Federal de Alemania la aplicación de radiación ionizante y de materiales radiactivos en diagnósticos médicos y radioterapia es regulada por dos leyes: las ordenanzas de protección radiológica

(*Strahlenschutzverordnung* or "*StrlSchV*"), en vigor desde agosto del 2001. Y por las directrices para la protección a la radiación en medicina (*Strahlenschutz in der Medizin*), publicada en el 2002; que establecen los límites máximos para el yodo-131 en el aire de 5 Bq/m³, cuando el aire es <10⁴ m³/hora, y 0.5 Bq/m³ cuando el aire es >10⁴ m³/hora. El valor límite para yodo-131 en las aguas residuales es de 5x10⁴ Bq/m³ cuando la liberación es <10⁵ m³/año, y 5x10³ Bq/m³ cuando la liberación es >10⁵ m³/año (BMU, 2008).

Normatividad de Estados Unidos

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) es la encargada de establecer y regular las normas que especifican el límite máximo permitido de radiactividad, en particular el límite del yodo-131 en aire es de 4.44x10³ Bq/m³ y en agua es de 6.7x10⁴ Bq/m³ (EPA, 1997).

Normatividad Nacional

Específicamente para el yodo-131, se aplican los límites máximos permitidos de concentraciones en agua y aire establecidos en la sección 5.7 de la Norma Oficial Mexicana NOM-006-NUCL-1994, "Criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos del público". Estos límites son: 1x10⁵ Bq/m³ en agua residual y 3 Bq/m³ en aire.

MATERIALES Y MÉTODOS

Toma de muestras

El período de muestreo fue de marzo a noviembre de 2007. Se estableció como lugar de muestreo 1 de los

6 laboratorios del estado que autorizó dicho monitoreo.

Se tomaron muestras homogéneas en la fosa de sedimentación exclusiva del cuarto de aislamiento de pacientes en radioterapia con yodo-131 (Figura 1). Las muestras fueron colectadas diariamente para un máximo de dos pacientes por día, ya que no se permite la hospitalización de más de dos pacientes a la vez.

Se tomaron muestras individuales de cada fosa diariamente durante los primeros tres días de tratamiento, la primera a las 24 horas después de ser ingerida la dosis de radioisótopo por el paciente en radioterapia en forma de yoduro de sodio (yodo-131) (Figura 2).

El muestreo de aire ambiental se colectó a 1 m de distancia frente al paciente en radioterapia.

La fosa de sedimentación previa al vertido al pozo de adsorción se va descargando por rebose, es decir, al llenarse completamente se descarga parcialmente hasta alcanzar el nivel del flotador. El pozo de absorción posterior está diseñado para almacenar los desechos radiactivos durante su periodo de decaimiento. Sin embargo, la acumulación continua de estos residuos hace mucho más prolongado el periodo de decaimiento final, ya que este radioisótopo tarda ocho días de vida media en decaer, al adicionar diariamente una cantidad constante del radioisótopo, su vida media de decaimiento no podrá ser predecible.

Tabla 1. Características del yodo-131 utilizado en laboratorios del Estado de Yucatán.

| Isótopo | Actividad Máxima | Toxicidad | Clase y tipo | Forma química/ Radioquímica | Forma física |
|----------|-------------------|-----------|------------------|---|--------------|
| Yodo-131 | 5.55 GBq (150mCi) | Alta | IIB (vía húmeda) | Yoduro de sodio o de potasio Metayodobencilguanidina | Líquido |

Tabla 2. Comparación de los LMP de yodo-131 en diferentes países.

| Países | LMP en agua | LMP En aire |
|----------------|--|--|
| España | 1x10 ⁵ Bq/m ³ | 3x10 ³ Bq/año |
| Alemania | 5x10 ³ Bq/m ³ -5x10 ⁴ Bq/m ³ | 0.5 Bq/m ³ -5 Bq/m ³ |
| Estados Unidos | 6.7x10 ⁴ Bq/m ³ | 4.44x10 ³ Bq/m ³ |
| México | 1x10 ⁵ Bq/m ³ | 3 Bq/m ³ |

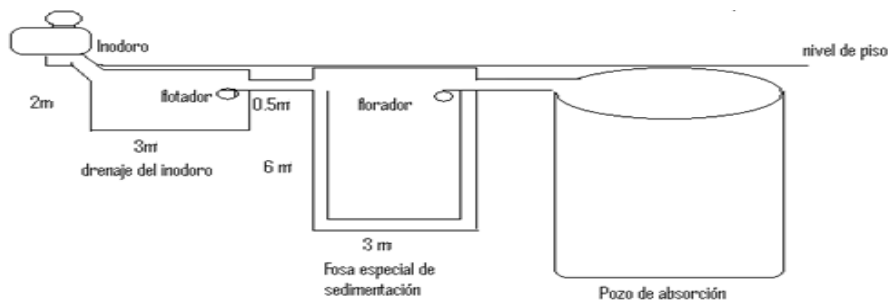


Figura 1. Fosa de sedimentación del cuarto de aislamiento de pacientes en radioterapia con yodo-131.

Por lo anterior, es considerado un potencial fuente de contaminación por el deterioro o derrame accidental de este pozo de almacenamiento o por superación de su capacidad en volumen.



Figura 2. Solución de yoduro de sodio (yodo-131) utilizada en radioterapia

Materiales y equipo

Para el desarrollo del muestreo de las aguas residuales, se utilizaron micropipetas de 10 a 1000 μL marca BIOHIT, guantes de látex, cubre-bocas, tomando las muestras con jeringas desechables de 10 mL y depositándolas en viales de polipropileno de 2 mL. Inmediatamente después se realizó la medición de la radiación emitida por el líquido con el equipo calibrador de dosis marca Caprintec, modelo ACT01 (Figura 3).



Figura 3. Calibrador de Dosis, marca Caprintec, modelo ACT01.

A su vez se tomaron lecturas de la radiación emitida por el paciente en radioterapia de yodo 131 a un metro de distancia con el equipo Monitor Geiger-Müller Marca Ludlum Measurement, modelo 3A Survey Meter (Figura. 4) y se confirmaron las mediciones con el Monitor de área Marca INFORMEDI, modelo MA03 (Figura 5).

Se procedió de acuerdo al procedimiento SRMNV-05 del manual de “manejo y disposición de desechos radiactivos” (Manrique, 2006), el cual establece una metodología para recolectar, almacenar y disponer de los desechos radiactivos líquidos y sólidos dentro

del laboratorio de medicina nuclear monitoreado, así como los cuidados que debe tenerse para su manejo, hasta ser vertidos al drenaje común.



Figura 4. Monitor Geiger-Müller, marca Ludlum Measurement, Modelo 3A.



Figura 5. Monitor de área. Marca INFORMEDI, modelo MA03

Con la finalidad de corroborar el porcentaje de la dosis de yodo-131 administrada al paciente que se excreta llegando a las aguas residuales del cuarto de aislamiento, se utilizó como base el procedimiento SRMNV-04 “levantamiento de niveles de radiación y monitoreo de contaminación” de acuerdo a ICRP, 1977 y Martin y Fenner, 1997.

Para el análisis de los resultados se utilizaron dos metodologías:

Primera, comparación de la concentración radiactiva de yodo-131, en las aguas residuales monitoreadas, con el límite máximo permitido (LMP) según la norma (NOM-006-NUCL-1994).

Se registraron las concentraciones radiactivas de 30 pacientes durante 3 días de aislamiento. Se identificó la concentración radiactiva máxima, tanto en agua residual, como en aire-ambiente, se realizó la conversión de unidades para comparar las concentraciones radiactivas máximas encontradas con el LMP de la norma, en el caso del aire ambiente, la conversión fue de mRem/h a Bq/m^3 , y en el caso del agua, de mCi a Bq/m^3 .

Segunda, se realizó un análisis comparativo de la eliminación de yodo-131 en aguas residuales. Mediante dos pruebas de hipótesis evaluadas en el paquete estadístico Statgraphics Centurion XV.II, y

de acuerdo a la estrategia experimental propuesta, se compararon las concentraciones radiactivas medias por día de yodo-131 eliminadas en las aguas residuales monitoreadas, una prueba de hipótesis para cada grupo de pacientes con dosis de yodo-131 iguales, es decir, una para pacientes con dosis de 100 mCi y otra para pacientes con dosis de 150 mCi, para conocer si el día de eliminación incide significativamente en la concentración eliminada en las aguas residuales de pacientes con las mismas dosis. La metodología desarrollada para llevar a cabo la presente investigación, se muestra en la Figura 6.

Para el análisis estadístico de los datos se realizó una prueba de hipótesis para evaluar y comparar los valores promedios de desechos líquidos contaminados con yodo radiactivo, que fueron vertidos durante los tres días de hospitalización del paciente en radioterapia (promedios de eliminación de los días 1-2 y 2-3), con diferencias en la cantidad de dosis administrada a paciente: 10 muestras de aguas residuales de pacientes con dosis de 100 mCi

y 20 muestras de aguas residuales de pacientes con dosis de 150 mCi.

La variable respuesta fueron los mCi de yodo-131 en agua residual eliminado por el paciente, con un nivel de confianza de confianza 95%.

RESULTADOS

Comparación de la concentración radiactiva máxima de yodo-131 monitoreada tanto en agua residual como en aire-ambiente, con el límite máximo permitido (LMP).

En la Tabla 3 se observa el registro de las concentraciones radiactivas monitoreadas por paciente durante los tres días de aislamiento. En aire-ambiente, se tomaron lecturas en mRem por hora (mRem/h) convertidas a mCi para compararlas con la norma; en el agua residual, las lecturas fueron tomadas en milicurios (mCi) convertidas a Bq para compararlas con la norma.

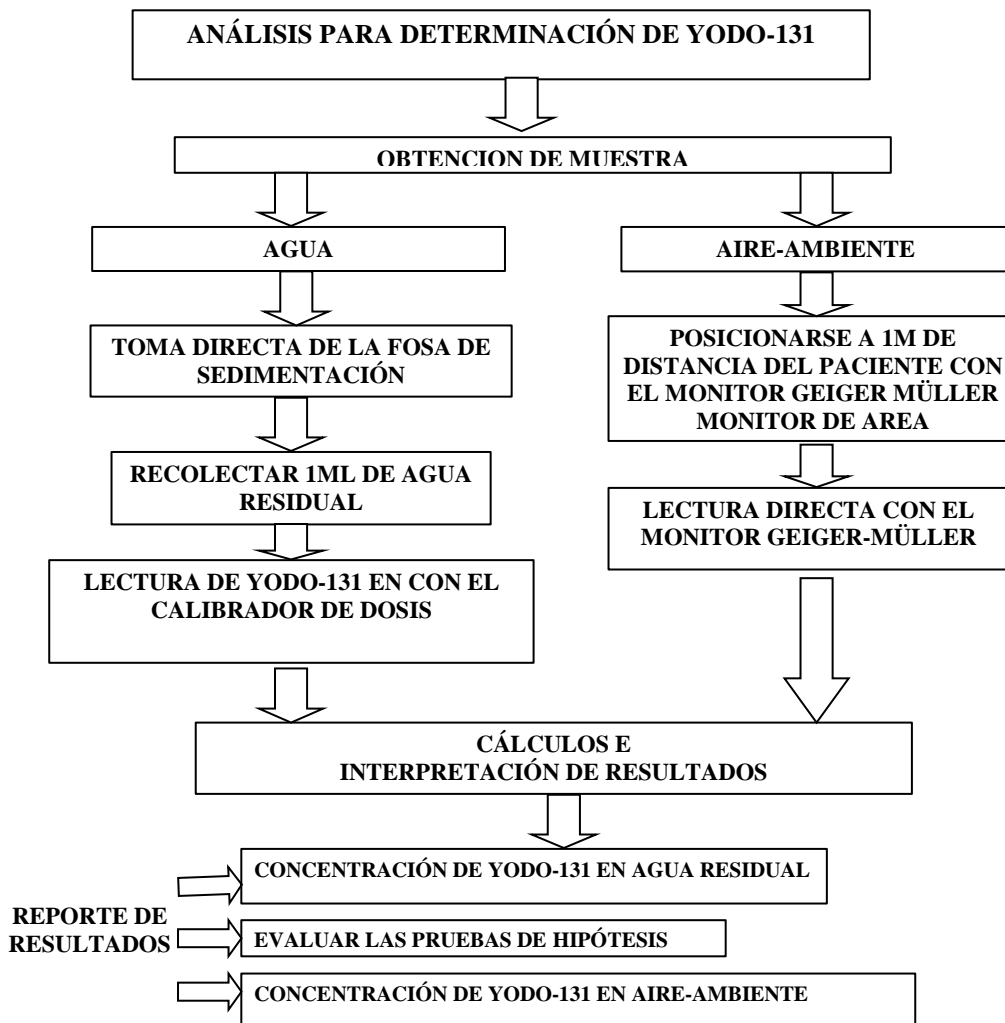


Figura 6. Metodología para monitorear yodo-131 en laboratorios de medicina nuclear.

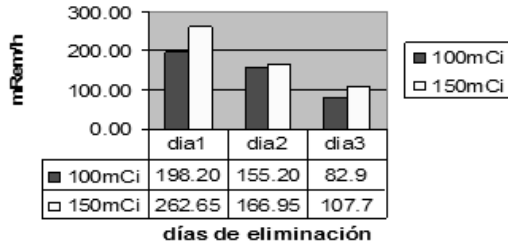


Figura 7. Promedios de concentración radiactiva de yodo 131 en aire-ambiente.

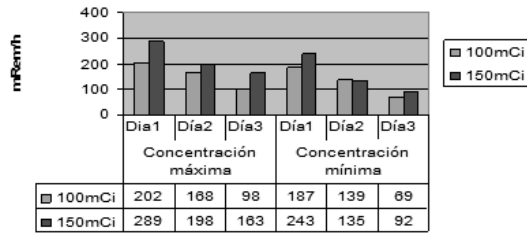


Figura 8. Concentraciones radiactivas máximas y mínimas de yodo-131 en aire.

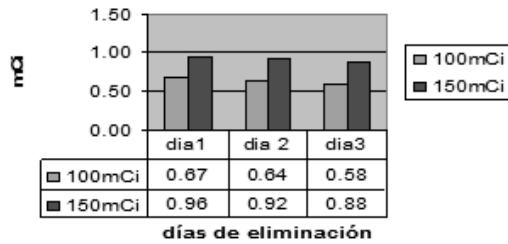


Figura 9. Promedios de concentración radiactiva de yodo-131 en agua residual.

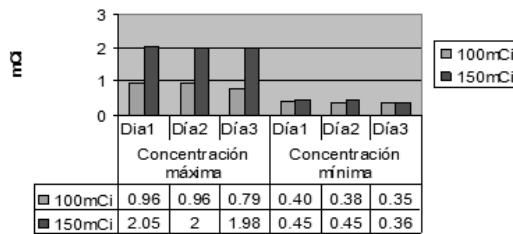


Figura 10. Concentraciones radiactivas máximas y mínimas de yodo en agua.

En aire-ambiente: Las concentraciones radiactivas en promedio por día encontradas en el aire-ambiente se observan en la Figura 7. Las concentraciones radiactivas máximas y mínimas encontrada en aire-ambiente, durante los tres días de monitoreo se observan en la Figura 8.

En agua residual: Las concentraciones radiactivas en promedio por día de eliminación, encontradas en el agua residual se observan en la Figura 9. En la Figura 10 se presentan las concentraciones radiactivas máximas y mínimas encontrada en aguas residuales durante los tres días de monitoreo.

Para conocer si la descarga de yodo en aguas residuales de éste laboratorio está contaminando el manto freático más allá de los límites establecidos por la NOM-006-NUCL-1994, se comparó la concentración máxima encontrada con el límite máximo permitido en México ($LMP = 1 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$), según la NOM-006-NUCL-1994, utilizando el factor de conversión $1 \text{ mCi} = 37\,000 \text{ Bq}$ se obtiene: Concentración radiactiva máxima encontrada: $2.05 \text{ mCi} = 7.585 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$.

Ésta concentración radiación máxima encontrada (2.05 mCi), representa un 1.37% de la dosis administrada al paciente (150 mCi), de acuerdo a estudios realizados por Martin y Fenner 1997, encontraron un 1.1% de la dosis administrada al paciente en las aguas residuales, lo cual es un valor aproximado a la cantidad encontrada en el presente trabajo.

DISCUSIÓN

De acuerdo a las concentraciones obtenidas en los tres días de análisis se observa el decaimiento natural del isótopo radiactivo que teóricamente deja de ser peligroso a los ocho días, en el caso de este radioisótopo. Sin embargo, la radiactividad hasta el tercer día monitoreado supera los límites máximos permitidos, por lo cual, se debe evitar el rebose, derrame o infiltración de las fosas sépticas instaladas en los laboratorios de medicina nuclear, ya que son potenciales riesgos de contaminar el acuífero.

Las plantas de tratamiento de residuos de yodo-131 en aguas residuales, utilizan varias etapas durante el proceso, entre ellas: filtración, decantación, resinas de intercambio iónico, lodos activados y evaporación, para concentrar la actividad de los residuos (Pritchard *et al.*, 1981; Testoni *et al.*, 1988; Erlandsson *et al.*, 1989; Stetar *et al.*, 1993).

Se recomienda utilizar alguna de las tecnologías de la Tabla 4 para el tratamiento de residuos radiactivos líquidos (Alcocer, 1997), como el yodo-131, dependiendo del procedimiento que se desee realizar: separar, reducir el volumen, desintoxicar o encapsular.

Para el análisis comparativo de la eliminación de yodo-131 en aguas residuales se tomaron en cuenta los resultados de 30 pacientes, analizados en dos pruebas de hipótesis:

Prueba de hipótesis 1: 10 muestras de agua de pacientes con dosis de 100 mCi .

Prueba de hipótesis 2: 20 muestras de agua de pacientes con dosis de 150 mCi .

Tabla 3. Pacientes en tratamiento con yodo-131 monitoreados a diferentes dosis.

| Paciente | Días | Yodo-131 eliminado (dosis 100 mCi) | | | Yodo-131 eliminado (dosis 150 mCi) | | |
|----------|------|------------------------------------|------|----------------------|------------------------------------|------|----------------------|
| | | Agua μCi | Aire | | Agua μCi | Aire | |
| | | | mRem | mCi | | mRem | Mci |
| 1 | 1 | 0.80 | 200 | 5.4×10^{-9} | 0.80 | 252 | 6.8×10^{-9} |
| | 2 | 0.80 | 156 | 4.2×10^{-9} | 0.77 | 170 | 4.6×10^{-9} |
| | 3 | 0.79 | 73 | 1.9×10^{-9} | 0.68 | 112 | 3×10^{-9} |
| 2 | 1 | 0.84 | 187 | 5×10^{-9} | 0.85 | 267 | 7.2×10^{-9} |
| | 2 | 0.82 | 156 | 4.2×10^{-9} | 0.81 | 152 | 4.1×10^{-9} |
| | 3 | 0.69 | 92 | 2.5×10^{-9} | 0.81 | 105 | 2.8×10^{-9} |
| 3 | 1 | 0.96 | 187 | 5×10^{-9} | 1.00 | 246 | 6.6×10^{-9} |
| | 2 | 0.96 | 165 | 4.4×10^{-9} | 0.97 | 153 | 4.1×10^{-9} |
| | 3 | 0.78 | 89 | 2.4×10^{-9} | 0.97 | 99 | 2.7×10^{-9} |
| 4 | 1 | 0.45 | 199 | 5.4×10^{-9} | 0.68 | 255 | 6.9×10^{-9} |
| | 2 | 0.38 | 161 | 4.3×10^{-9} | 0.65 | 163 | 4.4×10^{-9} |
| | 3 | 0.38 | 80 | 2.2×10^{-9} | 0.62 | 101 | 2.7×10^{-9} |
| 5 | 1 | 0.79 | 193 | 5.2×10^{-9} | 0.80 | 253 | 6.8×10^{-9} |
| | 2 | 0.65 | 139 | 3.7×10^{-9} | 0.78 | 147 | 3.9×10^{-9} |
| | 3 | 0.59 | 69 | 1.9×10^{-9} | 0.77 | 92 | 2.5×10^{-9} |
| 6 | 1 | 0.68 | 200 | 5.4×10^{-9} | 0.89 | 249 | 6.7×10^{-9} |
| | 2 | 0.66 | 142 | 3.8×10^{-9} | 0.78 | 151 | 4.1×10^{-9} |
| | 3 | 0.66 | 77 | 2.1×10^{-9} | 0.78 | 97 | 2.6×10^{-9} |
| 7 | 1 | 0.40 | 187 | 5×10^{-9} | 0.45 | 243 | 6.5×10^{-9} |
| | 2 | 0.38 | 150 | 4×10^{-9} | 0.45 | 160 | 4.3×10^{-9} |
| | 3 | 0.36 | 93 | 2.5×10^{-9} | 0.36 | 100 | 2.7×10^{-9} |
| 8 | 1 | 0.58 | 212 | 5.7×10^{-9} | 0.78 | 261 | 7×10^{-9} |
| | 2 | 0.56 | 168 | 4.5×10^{-9} | 0.74 | 176 | 4.7×10^{-9} |
| | 3 | 0.56 | 98 | 2.6×10^{-9} | 0.72 | 98 | 2.6×10^{-9} |
| 9 | 1 | 0.77 | 215 | 5.8×10^{-9} | 0.88 | 255 | 6.9×10^{-9} |
| | 2 | 0.77 | 162 | 4.4×10^{-9} | 0.84 | 169 | 4.5×10^{-9} |
| | 3 | 0.77 | 162 | 4.4×10^{-9} | 0.84 | 169 | 4.5×10^{-9} |
| 10 | 1 | 0.47 | 202 | 5.4×10^{-9} | 1.00 | 273 | 7.4×10^{-9} |
| | 2 | 0.38 | 153 | 4.1×10^{-9} | 1.00 | 182 | 4.9×10^{-9} |
| | 3 | 0.35 | 70 | 1.9×10^{-9} | 0.98 | 163 | 4.4×10^{-9} |
| 11 | 1 | | | | 2.05 | 260 | 7×10^{-9} |
| | 2 | | | | 2.00 | 142 | 3.8×10^{-9} |
| | 3 | | | | 1.98 | 95 | 2.5×10^{-9} |
| 12 | 1 | | | | 1.18 | 266 | 7.2×10^{-9} |
| | 2 | | | | 1.10 | 189 | 5.1×10^{-9} |
| | 3 | | | | 1.10 | 112 | 3×10^{-9} |
| 13 | 1 | | | | 1.09 | 277 | 7.5×10^{-9} |
| | 2 | | | | 1.00 | 173 | 4.7×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.98 | 115 | 3.1×10^{-9} |
| 14 | 1 | | | | 0.78 | 289 | 7.8×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.77 | 191 | 5.2×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.72 | 150 | 4×10^{-9} |
| 15 | 1 | | | | 0.99 | 286 | 7.7×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.92 | 198 | 5.3×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.88 | 123 | 3.3×10^{-9} |
| 16 | 1 | | | | 1.00 | 265 | 7.2×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.98 | 173 | 4.7×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.98 | 112 | 3×10^{-9} |
| 17 | 1 | | | | 0.98 | 270 | 7.3×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.96 | 185 | 5×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.84 | 100 | 2.7×10^{-9} |
| 18 | 1 | | | | 1.02 | 266 | 7.2×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.98 | 167 | 4.5×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.96 | 100 | 2.7×10^{-9} |
| 19 | 1 | | | | 1.10 | 248 | 6.7×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.98 | 135 | 3.6×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.96 | 93 | 2.5×10^{-9} |
| 20 | 1 | | | | 0.89 | 272 | 7.3×10^{-9} |
| | 2 | | | | 0.84 | 163 | 4.4×10^{-9} |
| | 3 | | | | 0.76 | 97 | 2.6×10^{-9} |

En la Tabla 5 se observa la prueba de hipótesis desarrollada para muestras de agua con dosis de 100 mCi, el estadístico *t* calculado es igual a -0.00358424. Puesto que el valor-*p* para la prueba es de 0.99718, es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula con un 95.0% de nivel de confianza.

El intervalo de confianza muestra que las medias muestrales caen entre -0.293579 y 0.292579. De lo anterior se observa que la concentración de radioisótopo cuantificada para pacientes con 100mCi no varía significativamente de un día a otro, es decir, el comportamiento del radioisótopo es el establecido de acuerdo a la literatura.

La Tabla 6 muestra la prueba de hipótesis desarrollada para muestras de agua con dosis de 150 mCi, el estadístico *t* calculado es igual a 0.436727. Puesto que el valor-*p* para la prueba es mayor o igual

que 0.05, se acepta la hipótesis nula con un 95.0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que las medias muestrales caen entre -0.150869 y 0.233869. Por lo anterior, también se observa para el caso de los pacientes con dosis de 150mCi que el comportamiento del radioisótopo es el esperado, según la literatura.

De la comparación de la normatividad de los diversos países se presentan los resultados en la Tabla 7, en el cual se puede observar que la concentración máxima de yodo-131 encontrada en agua residual sobrepasa significativamente los LMP para países como España, Alemania y Estados Unidos. En general, para las normas mexicanas, ambas concentraciones de radiación de yodo-131 cumplen con el LMP.

Tabla 4. Tecnologías para el tratamiento de residuos radiactivos.

| Tipo | Función | Tratamiento |
|---------|--|---|
| Físico | Separación | Ultrafiltración, coagulación/cristalización |
| | Reducción de volumen | Adsorción en carbono, centrifugación, electrodiálisis, evaporación, filtración, floculación/sedimentación, resinas de absorción |
| | Almacenamiento | Encapsulación |
| Químico | Separación | Extracción (líquido-líquido), quelatación, disolución |
| | Reducción de volumen | Calcinación, intercambio iónico, precipitación |
| Térmico | Reducción de volumen y desintoxicación | Incineración, sal fundida, oxidación térmica de lecho fluidizado, horno rotatorio |
| | Fijación y encapsulamiento | Encapsulación, solidificación en cemento, solidificación en cal, microencapsulación termoplas, polímeros orgánicos, autoaglutinación, vitrificación, sorbente |

Tabla 5. Datos de la prueba de hipótesis 1 (dosis de 100 mci).

| | \bar{x} de eliminación (día 1-2) | \bar{x} de eliminación (día 2-3) |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Recuento | 10 | 10 |
| Promedio | 0.6965 | 0.697 |
| Desviación Estándar | 0.184422 | 0.400737 |
| Coefficiente de Variación | 26.4784% | 57.4945% |
| Mínimo | 0.39 | 0.365 |
| Máximo | 0.96 | 1.74 |
| Rango | 0.57 | 1.375 |

Tabla 6. Datos de la prueba de hipótesis 2 (dosis de 150 mci).

| | \bar{x} de eliminación (día 1-2) | \bar{x} de eliminación (día 2-3) |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Recuento | 20 | 20 |
| Promedio | 0.94025 | 0.89875 |
| Desviación Estándar | 0.300081 | 0.30091 |
| Coefficiente de Variación | 31.915% | 33.481% |
| Mínimo | 0.45 | 0.405 |
| Máximo | 2.025 | 1.99 |
| Rango | 1.575 | 1.585 |

Tabla 7. Comparación de los LMP con la concentración de yodo-131 encontrada.

| Países | LMP en agua | Concentración máxima encontrada en agua | LMP en aire | Concentración máxima encontrada en aire |
|----------------|----------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| España | $1 \times 10^2 \text{ Bq/m}^3$ | | $3 \times 10^3 \text{ Bq/año}$ | |
| Alemania | $5 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ | 2.05 mCi | $0.5\text{-}5 \text{ Bq/m}^3$ | 255 mRm |
| Estados Unidos | $6.7 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ | $7.585 \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ | $4.44 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ | $7.8 \times 10^{-9} \text{ mCi}$ |
| México | $1 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$ | | 3 Bq/m^3 | $2.886 \times 10^{-4} \text{ Bq/m}^3$ |

CONCLUSIONES

La actividad promedio cuantificada de yodo-131 en agua residual fue de 0.823 mCi de yodo-131; y en el aire ambiente fue de 167.88 mRem.

Al comparar las actividades máximas encontradas tanto en agua residual (2.05 mCi) como en aire ambiente (289 mRm) con la normatividad, ambas cumplen el límite máximo permitido, según la NOM-006-NUCL-1994. Sin embargo, se concluye que a pesar de que el decaimiento natural es el tratamiento más económico y recomendado para este tipo de aguas residuales, la concentración radiactiva observada hasta el tercer día de monitoreo es mayor que los límites máximos permitidos en otros países, por lo cual podría representar un riesgo latente en el caso de que exista un derrame o infiltración al manto acuífero.

Se recomienda hacer un monitoreo periódico en todos los laboratorios de medicina nuclear de la

ciudad, mediante la metodología desarrollada para determinar y cuantificar la presencia de residuos de yodo 131 en aguas residuales y aire ambiente, con lo cual se podrá tener mayor control y dar seguimiento a las concentraciones de residuos radioactivos en éste tipo de aguas residuales, que pueden contaminar el manto acuífero por efecto de rebose o acumulación de diferentes concentraciones de radioisótopo vertidos en diferentes periodos de tiempo.

De las dos pruebas de hipótesis realizadas para conocer si influye el día de eliminación de yodo-131 con la actividad encontrada en las aguas residuales, se obtuvo en ambos casos, que no existe diferencia significativa en la eliminación con las dosis administradas, por lo tanto, se recomienda tener estricto control de los residuos generados, no solo durante el primer día, sino en los tres días que permanece aislado el paciente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al FOMIX Gobierno del Estado de Yucatán – CONACYT, por el patrocinio del proyecto FOMIX Yucatán, Clave de Registro: YUC-2005-04-21281.

REFERENCIAS

Alcocer, Victor V. (1997). Caracterización de las aguas residuales del laboratorio de servicios a la industria de la FIQ y alternativas para su tratamiento. Tesis de licenciatura de Quim. Ind. FIQ-UADY, Mérida, Yucatán, México.

Baró et al. (2000). Origen y Gestión de Residuos Radiactivos. 3° ed. Ilustre Colegio Oficial de Físicos. pp 14-59.

BMU (2008). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación y Seguridad Nuclear). Ordenanzas y directrices para la protección de la radiación en medicina.

http://www.bmu.de/strahlenschutz/strahlenschutzrecht/neue_strahlenschutzverordnung/doc/6887.php.

CSN (2002). Consejo de Seguridad Nuclear. Manual General de Protección Radiológica, pp 66-99.

CSN (2007). Consejo de Seguridad Nuclear. Seguridad Nuclear.

http://www.csn.es/plantillas/frame_nivelult.jsp?id_nodo=1642&&keyword=&auditoria=F.

CNSNS (2007). Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. Unidad Administrativa. Envío de Información Solicitada. No. de orden 181000002107.

EPA (1997). Características ambientales de la EPA, la NRC y DOE sitios contaminados con sustancias radiactivas. Environmental Protection Agency. Office of Radiation and Indoor Air, pp 57-58.

Erlandsson B, Bjurman B, Mattsson S. (1989). Calculation of radionuclide ground deposition by means of measurements of sewage sludge. "Water, Air and Soil Pollution"; 45:329.

Iturbe G. José L. (2001). Fundamentos de radioquímica México. Cigome S. A. de C. V. pp 7-96, 117-174, 218-278.

Manrique, V. W. (2006). Procedimiento SRMNV-03. Manejo y cuidado del equipo de protección radiológica. Manual de Seguridad Radiológica del Laboratorios de Medicina Nuclear In Vitro S.C.P.

Manrique, V. W. (2006). Procedimiento SRMNV-04. Levantamiento de niveles de radiación y monitoreo de contaminación. Manual de Seguridad Radiológica del Laboratorios de Medicina Nuclear In Vitro S.C.P.

Manrique, V. W. (2006). Procedimiento SRMNV-05. Manejo y disposición de desechos radiactivos.

Manual de Seguridad Radiológica del Laboratorios de Medicina Nuclear In Vitro S.C.P.

Martin, J.E.; Fenner, F. D. (1997). Radioactivity in municipal sewage and sludge. "Public Health Reports", Vol. 112. pp 308-316.

NOM-006-NUCL-1994. Criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos del público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 1995.

Pritchard HM, Gessel TF, Davis E. (1981). Iodine-131 levels in sludge and treated municipal wastewaters near a large medical complex. AmJ Public Health; 71:47.

Seoáñez C. M. (2000). Residuos: Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. España, Mundi-Prensa, pp 207-225.

Stetar EA, Boston HL, Larsen IL, Mobley MH. (1993). The removal of radioactive cobalt, cesium, and iodine in a conventional municipal wastewater treatment plant. "Water Environ Res"; 65:630-9.

Testoni G, Bernardi T, Tubertini O. (1988). Radioactive contamination in the Bologna sewage system due to nuclear medicine examinations. Vol. III. Pergamon Press;1353-7.

Este documento debe citarse como: Manrique W., Rodriguez E., Cabañas D., Basulto Y. (2015). **Cuantificación de yodo-131 en descargas de aguas residuales de laboratorios de medicina nuclear en Mérida, Yucatán, México.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-3, pp. 137-146, ISSN 1665-529-X.