



PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE ^{131}I DE VERTIMIENTOS LÍQUIDOS EN UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ^{127}I COMO PATRÓN DE REFERENCIA

Emeterio Cruz¹, Noelia M. Quiverio², Julian D. Villada³ y Manuel A. Mayorga⁴

^{1,4}*Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI) - Grupo de Investigación INDETECA (ECCI)*
emeteriocs@yahoo.com, alejo_mayorga@yahoo.com

^{2,3}*Fundación Universidad de América - Grupo de Investigación INDETECA (ECCI)*
noemel_25@hotmail.com, judavian@hotmail.com

ABSTRACT

The ^{131}I prepared as potassium iodide (KI) or sodium iodide (NaI) is given to patients to treat some diseases related to the thyroid gland, in doses of 15 to 30 mCi for hyperthyroidism and 100 to 300 mCi in treatments of thyroid cancer. Up to 80% of the administered activity is discarded by the patient through the body fluids over a period of 24 h; these radioactive waste must be controlled and accordingly the different countries based on radiological impact studies establishing maximum release rates. In Colombia, the Resolution 180005 2010 establishes 1000 Bq/day (2.7027×10^{-5} mCi /day), 10000 Bq/month (2.7027×10^{-4} mCi/month) or 100000 Bq/year (2.7027×10^{-3} mCi/year), this restriction requires implementing waste management methods generated by patients before discharge to the sewage networks. The method of retention of these wastes through tanks, without any treatment generates a high potential risk, therefore, this study shows three alternatives to remove the ^{131}I in the amount of waste liquids, to generate a small solid residue in secure containers, allowing pouring fluids with radioactive traces without exceeding the limits. The sizing of the system applicable to nuclear medicine services depends on the workload of the service and combines the three methods described here by a control system, which does not require the direct intervention of staff, optimizing safety and radiation protection in the service.

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de instalaciones para el ejercicio de la Medicina Nuclear es necesario tener en cuenta que el material radiactivo administrado al paciente es eliminado a través de los fluidos

corporales y las heces, en particular, en el caso de terapias con ^{131}I el paciente debe permanecer en el centro médico hasta que la actividad incorporada llegue a 33 mCi, es decir que a 1 m de distancia la tasa de dosis sea de 70 $\mu\text{Sv/h}$ [1]; a esta actividad remanente se llega en tiempos de 13.4 h para el paciente que ha recibido 100 mCi, 19 h el de 150 mCi y 23 h el que ha recibido 200 mCi, de donde se concluye que del 62% al 80% de la actividad administrada es excretada.

En algunos países se permite verter hasta 1 GBq de I-131 al año, en Colombia, mediante la resolución 180005 de 2010 se permiten límites de tasa de vertido [2] del orden de 10^5 Bq/año, lo que implica un manejo de los residuales para dar cumplimiento a esta norma; en este contexto, al evaluar algunos métodos implementados para este fin se observa que en el caso de tanques de retención [3], éstos representan un riesgo potencial alto debido a que la actividad se encuentra diluida en grandes volúmenes de residuos líquidos; también, el IAEA [4] afirma que es recomendable diluir o dispersar estos residuos frente a la posibilidad de los tanques, sin embargo, con la implementación de métodos de remoción es posible separar el ^{131}I de los residuales excretados que pueden tener un volumen de 100 L por paciente durante un día, para ser tratados como residuos sólidos embebidos en contenedores adecuados para que decaigan hasta actividades exentas y posteriormente realizar su disposición final.

Una revisión de las distintas técnicas para remover el ^{131}I de vertimientos líquidos indica que se han estudiado situaciones similares usando metodologías tradicionalmente usadas como el confinamiento de residuos radiactivos de baja y media radiactividad [5] o procedimientos no convencionales como separaciones por membrana para ^{125}I [6], osmosis inversa combinada con una evaporación para ^{137}Cs [7], o metodologías de disposición del ^{131}I más específicas referidas al área médica [8].

2. DATOS Y CÁLCULOS PREVIOS

Para llevar a cabo la experimentación, se realizaron los cálculos respectivos para conocer la concentración de ^{131}I a tratarse con el sistema de remoción, para ello se debe conocer la masa molar, la vida media y la actividad específica del ^{131}I [9]; los anteriores datos son necesarios en la determinación de la masa del ^{131}I preparada con el yoduro de potasio para diseñar la experimentación y lograr resultados confiables después de la remoción. A continuación se listan los datos requeridos para el cálculo de la actividad específica del ^{131}I :

- Masa molar (M): 131 g/mol
- Vida media (T): 8.04 días
- Actividad específica (SA): La actividad específica se calcula a partir de la ecuación (1).

$$SA = \frac{4.17 \times 10^{23}}{M \cdot T} \quad (1)$$

$$SA = \frac{4.17 \times 10^{23}}{131 \text{ g/mol} \cdot 8.04 \text{ días} \cdot 24 \text{ h/día} \cdot 3600 \text{ s/h}} \quad (1.1)$$

$$SA = 4.58 \times 10^{15} \text{ Bq/g} \quad (1.2)$$

- Masa de ^{131}I suministrada: Se sabe que la actividad promedio administrada a cada paciente es aproximadamente 5.55×10^9 Bq (5.55 GBq) de la cual el 80% es eliminado, por lo tanto la actividad (A) de ^{131}I a remover es de 4.44 GBq; ahora se calcula el equivalente en masa (M_i) teniendo en cuenta la actividad específica del ^{131}I calculada anteriormente:

$$M_i = \frac{A}{SA} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{4.44 \times 10^9 \text{ Bq}}{4.58 \times 10^{15} \text{ Bq/g}} \quad (2.1)$$

$$M_i = 9.69 \times 10^{-7} \text{ g} \quad (2.2)$$

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE SEPARACIÓN CONSIDERADOS

Para evaluar la capacidad de remoción se evaluaron tres métodos de separación, con los cuales se considera la posibilidad de proponer un sistema que integre y combine dichas metodologías, descritas a continuación:

3.1. Adsorción

La adsorción es la transferencia de uno o más solutos de una fase fluida a un lote de partículas sólidas. En este caso, se considera como soluto el ^{131}I el cual se adsorbe en un filtro con carbón activado.

3.1.1. Metodología

Para evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado se empleó el siguiente experimento; se utilizó yoduro de potasio no radiactivo (^{127}I) como soluto disuelto en agua destilada como disolvente, luego se emplearon 2 gramos de carbón activado para llevar a cabo la adsorción, como se muestra en la Figura 1. En la Tabla 1, se encuentran los datos de los experimentos realizados.

Tabla 1. Experimentos realizados para adsorción de yoduro de potasio.

Experimento	M_i (g)	M_C (g)	V_a (mL)	C_i (g/L)
1	6.0	2	200	30.0
2	3.0	2	200	15.0
3	1.5	2	200	7.5
4	1.0	2	200	5.0

Donde:

- M_i : Masa inicial de yodo
- M_C : Masa de carbón
- V_a : Volumen de agua
- C_i : Concentración inicial de la solución



Figura 1. Adsorción de la solución de yoduro de potasio empleando carbón activado.

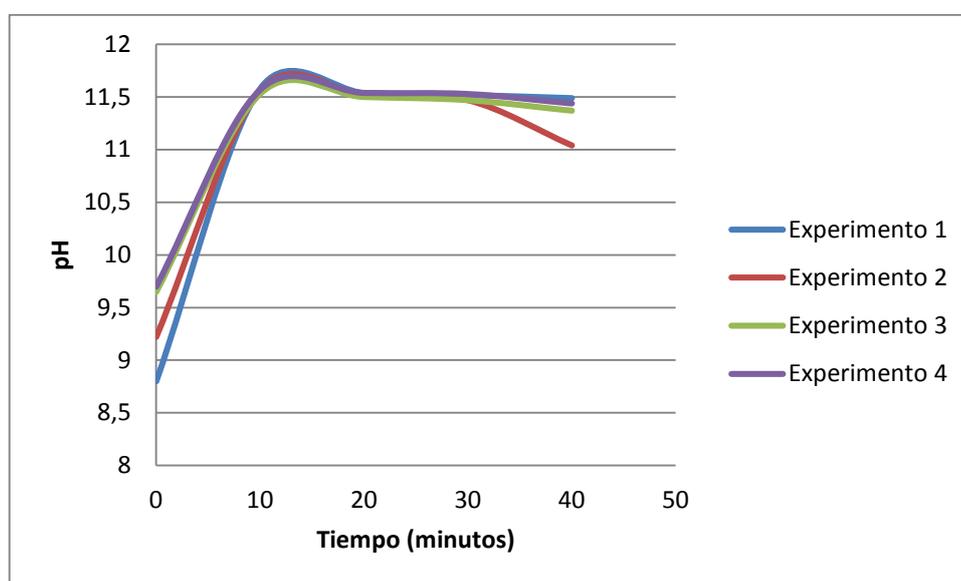
Luego de preparar estos cuatro experimentos, se evaluó la influencia del tiempo de retención del carbón activado midiendo tres variables (Potencial de hidrógeno –pH-, conductividad eléctrica [10] –CE- y sólidos disueltos totales –TDS-), en intervalos de 10 minutos durante 40 minutos. A continuación se tabularon los resultados obtenidos.

3.1.2. Resultados y análisis

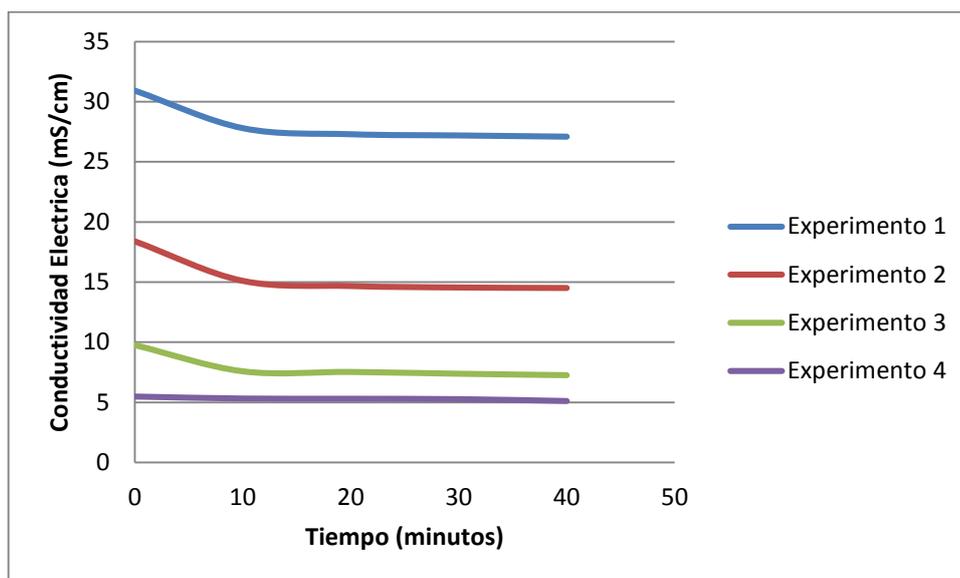
En la Tabla 2, se presentan los resultados obtenidos de las tres variables medidas para observar el cambio de la solución en el transcurso del proceso de adsorción.

Tabla 2. Resultados obtenidos en los 4 experimentos.

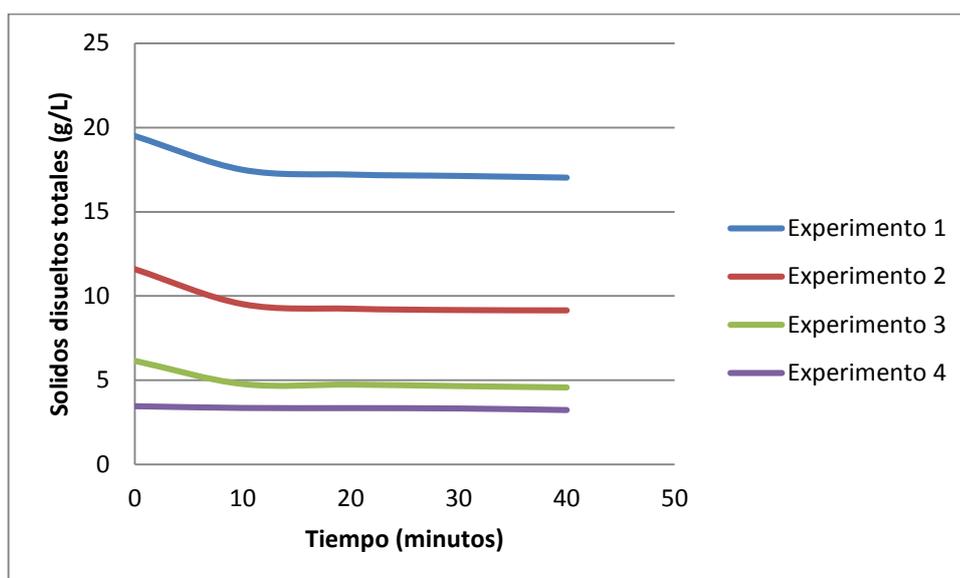
Tiempo (min)	Experimento 1			Experimento 2			Experimento 3			Experimento 4		
	pH	CE (mS/cm)	TDS (g/L)									
0	8.80	30.9	19.50	9.22	18.38	11.59	9.65	9.76	6.15	9.70	5.48	3.45
10	11.58	27.8	17.50	11.56	15.09	9.51	11.53	7.59	4.78	11.57	5.32	3.35
20	11.54	27.3	17.22	11.52	14.66	9.24	11.50	7.54	4.75	11.54	5.30	3.34
30	11.52	27.2	17.14	11.47	14.54	9.16	11.47	7.39	4.66	11.53	5.27	3.32
40	11.49	27.1	17.04	11.04	14.50	9.14	11.37	7.27	4.58	11.44	5.12	3.23

Grafico 1. Cambio del pH con el tiempo

Como se puede apreciar en el Grafico 1, el pH aumentó cuando se inició el proceso de adsorción y manteniéndose en valores cercanos a 11 y 11.5. Ésto se debe a que al agregar la sal de yoduro de potasio aumenta la alcalinidad de la solución, la que comienza a disminuir al transcurrir del tiempo, debido a la adsorción llevada a cabo.

Grafico 2. Cambio de la conductividad eléctrica con el tiempo.

La conductividad eléctrica en medio líquido está relacionada con la presencia de sales en solución, lo cual significa que a mayor cantidad de yoduro de potasio, es mayor la conductividad eléctrica, como se puede evidenciar en el Grafico 2, el cual demuestra que a medida que ocurre el proceso de adsorción, la conductividad disminuye consecuentemente debido a que hay menor cantidad de sal en la solución.

Grafico 3. Cambio de los sólidos disueltos con el tiempo

Como se puede observar en el Grafico 3, los sólidos disueltos totales disminuyen con respecto al tiempo, esto evidencia que el sistema de adsorción funciona adecuadamente para remover el yoduro de potasio en solución acuosa.

Considerando los tres gráficos anteriores, se determinó que el tiempo de adsorción es de 15 minutos para que el sistema alcance el equilibrio.



Figura 2. Filtración

Finalmente, para corroborar la cantidad de yodo retenido, se realizó un filtrado de la solución como se aprecia en la Figura 2, empleando papel filtro para retener los sólidos; posteriormente éste es sometido a un secado a 100°C durante 30 minutos, realizado en la mufla, para así remover la humedad y finalmente por gravimetría determinar la masa de yoduro retenida. En la Tabla 3, se aprecian dichos resultados.

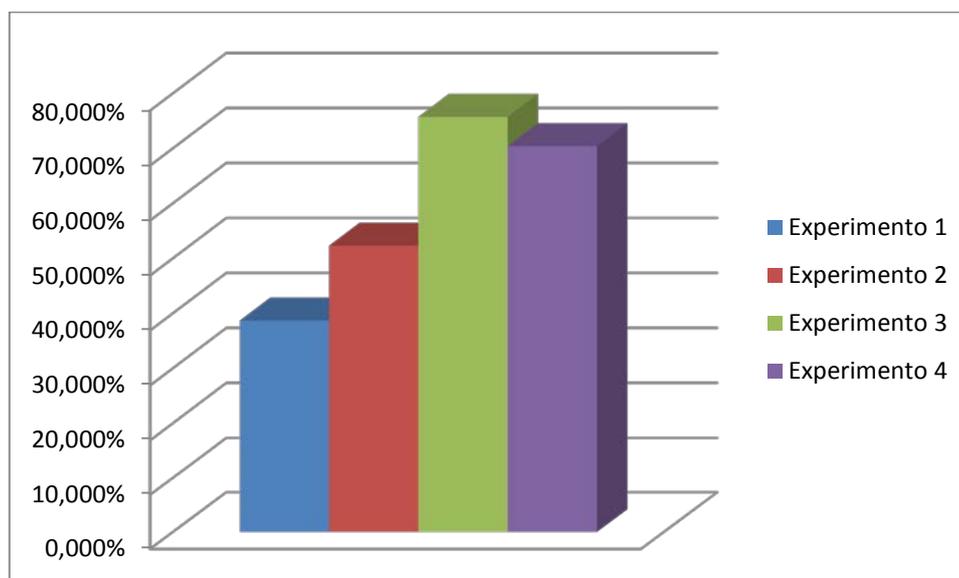
Tabla 3. Datos obtenidos en la prueba de gravimetría.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Masa de yodo (g)	6	3	1,5	1
Masa retenida (g)	2.3204	1.5685	1.1358	0.7039
Retención (%)	38.673%	52.283%	75.720%	70.390%

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 3, en especial el porcentaje de retención, se puede apreciar la tendencia de retención en cada una de las muestras (Grafico 4),

de las cuales se puede concluir que a menor concentración de yoduro se obtiene un mayor porcentaje de retención empleando la misma masa de carbón activado para todas las muestras. Esto es favorable para el caso del ^{131}I ya que, al administrarse en el paciente a tan bajas concentraciones, se puede lograr una mayor retención de dicho componente.

Grafico 4. Porcentaje de retención obtenido por gravimetría.



3.2. Evaporación

La evaporación es un método por el cual se puede separar un sólido de un líquido por medio del suministro de calor hasta evaporar el líquido total o parcialmente [11]. En consideración con el presente trabajo investigativo, se desea remover en su totalidad el líquido y finalmente ser vertido al alcantarillado.

3.2.1. Metodología

Para evaluar el proceso de evaporación se emplearon cuatro experimentos: una disolución de 6 gramos de yoduro de potasio en 200 mL de agua destilada, otra solución de 3 gramos, la tercera de 1.5 gramos y finalmente otra de 1 gramo de yoduro de potasio en 200 mL de agua destilada; dichas soluciones se llevaron a un montaje de calentamiento como se puede apreciar en la Figura 3; posteriormente con un condensador de vidrio para recuperar el vapor de agua y realizar las respectivas mediciones de pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales para evaluar la efectividad del sistema; adicional a ello, se pesó el matraz de evaporación con el yoduro en su interior para saber qué cantidad de masa del mismo retenida en el recipiente.



Figura 3. Montaje de evaporación con condensación.

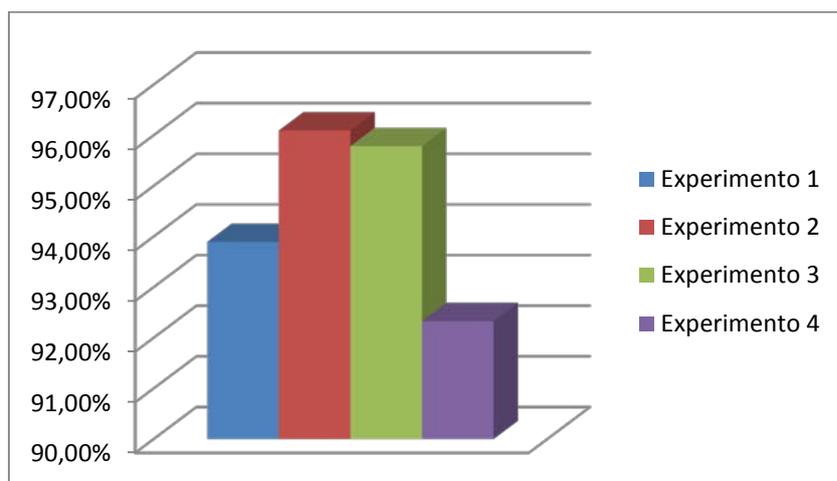
3.2.2. Resultados y análisis

En la Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos en las cuatro medidas que se realizaron.

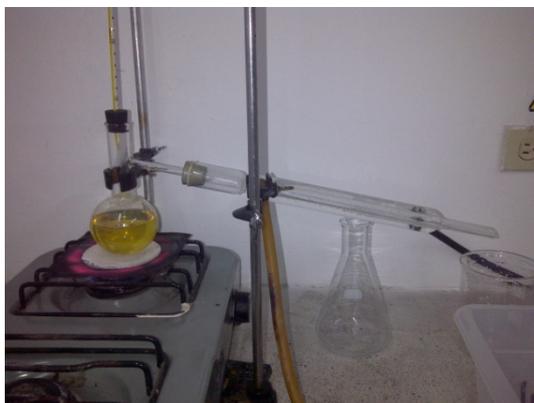
Tabla 4. Resultados obtenidos en la retención de yoduro por evaporación.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Masa de yodo (g)	6	3	1.5	1
Masa retenida (g)	5.6336	2.8828	1.4368	0.9233
Retención (%)	93.89	96.09	95.79	92.33

Después de haber finalizado la evaporación total, se pesó el matraz y se obtuvieron porcentajes de retención superiores al 92%, lo cual significa que el método de remoción por evaporación es muy efectivo. En el Gráfico 5, se puede apreciar los porcentajes retenidos de yodo para cada uno de los 4 experimentos realizados.

Gráfico 5. Porcentajes de retención de yodo por el método de evaporación.

Al tener como soporte esta pre-experimentación, se realiza una experimentación reemplazando el agua destilada por orina, a la cual se adicionaron 6 gramos yoduro de sodio, solución a la que posteriormente se le efectúa una evaporación, como se describió en el anterior procedimiento y cuyo montaje experimental se ve en la Figura 4.

**Figura 4. Montaje evaporación usando orina.**

Los resultados obtenidos y datos importantes se muestran en la Tabla 5 (Características de la muestra de orina empleada), y en la Tabla 6, (Datos tomados en diferentes intervalos de tiempos).

Tabla 5. Características de las muestra de orina empleada.

Muestra de orina	
EC (mS/cm)	12.21
TDS (g/L)	7.69
T (°C)	22.9
pH	6.32

Tabla 6. Datos tomados a diferentes intervalos de tiempos.

Medida	1	2	3	4
Tiempo (min)	0	10	23	32
EC (mS/cm)	25.3	22	15.35	15.43
TDS (g/L)	15.95	13.84	9.67	9.72
T (°C)	22.7	43.5	31.4	29
pH	6.04	5.91	6.17	6.45

Durante la experimentación se observó que la orina sufrió un cambio al suministrarle calor, como se muestra en la Figura 5, debido a que contiene urea, la cual es un compuesto orgánico que sufre una reacción de descomposición térmica a 160 °C.

**Figura 5. Cambio de la orina por suministro de calor.**

Debido a lo expuesto anteriormente, se determina hacer un pre-tratamiento a la orina, el cual consiste en hacer pasar la orina por un sistema de adsorción de carbón activado, el cual tendrá como función retener la mayor cantidad de compuestos de la orina como la urea, el ácido úrico,

los sulfatos, los fosfatos, etc., para así evitar en la evaporación una descomposición térmica de tales compuestos y posibles reacciones no deseadas o ajenas a las estudiadas en este proyecto.

3.3. Precipitación

Este método consiste en hacer una precipitación del ión yoduro usando nitrato de plata, sal muy soluble en agua. Dicho compuesto, disponible como una solución estándar de nitrato de plata, es utilizado para los ensayos analíticos de iones de cloruros, yoduros y bromuros en aguas. Se han realizado montajes en los cuales el precipitado luego se dispone con concreto [12].

En este caso se usa yoduro de sodio (NaI) o yoduro de potasio (KI), para los ensayos experimentales con agua destilada a diferentes concentraciones. Al tener las soluciones preparadas se agrega el nitrato de plata; con el objeto de entender dicho comportamiento, a continuación se presenta la reacción de precipitación (donde X es cualquiera de los halogenuros).



En el caso del los yoduros sería [13]:



En este análisis cuantitativo, el halogenuro se puede identificar por su color, es decir, el yoduro genera un color amarillo. La intensidad del color depende del tamaño de las partículas.

La estimación cuantitativa de iones cloruro, bromuro y yoduro se puede efectuar por gravimetría pesando el halogenuro de plata que se produce, o por titulación, empleando un indicador como cromato de potasio por medio del Método de Mohr.

3.3.1. Descripción teórica de la separación por precipitación.

Para llevar a cabo la precipitación con nitrato de plata, este debe contener dos compuestos primordiales, el agente reductor (Na_2SO_3), el cual como su nombre lo indica se encarga de hacer una reacción de reducción para dejar el yodo listo para reaccionar con el agente de precipitación, en este caso el nitrato de plata ($AgNO_3$).

Este proceso comprende la adición de 0,1 a 3 partes en peso del agente reductor y una cantidad eficaz del nitrato de plata a 100 partes en peso del residuo líquido que contiene los compuestos de yodo radiactivo, manteniendo el desecho líquido a una temperatura que varía de 20 a 80 °C, agitando la mezcla obtenida durante 0.5 a 72 horas para precipitar los compuestos de yodo radiactivo [12].

4. DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL SISTEMA DE REMOCIÓN.

Con base en lo anterior, se propone desarrollar un sistema empleando los métodos de separación descritos en el presente trabajo investigativo, como se esquematiza en un diseño

conceptual preliminar mostrado en la Figura 6, en donde se observan cinco tanques evaporadores embebidos en concreto, usados para evaporar el agua y dejar las sales radiactivas dentro de los tanques hasta su decaimiento; el material de los tanques es tal que la corrosión anual y las presiones en su interior no constituyen riesgo alguno; también se ha considerado la energía por mol necesaria para la disociación de los compuestos de KI o NaI, para que la tasa de energía administrada en los procesos de evaporación no favorezca la volatilidad del yodo y si se presentase disociación, se cuente con unos filtros de carbón activado para su control.

El sistema integrado propuesto para la remoción de ^{131}I en una unidad de medicina nuclear se encuentra confinado en un depósito totalmente blindado con recubrimiento de hormigón. La corriente del vertimiento liquido se hace pasar primero por un sistema de purificación de orina, consistente en una adsorción con carbón activado para remover parte del yodo y compuestos de la orina que sufren descomposición térmica; posterior a este proceso, se procede a realizar el proceso de evaporación, donde los vapores de salida pasan por carbón activado para retener las trazas de ^{131}I , luego estos vapores serán condensados para ser vertidos al alcantarillado. El proceso en general tendrá 5 compartimientos, en el que cada uno tiene un funcionamiento de un mes para que se lleve a cabo el respectivo decaimiento del yodo, el cual se da en un tiempo de 5 meses, cabe resaltar que este macro-proceso depende de la cantidad de pacientes atendidos en la unidad de tratamiento.

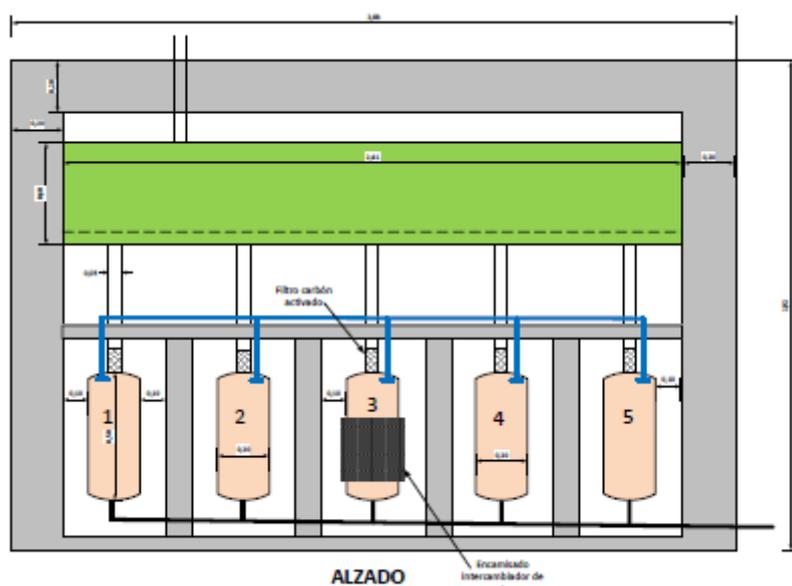


Figura 6. Esquema de Tratamiento de Orinas.

5. CONCLUSIONES

Con las anteriores técnicas de separación evaluadas, se puede obtener un sistema que combine dichos métodos para obtener la mayor separación de I^{131} con la cual se pueda dar estricto cumplimiento a la normativa colombiana.

El sistema de adsorción propuesto logró una separación máxima del 76%, de igual forma se pudo obtener una alta separación con el proceso de evaporación, llegando a un máximo de 96%. Por otra parte, la separación por precipitación se evaluará, ya que es una alternativa que promete ser muy efectiva así como lo fueron la adsorción con carbón activo y la evaporación, y que podría reducir el consumo energético requerido en esta última.

Por estas razones, se ha considerado desarrollar un sistema empleando estos tres métodos de separación descritos en el presente trabajo investigativo, como se propone en un diseño conceptual preliminar mostrado en la figura 6.

REFERENCIAS

1. U. N. R. Commission, "Regulatory Guide 8.39", *Office of Nuclear Regulatory Research*, Us, (1997).
2. República de Colombia, M. d. M. y. Energía, "Resolución 180005", Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, (2010).
3. A. Barreras Caballero, O. Brigido Flores, O. Laserra Sanchez y J. Hernández García, "Retención de los Residuales de I-131 en el Sistema de Tratamiento del Módulo de Medicina Nuclear de Camaguey, Cuba", *Proceedings of the II International Symposium on Nuclear and Related Techniques in Agriculture, Industry and Environment. II Workshop on Nuclear and Related Techniques in Environment.*, La Habana, (1999).
4. IAEA, "IAEA Position Statement on Release of Patients after Radionuclide Therapy", IAEA, Vienna, (2010).
5. Á. García Pérez, "Confinamiento de Desechos Radiactivos de Baja y Media Actividad", México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, (2004).
6. J. M. Arnal, E. Campayo, J. Lora García, M. Sancho Fernandez, I. C. Iborra y I. M. Alcaina, "Dessclassification of Radiactive Waste Solutions of Iodine (^{125}I) from Radioimmune Analysis (RIA) using Membrane Techniques", *Desalination*, vol. 129, pp. 101-105, (2000).
7. J. M. Arnal, M. Sancho, G. Verdú, J. M. Campayo y J. I. Villaescusa, "Treatment of ^{137}Cs Liquid Wastes by Reverse Osmosis", *Desalination*, vol. 154, n° 1, pp. 27-33, (2003).
8. R. Ravichandran, J. P. Binukumar, R. Sreeram y L. S. Arunkumar, «"An Overview of Radioactive Waste Disposal Procedures of a Nuclear Medicine Department",» *Journal of Medical Physics*, vol. 36, n° 2, pp. 95-99, (2011).
9. J. Turner E., *Radiation and Radiation Protection*, Germany: Wiley Verlag GmbH & Co., (2007).
10. "Conductividad Eléctrica", http://ingenieria-reg.unlugar.com/ISFEB_archivos/propelomag.pdf
11. R. Perry H., *Manual de Ingeniero Químico*, de Tomo IV, McGraw-Hill, , pp. Sección 16-17., (1992).
12. K. Ochiai y Y. Fuseya, "Process for the Separation of Radioactive Iodine Compounds by Precipitation"». Tokyo, Japan Patente Internal.: C02F 170; C02F 158. US: 210/719; 210/911; 423/249, (4 Octubre 1994).

13. G. Rayner Canham, *Química Inorgánica Descriptiva*, de *Capítulo 19*, México, Pearson Educación: Prentice Hall, , pp. 496-495, (2000).