

PROPUESTA PARA LA REMOCIÓN DE ^{131}I A NIVEL GENERADORES DEBIDO
A SU CONCENTRACIÓN EN LOS FLUJOS DE LA PTAR DEL SALITRE

EVELIN TATIANA MORA CARRILLO
CARLOS DANIEL TELLO REINO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020

PROPUESTA PARA LA REMOCIÓN DE ^{131}I A NIVEL GENERADORES DEBIDO
A SU CONCENTRACIÓN EN LOS FLUJOS DE LA PTAR DEL SALITRE

EVELIN TATIANA MORA CARRILLO
CARLOS DANIEL TELLO REINO

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director,
FERNANDO MOSOS PATIÑO
Ingeniero Químico

Codirector,
JUAN CAMILO CELY GARZÓN
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020

Nota de Aceptación:

Nubia Liliana Becerra
Jurado 1

Ginna Trujillo
Jurado 2

Bogotá D.C febrero 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados (E)

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo De Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios de ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

*“Oh chispa loca,
vuelve
a tu mortaja,
entiérrate
en tus manos minerales,
vuelve a ser piedra ciega,
desoye a los bandidos,
colabora
tú, con la vida, con la agricultura,
suplanta los motores,
eleva la energía,
fecunda los planetas.
Ya no tienes
secreto,
camina
entre los hombres
sin máscara
terrible,
apresurando el paso
y extendiendo
los pasos de los frutos,
separando
montañas,
enderezando ríos,
fecundando,
átomo,
desbordada
copa
cósmica,
vuelve
a la paz del racimo,
a la velocidad de la alegría,
vuelve al recinto
de la naturaleza,
ponte a nuestro servicio,
y en vez de las cenizas
mortales
de tu máscara,
en vez de los infiernos desatados
de tu cólera,
en vez de la amenaza
de tu terrible claridad, entrérganos
tu sobrecogedora
rebeldía
para los cereales,
tu magnetismo desencadenado
para fundar la paz entre los hombres,
y así no será infierno
tu luz deslumbradora,
sino felicidad,
matutina esperanza,
contribución terrestre.”*

ODA AL ATOMO. PABLO NERUDA

El presente trabajo investigativo lo dedicó principalmente a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados. A mi Abuelita Stella Romero, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mis abuelos, mis padres y demás familiares por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, gracias por estar siempre presentes. A todas las personas que me apoyaron y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

**EVELIN TATIANA MORA
CARRILLO**

Dedico este trabajo a mi madre, Astrid Reino quién sacrificó todo por permitirme llegar hasta aquí, en algún momento fue tan difícil, pero fue ella quien con su ejemplo me enseñó a jamás rendirme, me hizo el hombre que soy, ella es mi heroína y todo se lo debo. A mis hermanos, Arturo y Sebastián, porque ser hermano mayor no es fácil y más cuando se debe ser un modelo a seguir, gracias por ayudarme a ser mejor y por enseñarme a nunca dejar de sonreír. A mi padre porque con su ejemplo me enseñó el hombre que no quiero ser en la vida y también el hombre que quiero ser en la vida. A mis abuelos y mi familia por ser el motor de mis sueños, una fuente inigualable de amor y alegría. A mis maestros porque ellos sembraron en mí la pasión por la ingeniería química. Al baile porque, aunque es un mundo distinto al ingenieril me permitió hoy con trabajo duro culminar el primer paso de mi vida profesional, me enseñó a luchar, pero también me dijo Vive & Goza. A Dios por jamás abandonarme, por bendecirme, por poner el amor y a las personas indicadas en este camino. A Ana María Martínez y su capacidad de crear sonrisas. A mis amigos y amigas.

Los sueños se hacen realidad, hay que vivir para hacer historia.

CARLOS DANIEL TELLO REINO

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios quien nos guió, nos brindó sabiduría y las fuerzas necesarias para culminar esta etapa tan hermosa, este trabajo de grado ha sido una gran bendición en todo sentido y te lo agradecemos padre.

Expresar nuestro agradecimiento al Servicio Geológico Colombiano y a la Planta de Tratamiento de Aguas del Salitre por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado, disponer a nuestro servicio su personal, sus instalaciones y equipos requeridos para el desarrollo de este, apoyarnos con información cuando la requeríamos y por su aporte económico.

Así mismo, agradecemos al Ingeniero Fernando Mosos Patiño quien además de ser un gran director de trabajo de grado tuvo un nexo muy especial con nosotros siendo capaz de transmitirnos su pasión por la ingeniería y la investigación, gracias también por haber confiado en nosotros para la realización de este proyecto y permitirnos participar en cada una de las actividades y así haber adquirido una gran cantidad de conocimientos durante el desarrollo de este.

También agradecemos a Yolima Guzmán Química Industrial, por brindarnos su apoyo incondicional, sus conocimientos, su amistad y sus bromas, todo esto haciendo que el desarrollo de este trabajo fuera entretenido y que culminara de la mejor manera posible.

Al Ingeniero Juan Camilo Cely, codirector del proyecto quien desinteresadamente ofreció su ayuda desde el inicio de este proceso, con sus amplios conocimientos en el tema ambiental y en la simulación de procesos, que nos ayudaron a superar los obstáculos que se fueron presentando en el camino.

Al Ingeniero Químico Leonardo de Jesús Herrera, director del programa de Ingeniería Química en la Universidad de América, por su valioso apoyo en este trabajo y su guía y ejemplo de amor por la ingeniería durante esta etapa.

A la Ingeniera Química Elizabeth Torres, por su orientación y apoyo para lograr excelentes resultados en este proyecto.

A la Ingeniera Química Pilar Zamudio, profesional en la PTAR del SALITRE.

Adicionalmente agradecemos a nuestras familias, quienes desde el primer día de estudio nos brindaron la fuerza y apoyo necesario, para crecer como personas, ser los mejores profesionales y que con su apoyo incondicional nos ayudaron, para culminar con satisfacción este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	27
OBJETIVOS	29
1. MARCO TEÓRICO	30
1.1 YODO	30
1.1.1 Abundancia en la naturaleza.	32
1.1.2 Yodo en el ser humano.	32
1.1.3 Isótopos asociados al yodo.	33
1.2 RADIACIÓN	34
1.2.1 Tipos de radiación.	34
1.2.1.1 Radiación alfa.	35
1.2.1.2 Radiación beta.	35
1.2.1.3 Radiación gamma.	35
1.2.2 Radioisótopo.	36
1.2.3 Aplicación Médica de la Radiación.	37
1.2.4 Otras aplicaciones.	37
1.3 RADIOISÓTOPO ^{131}I	38
1.3.1 Obtención del ^{131}I .	38
1.3.2 Vida media.	39
1.3.3 Desintegración radiactiva del yodo.	40
1.3.4 Usos.	42
1.4 RADIACIÓN EN EL HUMANO POR ^{131}I	42
1.4.1 Irradiación Externa.	44
1.4.2 Contaminación Radiactiva.	45
1.4.3 Exposición.	45
1.5 RADIO DE INCIDENCIA DEL YODO ^{131}I	45
1.5.1 Radio-farmacias.	45
1.5.2 Instalaciones de Medicina Nuclear.	46
1.5.3 ^{131}I en cuerpos de agua.	48
1.6 EQUIPOS	48
1.6.1 Espectrómetro de radiación gamma y de alta resolución con detector de germanio hiper puro HPGe	48
1.6.1.1 Canberra.	48
1.6.1.2 ORTEC LRA01.	48
1.7 NORMAS PARA MANEJO Y DISPOSICIÓN	49
1.7.1 Política para la Gestión de Desechos Radioactivos en Colombia	49
1.7.2 Resolución 41178 de 2016.	49
1.8 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DEL SALITRE	49

1.8.1	Ubicación de la PTAR del Salitre.	49
1.8.2	Río Bogotá.	50
1.8.3	Función.	51
1.8.4	Proceso.	51
1.8.5	Ampliación.	56
2.	COMPORTAMIENTO DEL ¹³¹ I EN LA PTAR DEL SALITRE	57
2.1	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS	57
2.1.1	Espectrómetro de radiación gamma y de alta resolución con detector de germanio híper puro HPGe	58
2.1.1.1	Canberra DET01.	58
2.1.1.2	Canberra GL0515.	60
2.1.1.3	ORTEC LRA01.	61
2.1.2	Espectrómetro CANBERRA con detector de yoduro de sodio.	64
2.2	PLAN DE MUESTREO	64
2.2.1	Fase 1. Evolución en la semana.	65
2.2.2	Fase 2. Evolución en el día.	66
2.2.3	Fase 3. Balance de Masa.	66
2.3	PROTOCOLOS	67
2.3.1	Protocolo de Muestreo para Evolución en Semana y Evolución en Día.	67
2.3.1.1	Identificación del sitio de toma de la muestra.	68
2.3.1.2	Procedimiento:	69
2.3.2	Protocolo de Muestreo del balance de masa.	73
2.3.3	Protocolo para identificación de muestra.	74
2.4	CALIBRACIÓN DE EQUIPOS ESPECTROMETRIA PARA ¹³¹ I.	77
2.4.1	Estabilidad.	78
2.4.2	Calibración de la cápsula de yodo (1MBq).	81
2.4.3	Obtención de solución de referencia para Geometría Tres.	84
2.4.3.1	Desarrollo de la técnica gravimétrica.	85
2.4.4	Calibración para Geometría filtro.	87
2.5	RESULTADOS Y ANALISIS	87
2.5.1	Resultados de material de referencia G3 y calibración de equipos.	87
2.5.2	Resultados de material de referencia geometría filtro y calibración de equipo.	90
2.5.3	Evolución en el día del ¹³¹ I.	91
2.5.4	Evolución en el día del ¹³¹ I.	92
2.6	BALANCE DE MASA DE ¹³¹ I	97
2.6.1	Parámetros principales de operación.	99
2.6.2	Desarrollo del balance.	101
2.6.2.1	Balance.	103
2.6.3	Biosólidos.	108
2.6.4	Arenas y Grasas.	110
2.6.5	Agua tratada.	111

3.	PROPUESTA DE REMOCIÓN	113
3.1	GESTIÓN DE DESECHOS	113
3.1.1	Estrategia de Remoción.	114
3.1.2	Evaporación.	115
3.1.3	Adsorción.	117
3.1.4	Selección del Método de Remoción.	120
3.2	DECAÍMIENTO	123
3.3	ADSORCIÓN	123
3.3.1	Selección del Material Adsorbente.	125
3.3.1.1	Zeolitas.	126
3.3.1.2	Carbón Activado.	126
3.3.2	Selección.	127
3.3.3	Carbón Activado para la adsorción de Radioisótopos del Yodo.	128
3.3.4	Impregnación de Carbón Activado.	129
3.3.5	Cálculo de la actividad específica y de concentración a tratar.	130
3.4	Determinación del tiempo de estabilización y agitación	132
3.4.1	Impregnación de Carbón activado con NaOH.	132
3.4.2	Metodología.	134
3.4.3	Resultados y Análisis	135
3.4.3.1	Carbón Activado Hydrffin 40 N.	135
3.4.3.2	Carbón Activado impregnado con NaOH.	137
3.5	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN. PRUEBAS DE GRAVIMETRÍA	139
3.5.1	Metodología.	140
3.5.2	Resultados y Análisis.	143
3.5.2.1	Remoción del Carbón Activado Hydrffin 40 N.	143
3.5.2.2	Remoción del Carbón Activado impregnado con NaOH.	144
3.6	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	146
3.6.1	Isoterma de Langmuir.	146
3.6.2	Isoterma de Freundlich.	147
3.6.3	Resultados y análisis.	148
3.6.3.1	Isotermas para el carbón activado hydrffin 40N	148
3.6.3.2	Isotermas para el carbón activado impregnado con NaOH.	153
3.7	PRUEBA DE ADSORCIÓN CON ¹³¹ I	156
3.7.1	Porcentaje de adsorción.	160
4.	PARAMETROS TÉCNICOS DEL MÉTODO DE REMOCIÓN	165
4.1	COMPOSICIÓN DE ORINA	165
4.2	NORMAS GUIA PARA EL TRAMIENTO DE ¹³¹ I	166
4.3	REALIDAD DEL TRATAMIENTO CON ¹³¹ I EN COLOMBIA	168
4.4	DISEÑO Y ASPECTOS LOCATIVOS EN GESTIÓN DEL DESECHO RADIATIVO ¹³¹ I	170
4.5	DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE REMOCIÓN	174
4.5.1	Parámetros del Sistema de Tanques.	175

4.5.2	Desarrollo del método de cálculo.	176
5.	EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO	180
5.1	COSTOS DEL SISTEMA DE TANQUES DE RETENCIÓN.	180
5.1.1	Costos preliminares de obra.	180
5.1.2	Costos de Tanque de Retención.	181
5.1.3	Costos de Silos de recubrimiento y seguridad.	182
5.1.4	Costos totales de obra civil.	183
5.1.5	Costos totales del proyecto.	184
6.	CONCLUSIONES	185
7.	RECOMENDACIONES	187
	BIBLIOGRAFIA	189
	ANEXOS	193

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades físicas del yodo estable	31
Tabla 2. Isótopos del Yodo	33
Tabla 3. Dosis de ^{131}I administrada a pacientes	42
Tabla 4. Descargas de Instalaciones de medicina nuclear.	46
Tabla 5. Fotones gamma característicos del ^{131}I	58
Tabla 6. Especificaciones del equipo de espectrometría DET01.	59
Tabla 7. Especificaciones del sistema de espectrometría portátil GL0515.	60
Tabla 8. Especificaciones del espectrómetro LRA01	63
Tabla 9. Plan de muestreo semana	65
Tabla 10. Plan de muestreo día	66
Tabla 11. Plan de muestreo para balance.	67
Tabla 12. Resultados de actividad de cápsula de ^{131}I	84
Tabla 13. Datos de calibración ^{131}I	87
Tabla 14. Resultados de equipos calibrados para G3	90
Tabla 15. Masas para geometría 4	91
Tabla 16. Resultados de equipo calibrado para geometría filtro	91
Tabla 17. Niveles de orientación de la OMS para radionúclidos en agua potable	94
Tabla 18. Niveles de dispensa en forma líquida a vertederos y alcantarillas.	97
Tabla 19. Caudales	100
Tabla 20. Resultados en concentración de actividad en las diferentes corrientes.	101
Tabla 21. Resultados de concentración de actividad para el balance de masa 1	102
Tabla 22. Resultados de concentración de actividad para el balance de masa 2	102
Tabla 23. Resultados balance de masa 2	104
Tabla 24. Resultados balance de masa 3	105
Tabla 25. Factores que afectan el proceso de evaporación.	115
Tabla 26. Factores que afectan el proceso de evaporación (continuación).	116
Tabla 27. Propiedades del adsorbente	118
Tabla 28. Naturaleza del adsorbato	118
Tabla 29. Características de la fase líquida	119
Tabla 30. Justificación de los parámetros de la evaporación	120
Tabla 31. Justificación de los parámetros de la adsorción con carbón activado	121
Tabla 32. Matriz de selección del sistema de remoción	122
Tabla 33. Adsorbentes sólidos usados en la industria para la captura de ^{131}I en fuente líquidas y gaseosas	125
Tabla 34. Comparación entre el Carbón Activado y la Zeolita.	127
Tabla 35. Especificaciones Técnicas de los Carbones Activados.	129

Tabla 36. Especificación de las soluciones para adsorción de ¹²⁷ I	134
Tabla 37. Resultados de medición para el Carbón Activado hydraffin 40 N	135
Tabla 38. Resultados obtenidos en los 3 experimentos de estabilización y tiempo de agitación para el CA impregnado en NaOH	138
Tabla 39. Especificación de las soluciones preparadas por experimento para la adsorción	141
Tabla 40. Resultados de retención prueba de gravimetría para el C.A. Hydraffin 40N	143
Tabla 41. Resultados de retención prueba de gravimetría para el C.A. impregnado con NaOH	144
Tabla 42. Comparativa de los porcentajes de adsorción por tipo de carbón activado	145
Tabla 43. Datos obtenidos por análisis de espectrometría gamma para la prueba de adsorción de ¹³¹ I	160
Tabla 44. Consolidado de resultados porcentaje de adsorción de forma experimental.	163
Tabla 45. Clasificación del yodo 131 según la Política de Gestión de los desechos radioactivos en Colombia.	167
Tabla 46. Configuración de las válvulas del sistema	173
Tabla 47. Datos de entrada del método	175
Tabla 48. Datos de entrada del método. (continuación)	176
Tabla 49. Costos previos de obra	181
Tabla 50. Costos de Tanques de retención	182
Tabla 51. Costo de construcción del silo de 30 m ³ dispuestos para los 3 tanques de retención	183
Tabla 52. Costo total de la obra civil para un volumen de 30 m ³	183
Tabla 53. Costo total del proyecto	184

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Desintegración del ^{131}I	41
Ecuación 2. Masa neta de pérdidas	88
Ecuación 3. Fracción de pérdidas	88
Ecuación 4. Actividad de geometría tres	89
Ecuación 5. Eficiencia	89
Ecuación 6. Masa neta de perdidas	90
Ecuación 7. Actividad geometría filtro.	90
Ecuación 8. Postulado de la ley del decaimiento universal	103
Ecuación 9. Balance de las corrientes de agua	103
Ecuación 10. Reacción de adsorción de Yodo	130
Ecuación 11. Actividad Específica.	131
Ecuación 12. Equivalente en masa	131
Ecuación 13. Cálculo de la masa neta de la alícuota.	160
Ecuación 14. Actividad de la alícuota en el tiempo cero	161
Ecuación 15. Actividad de la alícuota al momento de la preparación	161
Ecuación 16. Concentración de actividad de alícuota en momento de preparación	162
Ecuación 17. Concentración de actividad de alícuota del proceso de adsorción en el momento de preparación.	162
Ecuación 18. Porcentaje de adsorción	163
Ecuación 19. Volumen de los tanques de almacenamiento A1 y A2	171
Ecuación 20. Volumen de los tanques de adsorción y sedimentación	172
Ecuación 21. Actividad que entra al sistema de retención y decaimiento.	172
Ecuación 22. Tasa de ingreso de núcleos radiactivos	176
Ecuación 23. Caudal promedio	177
Ecuación 24. Actividad en el tanque como función del tiempo	177
Ecuación 25. Actividad de Descarga	178
Ecuación 26. Actividad de descarga al año	178
Ecuación 27. Tasa de emisión en concentración de actividad del sistema	179

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Molécula de yodo	31
Imagen 2. Símbolo de la radiación	34
Imagen 3. Penetración de los Tipos de radiaciones	36
Imagen 4. Esquema de desintegración del ^{131}I (simplificado)	41
Imagen 5. Impacto de las radiaciones en la salud	43
Imagen 6. Localización de Instalaciones de Medicina Nuclear en Bogotá	47
Imagen 7. Ubicación espacial de la PTAR del salitre.	50
Imagen 8. Zona de Bogotá que trata la PTAR del salite (fondo amarillo)	51
Imagen 9. Proceso actual de la PTAR del salitre.	52
Imagen 10. Formación de lodos por sedimentación	53
Imagen 11. Proceso de digestión de lodos	54
Imagen 12. Disposición final de biosólidos	55
Imagen 13. Ampliación de la PTAR del salitre.	56
Imagen 14. Detector HPGE CANBERRA INDUSTRIES	59
Imagen 15. Espectrómetro portátil GL0515	61
Imagen 16. Blindaje de plomo (Dewars y criostatos)	62
Imagen 17. Enfriador criogénico (Dewars y criostatos)	63
Imagen 18. Espectro con detector de yoduro de sodio.	64
Imagen 19. Curso de muestreo desarrollado por la Policía Nacional de Colombia.	68
Imagen 20. Ubicación de toma de muestra de agua cruda dentro de la PTAR del Salitre.	68
Imagen 21. Punto de muestreo de agua cruda.	69
Imagen 22. Muestra compuesta de agua cruda	69
Imagen 23. Montaje de la filtración al vacío.	70
Imagen 24. Filtro de micro fibra de vidrio.	70
Imagen 25. Beacker con muestra compuesta de agua cruda filtrada.	71
Imagen 26. Montaje para realizar la acidificación.	72
Imagen 27. Muestra compuesta de agua cruda acidificada.	72
Imagen 28. Montaje para transporte de muestra.	73
Imagen 29. Muestras recolectadas para el balance de masa.	73
Imagen 30. Muestras puntuales listas para traslado al SGC para su lectura y/o procedimiento a realizar.	74
Imagen 31. Muestras del balance de masa en nevera para transporte.	74
Imagen 32. Kit de calibración de pesa.	75
Imagen 33. Muestra lista para pesado.	76
Imagen 34. Muestra lista para análisis sobre el detector.	76
Imagen 35. Almacenaje de fuentes de referencia.	79
Imagen 36. Esquema para estabilidad de espectrómetro GL0515.	79
Imagen 37. Esquema para lectura de fuente incógnita puntual	82
Imagen 38. Dosis de ^{131}I	82

Imagen 39. Espectrómetro portátil detectando ^{131}I .	83
Imagen 40. Esquema de trazabilidad para componer geometría tres.	85
Imagen 41. Pesado de balones aforados.	85
Imagen 42. Cápsula de ^{131}I en ácido clorhídrico	86
Imagen 43. Pesado de solución de ^{131}I en ácido clorhídrico	86
Imagen 44. Geometría tres	88
Imagen 45. Usos del agua del río Bogotá.	95
Imagen 46. Revitalización y restauración de suelos con biosólidos década de los 90.	109
Imagen 47. Revitalización y restauración de suelos con biosólidos en la actualidad	109
Imagen 48. Salida de arenas.	110
Imagen 49. Salida de grasas	110
Imagen 50. Riego de hortalizas con aguas provenientes del río Bogotá.	111
Imagen 51. Imágenes tomadas por una cámara especial de Medicina Nuclear que muestra las áreas oscuras donde el ^{131}I es absorbido por el cuerpo.	112
Imagen 52. Retención de ^{131}I en Carbón activado usando Microscopía electrónica de barrido antes (A) y después de un proceso de impregnación (B).	129
Imagen 53. Horno para la reactivación del carbón impregnado usado a 60°C	133
Imagen 54.. Esquema de preparación de muestras.	134
Imagen 55. Soluciones a distintas concentraciones de sal de yoduro de potasio con Carbón activado como adsorbente.	140
Imagen 56. Balón aforado con solución de 100ml de ^{131}I	159
Imagen 57. Etapa de agitación de la solución con carbón activado impregnado con NaOH como adsorbente	159
Imagen 58. Ilustración conceptual del sistema de clasificación de desechos	166
Imagen 59. Flujo de proceso de gestión de desechos para ^{131}I .	168
Imagen 60. Sistema de remoción con adsorción, retención y decaimiento.	171
Imagen 61. Sistema de remoción con retención y decaimiento.	173

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Reducción de la radiactividad y vida media de ^{131}I .	40
Diagrama 2. Esquema general de tratamientos de aguas residuales de la PTAR del salitre.	55
Diagrama 3. Flujograma del proceso de aseguramiento metrológico	78
Diagrama 4. Reportes de estabilidad del espectrómetro portátil	80
Diagrama 5. Curva de eficiencia y energía	81
Diagrama 6. Espectro gamma del ^{131}I	83
Diagrama 7. Esquema para balance de masa con todas las corrientes en la PTAR del salitre.	98
Diagrama 8. Esquema para balance de masa con las corrientes de agua	99
Diagrama 9. Diagrama de Flujo para el experimento de adsorción de ^{127}I por lotes	142
Diagrama 10. Diagrama de flujo de prueba adsorción del ^{131}I en carbón activado en 2 etapas	158

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Resultados evolución del 131I en semana	92
Gráfica 2. Resultados evolución de 131I en el día	93
Gráfica 3. Caudales de agua cruda durante el día.	100
Gráfica 4. Caudales de agua tratada durante el día.	101
Gráfica 5. Resultados balances de masa.	106
Gráfica 6. Distribución del 131I	107
Gráfica 7. Variación de la conductividad eléctrica respecto al tiempo	136
Gráfica 8. Variación del pH respecto al tiempo	137
Gráfica 9. Variación de la conductividad eléctrica respecto al tiempo para el carbón activado impregnado en NaOH	138
Gráfica 10. Variación del pH respecto al tiempo para la adsorción por medio de carbón activado impregnado con NaOH	139
Gráfica 11. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 1.	149
Gráfica 12. Isoterma de Freundlich linealizada para el carbon Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 1.	149
Gráfica 13. Isoterma de Langmuir linealizada para el carbón Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 2.	150
Gráfica 14. Isoterma de Freundlich linealizada para el carbon Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 2.	150
Gráfica 15. Isoterma de Langmuir linealizada para el carbón Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 3.	151
Gráfica 16. Isoterma de Freundlich linealizada para el carbon Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 3.	151
Gráfica 17. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado impregnado con NaOH a 18°C del experimento 1.	153
Gráfica 18. Isoterma de Freundlich para la adsorción de 127I en carbón activado impregnado por NaOH del experimento 1.	153
Gráfica 19. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado impregnado con NaOH a 18°C del experimento 2	154
Gráfica 20. Isoterma de Freundlich para la adsorción de 127I en carbón activado impregnado por NaOH para el experimento 2.	154
Gráfica 21. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado impregnado con NaOH a 18°C del experimento 3	155
Gráfica 22. Isoterma de Freundlich para la adsorción de 127I en carbón activado impregnado por NaOH para el experimento 3	155

GLOSARIO

ACTIVIDAD: magnitud física que mide el número de transformaciones espontáneas (ver radiactividad) ocurridas en una sustancia por unidad de tiempo. La unidad es el becquerel (Bq). (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹

BECQUEREL: unidad de medida de la radiactividad, corresponde a una desintegración radiactiva por segundo. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)²

CURIO: antigua unidad de actividad, no perteneciente al Sistema Internacional de Unidades, que ha sido sustituida por el becquerel (Bq) y cuya equivalencia es: 1 Ci = 3,7 E+10 Bq. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)³

DESINTEGRACIÓN: fenómeno nuclear en el que un átomo radiactivo disminuye su masa y/o su nivel de energía de forma espontánea, lo que se manifiesta en la emisión de radiaciones ionizantes. Las formas más frecuentes de desintegración son la emisión de partículas alfa, partículas beta, captura electrónica y fisión espontánea. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)⁴

DOSIS: cuando no se diga lo contrario, el término dosis se usa para expresar más simplemente el término dosis efectiva (antes dosis equivalente efectiva). Poco correctamente, en la práctica de la medicina nuclear, y por analogía con la terminología de uso corriente, se habla de dosis para expresar: - La cantidad de sustancia emisora (expresada en peso o en actividad) si se trata de una fuente no encapsulada administrada a un paciente (en forma comparable a la de dosis de un fármaco). - La energía radiada por una fuente o transportada por un haz; si se trata de la energía individual de los fotones o partículas se expresa en MeV. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)⁵

DOSIS EFECTIVA: es una medida de la energía depositada en un tejido u órgano y, por lo tanto, es una medida del daño biológico que puede causar. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)⁶

¹ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

² Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

³ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

⁴ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

⁵ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

⁶ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

EFLUENTE RADIOACTIVO: fluido (líquido o gaseoso) radiactivo procedente de una instalación nuclear o radiactiva que se somete a control, y, cuando es necesario a tratamiento, antes de su descarga al medio ambiente. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)⁷

FACTOR DE ACUMULACIÓN: factor que tiene en cuenta el reforzamiento del flujo teórico del haz directo de radiación cuando atraviesa un material de blindaje, su origen es la dispersión del haz causada por las múltiples colisiones sufridas que se originan por el propio espesor del material considerado. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)

FISIÓN NUCLEAR: reacción nuclear en la que tiene lugar la ruptura de un núcleo pesado, generalmente en dos fragmentos cuyo tamaño son del mismo orden de magnitud, y en la cual se emiten neutrones y se libera gran cantidad de energía. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)

FUENTE (DE RADIACIÓN): aparato o sustancia capaz de emitir radiaciones ionizantes. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)

LÍMITE INFERIOR DE ACTIVIDAD DETECTABLE (LID): cantidad mínima de actividad que es posible medir con el método analítico empleado. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)⁸

LÍMITES ANUALES DE DOSIS: valores máximos, referidos siempre a los 12 últimos meses, de las dosis que pueden ser recibidas por los trabajadores profesionalmente expuestos y los miembros del público. Estos valores están fijados legalmente y en ellos no se tiene en cuenta las dosis resultantes del fondo radiactivo natural ni de las exposiciones sufridas como consecuencia de exámenes o tratamientos médicos. Los límites de dosis se aplican a la suma de las dosis recibidas por exposición externa, durante el periodo considerado, y de la dosis interna integrada resultante de la incorporación de radionucleidos que haya podido tener lugar durante ese mismo periodo. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)⁹

⁷ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

⁸ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2019]

⁹ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

LUMINISCENCIA: capacidad de un cuerpo de absorber radiación y reflejarla o emitir como luz.¹⁰

MEDICINA NUCLEAR: utilización de los radioisótopos, como fuentes encapsuladas y no encapsuladas, con fines médicos de diagnóstico o terapia. Se usan "in vivo" (servicios de medicina nuclear) o "in vitro" (laboratorios de radioinmunoanálisis). (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹¹

NIVEL DE REFERENCIA: valor, inferior al límite de vertido, que se toma como base para determinar si es adecuado el funcionamiento de los correspondientes sistemas. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹²

RADIOACTIVIDAD: es el proceso por el cual los átomos sufren una desintegración espontánea al azar, generalmente acompañada por la emisión de radiación. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹³

RADIACIÓN: emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)

RADIOTOXICIDAD: toxicidad debida a las radiaciones ionizantes emitidas por un radionucleido incorporado al organismo y por sus productos resultantes. La radiotoxicidad no sólo depende de las características radiactivas del radionucleido, sino también de su estado físico y químico, así como del metabolismo de ese elemento en el organismo. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹⁴

RESIDUO RADIOACTIVO: es residuo radiactivo todo material o producto de desecho que presenta trazas de radiactividad y para el cual no está previsto ningún uso. Se incluyen los líquidos y gases residuales contaminados. - Residuos de alta actividad: 1. Los líquidos altamente radiactivos, conteniendo la mayor parte de los productos de fisión y algunos actínidos, que se separan en el primer ciclo de extracción con disolventes durante la reelaboración química del combustible irradiado, así como los efluentes relacionados con dicho proceso. 2. El combustible nuclear irradiado, si ha sido declarado residuo. 3. Cualquier otro residuo de actividad comparable a uno

¹⁰ BOZOGLIAN, Fernando. Institut Català d'Investigació Química. Unitat d'Espectroscopia i cinètiques. Luminiscencia. [En línea] < <http://labvirtual.iciq.es/wp-content/uploads/2017/09/Charla-Divulgacion-Festa-de-la-Ciencia-de-Barcelona-28-mayo-2017.pdf> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹¹ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹² Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹³ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹⁴ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

de los dos anteriores. - Residuos radiactivos de media actividad: Son los de menor nivel de actividad y de generación de calor que los de alta actividad pero que todavía requieren blindaje durante su transporte y manipulación. El término se usa, en forma general, para referirse a todos los residuos no definidos como de alto o de bajo nivel. - Residuos radiactivos de baja actividad: Son aquéllos que, por su bajo contenido radiactivo, no requieren blindaje durante su manipulación y transporte. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹⁵

SIEVERT (SV): unidad de la dosis equivalente y de la dosis efectiva en el Sistema Internacional de Unidades: 1 Sv = 1 J/kg. La unidad antigua es el REM. 1Sv = 100 REM. (Consejo de seguridad nuclear, s.f.)¹⁶

TRABAJADOR PROFESIONALMENTE EXPUESTO: persona que trabaja en presencia de las radiaciones ionizantes, de forma que puede recibir más de un décimo de los límites de dosis fijados para los trabajadores. Si es posible que pueda recibir más de 1/10 pero es muy improbable que pueda recibir más de 3/10 de los límites de dosis (más de 5 y menos de 15 mSv) se le clasifica como categoría B. Si es posible que pueda recibir más de 3/10 de los límites fijados (15 mSv) se la clasifica como de categoría A y para él es obligado el uso de un sistema de dosimetría individual.¹⁷

TIROIDES: glándula localizada debajo de la laringe que produce la hormona tiroidea y calcitonina. a. (Instituto nacional del cáncer, s.f.)¹⁸

¹⁵ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹⁶ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹⁷ Central Nuclear de Cofrentes. Glosario [En línea]. < <http://www.cncofrentes.es/glosario/t> > [citado el 10 de febrero de 2020]

¹⁸ Consejo de Seguridad Nuclear. España. Glosario. [en línea]. < <https://www.csn.es/glosario> > [citado el 10 de febrero de 2020]

RESUMEN

El ^{131}I es usado en la medicina nuclear para el tratamiento de afectaciones de glándula tiroides, principalmente el hipertiroidismo y el cáncer de tiroides. Aproximadamente el 80% de la dosis total suministrada a los pacientes es eliminada del cuerpo por medio de la orina, en un periodo de tiempo desde las 24 hasta las 72 horas siguientes al tratamiento. Los desechos generados por el tratamiento se caracterizan por una actividad de ^{131}I significativa y deben ser controlados. La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) determina este tipo de desechos como desechos que se deben tratar antes de ser vertidos y por ende cada país determina en su regulación nacional los límites de vertimiento.

Para el caso de Colombia es la resolución 41178 del 2 de diciembre de 2016 que establece la tasa de emisión mensual en concentración de actividad de 19 Bq/L y el límite de emisión anual de 1000000 Bq/año (0.27027 mCi/año), lo que hace necesaria la implementación de métodos para tratar los desechos generados principalmente en Colombia por los pacientes tratados con ^{131}I para luego ser vertidos a los alcantarillados.

En una investigación realizada por la ingeniera Liseth Ospina y dirigida por el Servicio Geológico Colombiano se encontraron niveles de actividad titulada Propuesta para la determinación del radio de incidencia del ^{131}I a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá, se encontraron niveles de actividad de hasta 16 Bq/L, es decir muy cerca de la norma que establece 19 Bq/L en el punto de vertimiento (generadores), este punto específico se tomó en la salida de descargas de agua tratada de la Planta de Aguas Residuales de Bogotá (PTAR del Salitre) sobre el río Bogotá, la cual trata.¹⁹

La presente investigación brinda un acercamiento al comportamiento del ^{131}I en la PTAR del salitre, mediante una serie de muestreos en las entradas y salidas de la PTAR, todo esto con el fin de estudiar las fuentes de contaminación radiactiva y de monitorear este radioisótopo durante su tiempo de descomposición y los procesos y operaciones unitarias a los que se encuentra sujeto, con el propósito de permitir generar procesos de control y separación de contaminantes radiactivos. Es de vital importancia entender el comportamiento ya que se conoce que el agua del cauce medio del río Bogotá es usada para riegos y alimentación de animales que posteriormente serán consumidos por los seres humanos, convirtiéndose en un potencial de riesgo radiológico que eventualmente podría afectar la incidencia de cáncer.

¹⁹ OSPINA PERDIGÓN, Liseth Andrea. Propuesta para la determinación del radio de incidencia del ^{131}I a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá. Tesis de grado Ingeniero Químico. Bogotá. Fundación Universidad de América. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Química. 2018

Esencialmente este estudio ofrece una propuesta para la remoción y gestión del ^{131}I a nivel de generadores que está basada en el diagnóstico de la actividad del ^{131}I en la PTAR del Salitre, mediante el estudio de la capacidad de un adsorbente el cual se le modificó su área superficial para que tuviera mayor afinidad con el radionúclido de investigación (^{131}I) en primer lugar, se evaluó el tiempo de agitación más acorde en la adsorción para posteriormente determinar por medio de diferentes soluciones de concentración de KI la adsorción de ^{127}I estable, la cual obtuvo resultados favorables a concentraciones altas. Al repetir la prueba usando ^{131}I con una actividad alta considerable y libre de control, los resultados del proceso de adsorción no fueron satisfactorios permitiendo demostrar que la concentración en masa baja no favorece la adsorción llevada a cabo.

Posteriormente se planteó un diseño de tanques de decaimiento sin adsorción, decisión tomada en base a los resultados de la experimentación, con especificaciones técnicas capaces de cumplir la normatividad de vertimiento en Colombia y por último se calculó el costo total de una construcción para el sistema de tanques de decaimiento propuesto.

Palabras clave: ^{131}I , radiactividad, adsorción, desechos radiactivos, PTAR, decaimiento, gestión de desechos.

INTRODUCCIÓN

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.²⁰

El Yodo radiactivo o ^{131}I , conocido comúnmente como radio yodo, es un radioisótopo usado para el tratamiento de enfermedades relacionadas a la glándula tiroides, especialmente cáncer e hipertiroidismo, debido a la capacidad de asociación de éste isótopo con la tiroides permite la destrucción de tejidos malignos y control del cáncer, así mismo se integra de forma selectiva al metabolismo y emite señales que son percibidas por gammagrafía usadas para determinar el comportamiento glandular, delimitar la morfología y la localización de los tejidos que lo captan.²¹

Actualmente en Bogotá se realizan tratamientos médicos usando el ^{131}I , siendo en total 28 los hospitales que cuentan con autorización para manejo de material radiactivo en medicina nuclear.²² El suministro del ^{131}I a los pacientes se da por vía oral o intravenosa, y el periodo de tratamiento o incidencia de este isótopo sobre el cuerpo es de 28 días aproximadamente, durante este tiempo el ^{131}I es expulsado del cuerpo por medio de la orina, las heces y el sudor. Los desechos deben ser sometidos a aislamiento y tratamiento antes de ser vertidos a las redes de drenaje con el fin de evitar la contaminación de seres vivos, fuentes de agua y el entorno. Estos hospitales deben asegurar el cumplimiento en la regulación del uso de material radiactivo y el correcto manejo de los desechos. De la misma manera es posible que los pacientes tratados de forma ambulatoria sean una fuente de contaminación radiactiva.²³

Actualmente, uno de los debates más significativos en el campo de las prácticas radiactivas es la cantidad de desechos radiactivos que se producen, su impacto y su control. A raíz de una investigación realizada por la Ingeniera Química Liseth Daniela Ospina y apoyada por el Servicio Geológico Colombiano en la cual se encontraron concentraciones de actividad de ^{131}I sobre los niveles de orientación y

²⁰ William Manrique1, Elsa Rodríguez1, Diana Cabañas2, Yajaira Basulto2. Cuantificación de yodo-131 en descargas de aguas residuales de laboratorios de medicina nuclear en Mérida, Yucatán, México, [en línea]< <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750926001.pdf>>

²¹ GONZÁLEZ RIVERO, Levi; TURCIOS TRISTÁ, Silvia Elena and VELASCO MIRABAL, Milagros. Aplicaciones clínicas del radioyodo 131 (I131) en las enfermedades del tiroides. Editorial Ciencias Médicas, 2012. 256-263

²² OSPINA PERDIGÓN, Liseth Andrea. Propuesta para la determinación del radio de incidencia del 131i a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá. Tesis de grado Ingeniero Químico. Bogotá. Fundación Universidad de América. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Química. 2018

²³ PAILLAHUEQUE, Gabriela. EFECTOS SECUNDARIOS A CORTO Y MEDIANO PLAZO DEL TRATAMIENTO CON 131I EN PACIENTES CON CÁNCER DIFERENCIADO DE TIROIDES. Tesis de grado. Hospital Clínico de la Universidad de Chile. Servicio de Medicina Nuclear, Departamento de Medicina. Universidad de Chile. Santiago.

además algo muy particular con las concentraciones de este radioisótopo a la salida de la PTAR del Salitre, donde las concentraciones de actividad de ^{131}I fueron más bajas río arriba y más altas río abajo luego de las descargas de la PTAR del salitre, además que estas concentraciones de actividad que se encontraron están cerca de los niveles de referencia siendo uno de los niveles más relevantes el de 16,8 Bq/L²⁴ encontrado a la salida de las descargas de la PTAR, ya que los niveles de referencia para las aguas residuales están en 19Bq/L en los puntos punto de descarga, surge la necesidad de desarrollar un método de remoción de este radioisótopo a nivel generadores que es la forma más adecuada y óptima para poder controlarlo.

No hay duda de que a partir de esto se consideró necesario una investigación adicional dado que es importante conocer el comportamiento del ^{131}I dentro de la PTAR y entender las posibles causas de las concentraciones encontradas de este radionúclido.

²⁴ Bq/L o Bq/kg son las unidades en las que se debe informar la concentración de actividad de un radionúclido y significa las desintegraciones por segundo de un radionúclido en un litro de solución.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta como alternativa de remoción para el ^{131}I a nivel de los generadores en respuesta al comportamiento del ^{131}I en la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales del Salitre.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diagnosticar la actividad del ^{131}I en la PTAR del Salitre.
- Establecer la alternativa de remoción a nivel del generador por medio de un desarrollo experimental.
- Realizar las especificaciones técnicas del proceso de remoción para aplicación a nivel de generadores.
- Realizar el análisis de los costos de la alternativa de remoción.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se explican los conceptos básicos sobre el yodo, sus isótopos, ¿Qué es la espectrometría gamma?, ¿Cuáles son los equipos utilizados?, Dándoles respuestas a estos interrogantes se busca que el lector tenga una aproximación al tema de radiación y a la problemática actual debido a su concentración en aguas residuales.

1.1 YODO

Es un elemento que se encuentra de manera natural en la tierra y en algunos alimentos. Es un mineral que interviene en el crecimiento físico y mental, en el funcionamiento de tejidos nerviosos y musculares, el sistema circulatorio y el metabolismo de otros nutrientes. El yodo es necesario para el metabolismo (proceso de conversión de los alimentos en energía) normal de las células. Los seres humanos necesitan el yodo para el funcionamiento normal de la tiroides y para la producción de las hormonas tiroideas.²⁵

Es un elemento no metálico, símbolo I, número atómico 53, masa atómica relativa 126.904, el más pesado de los halógenos (halogenuros) que se encuentran en la naturaleza. En condiciones normales, el yodo es un sólido negro, lustroso, y volátil; recibe su nombre por su vapor de color violeta.

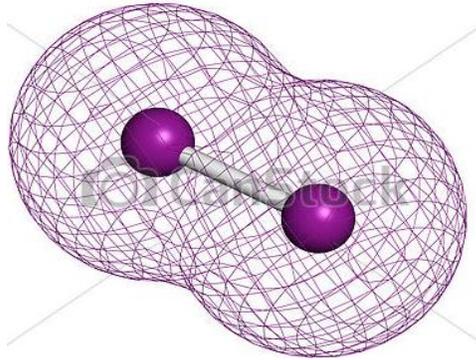
La química del yodo, como la de los otros halógenos, se ve dominada por la facilidad con la que el átomo adquiere un electrón para formar el ion yoduro, I⁻, o un solo enlace covalente -I, y por la formación, con elementos más electronegativos, de compuestos en que el estado de oxidación formal del yodo es +1, +3, +5 o +7. El yodo es más electropositivo que los otros halógenos y sus propiedades se modulan por: la debilidad relativa de los enlaces covalentes entre el yodo y elementos más electropositivos; los tamaños grandes del átomo de yodo y del ion yoduro, lo cual reduce las entalpías de la red cristalina y de disolución de los yoduros, en tanto que incrementa la importancia de las fuerzas de van der Waals en los compuestos del yodo, y la relativa facilidad con que se oxida éste²⁶, en la **Imagen 1** se presenta la molécula del yodo y en la **Tabla 1** se presentan las propiedades físicas del yodo estable.

²⁵ ALBA, Leidy. MEDICION DE LÍMITES DE DESCARGA PARA VERTIMIENTOS GENERADOS EN MEDICINA NUCLEAR. Tesis de Grado. Física. UPTC. (en línea)

<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1502/1/TGT-247.pdf> (citado el 20 de noviembre de 2019)

²⁶YODO (en línea) <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/i.htm> (citado el 20 de noviembre de 2019)

Imagen 1. Molécula de yodo



Fuente: CanStock Photo. Molécula. Yodo elemental. (en línea). [citado el 13 de febrero de 2020]. Disponible en internet. <https://www.canstockphoto.es/convenional>

Tabla 1. Propiedades físicas del yodo estable²⁷

PROPIEDADES DE YODO	
Grupo en la tabla periódica	17
Masa Atómica (g/mol)	127
Número Atómico	53
Símbolo	I
Punto de fusión(°C)	113,7
Punto de ebullición(°C)	184,4
Estado en la Naturaleza	Sólido
Color	Negro

Fuente: LENNTECH BV, ROTTERDAM, [en línea], <<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/i.html>>, [citado el 03 de Julio de 2019]

²⁷ LENNTECH BV, ROTTERDAM, [en línea], <<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/i.html>>, [citado el 03 de Julio de 2019]

1.1.1 Abundancia en la naturaleza. El yodo es uno de los halógenos menos abundantes, presentados en la corteza terrestre con una concentración de 0.14 ppm, mientras que en el agua del mar su abundancia es de 0.052ppm.

Los geoquímicos han calculado que la proporción de yodo en la corteza terrestre viene a ser una de a dos cienmilésimas por ciento; no obstante, el yodo existe en todas partes

Gran cantidad de materia existente está impregnada de yodo. La tierra dura, las rocas, incluso los cristales más puros del transparente Cristal de roca o espato de Islandia, contiene bastantes átomos de yodo. Considerablemente más lo contiene el agua de mar también, en gran cantidad, se halla en las aguas corrientes, en el suelo y, sobre todo, en las plantas, los animales y el hombre. Los seres humanos respiran yodo del aire, pues se halla saturado de sus vapores.²⁸

1.1.2 Yodo en el ser humano. Este elemento es un nutrimento indispensable para el ser humano, ya que permite que la glándula tiroidea produzca las hormonas triyodotironina (T3) y tiroxina (T4), las cuales son necesarias para la elaboración de diversas funciones relacionadas con la utilización de nutrimentos en el cuerpo, así como esenciales para el crecimiento y el desarrollo del cerebro, entre otros tejidos. Los trastornos en los niveles adecuados de yodo pueden desencadenar:

Por deficiencia: Hipotiroidismo, hipotermia, obesidad, la piel y el pelo se muestran secos, disminución de la tasa metabólica basal, palpitaciones cardíacas, aborto en mujeres embarazadas, deformaciones fetales, retraso mental, cretinismo y bocio.

Por exceso: Aumento de la tasa metabólica basal, apetito voraz, sed inagotable, pérdida de peso, debilidad general, intolerancia al calor, nerviosismo y trastornos cardíacos.²⁹

Algunas de las funciones más importantes del yodo son:

- Participa en la formación de las hormonas tiroideas T4 y T3.
- Es necesario para obtener energía corporal.
- Ayuda en la absorción de hidratos de carbono.
- Mantiene en buen estado uñas, pelo, piel y dientes.
- Mejora la agilidad mental.
- Ayuda a regular y sintetizar el colesterol.
- Está presente en las fases de crecimiento y desarrollo del organismo.
- Ayuda a que el organismo queme el exceso de grasa.
- Participa en el funcionamiento de tejidos nerviosos y musculares.

²⁸El yodo. [en línea] <http://elyodo.blogspot.com/2012/02/el-yodo.html>. [citado el 10 de julio de 2019]

²⁹ MEDICION DE LIMITES DE DESCARGA PARA VERTIMIENTOS GENERADOS EN MEDICINA NUCLEAR <<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1502/1/TGT-247.pdf>> [citado el 5 de agosto de 2019]

- Participa en el sistema circulatorio.
- Es necesario para el correcto metabolismo de los nutrientes.

1.1.3 Isótopos asociados al yodo. El yodo presenta 37 isótopos todos radiactivos excepto el ^{127}I que es el único estable, de los otros isótopos se resaltan en la medicina nuclear cinco que son ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ^{129}I , y el ^{131}I , los cuales son los más utilizados en medicina nuclear, otro importante de resaltar es el ^{129}I que es el radioisótopo del yodo con vida media más larga de aproximadamente 16 millones de años, se obtiene a partir del decaimiento del ^{129}Xe y ^{238}U . Actualmente se usa como trazador en el agua superficial y como indicador de la dispersión de residuos en el medio ambiente. ³⁰ La **Tabla 2** muestra los diferentes isótopos del yodo.

Tabla 2. Isótopos del Yodo

Nombre del Núclido	Vida Media	Nombre del Núclido	Vida Media
^{108}I	36 ms 6	^{127}I	Estable
^{109}I	92.8 us 8	^{128}I	24.99 min 2
^{110}I	0.664 s 24	^{129}I	1.57×10^7 Y 4
^{111}I	2.5 s 2	^{130}I	12,36 h
^{112}I	3.34 s 8	^{131}I	8,0252 d 6
^{113}I	6.6 s 2	^{132}I	2,295 h 13
^{114}I	2.1 s 2	^{133}I	20,83 h 8
^{115}I	1.3 min 2	^{134}I	52.5 m 2
^{116}I	2.91 s 15	^{135}I	3.52 m 4
^{117}I	2.22 m 4	^{136}I	83.4 s 4
^{118}I	13.7 min 5	^{137}I	24.5 s 2
^{119}I	19.1 m 4	^{138}I	6.26 s 3
^{120}I	81.6 m 2	^{139}I	2.280 s 11
^{121}I	2.12 h 1	^{140}I	0.86 s 4
^{122}I	3,63 min 6	^{141}I	0.43 s 2
^{123}I	13,2 h 19	^{142}I	222 ms 12
^{124}I	4,176 d 3	^{143}I	130 ms 45
^{125}I	59.407 d 10	^{144}I	300 ns
^{126}I	12.93 d 5	^{145}I	407 ns

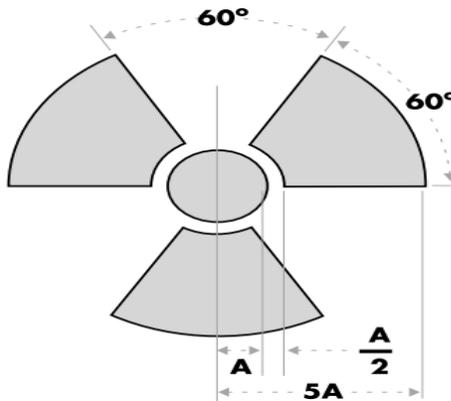
Fuente: elaboración Propia

³⁰ Usos del Yodo. [en línea] <https://es.slideshare.net/wachunei/trabajo-del-yodo> [Citado el 5/11/2019]

1.2 RADIACIÓN

La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas se puede encontrar por todos lados, con el simple hecho de vivir en la tierra el ser humano está expuesto a ella por la radiación natural³¹, el símbolo de radiactividad se presenta en la **Imagen** donde el área sombreada debe ser de color magenta o púrpura y el fondo amarillo.³²

Imagen 2. Símbolo de la radiación³³



Fuente: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. INSST. España. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Radiaciones Ionizantes. Cap. 48. [en línea] <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+48.+Radiaciones+ionizantes> (citado el 20 de noviembre de 2019)

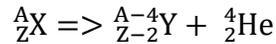
1.2.1 Tipos de radiación.

³¹ Foro de la industria Nuclear Española [en línea] <https://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119909-que-sabes-de-la-radiacion> [Citado el 5/11/2019]

³² ³² Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. INSST. España. Enciclopedia De Salud Y Seguridad En El Trabajo. Radiaciones Ionizantes. Cap. 48. [en línea] <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+48.+Radiaciones+ionizantes> (citado el 20 de noviembre de 2019)

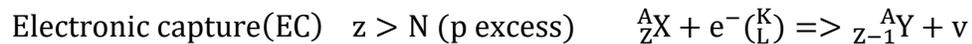
³³ Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. INSST. España. Enciclopedia De Salud Y Seguridad En El Trabajo. Radiaciones Ionizantes. Cap. 48. [en línea] <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+48.+Radiaciones+ionizantes> (citado el 20 de noviembre de 2019)

1.2.1.1 Radiación alfa. Este tipo de radiación consiste en la emisión de núcleos de helio (las llamadas partículas α) por núcleos pesados.



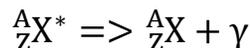
Fuente: EISBERG, Robert. RESNICK, Robert (1994). Física cuántica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. México D.F.: Limusa. 968-18-0419-8, 978-9681804190

1.2.1.2 Radiación beta. La desintegración beta comprende tres procesos nucleares. En uno de ellos se emiten electrones, en otros positrones y en el tercero se produce la captura de un electrón por parte de núcleos alejados de la línea de estabilidad.



Fuente: EISBERG, Robert. RESNICK, Robert (1994). Física cuántica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. México D.F.: Limusa. 968-18-0419-8, 978-9681804190

1.2.1.3 Radiación gamma. Esta se da cuando el núcleo no cambia su composición, sino que los nucleones que lo forman experimentan una transición entre dos niveles energéticos, algo parecido a las desexcitaciones de electrones en átomos.³⁴



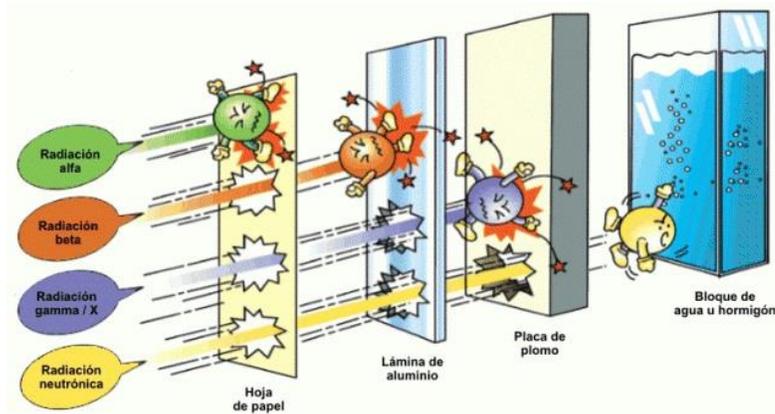
Fuente: EISBERG, Robert. RESNICK, Robert (1994). Física cuántica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. México D.F.: Limusa. 968-18-0419-8, 978-9681804190

En la **Imagen 3** se puede observar algunos materiales que pueden ser una barrera para los diferentes tipos de radiaciones y a la vez se puede evidenciar el poder penetrante que tiene cada tipo de radiación siendo las radiaciones alfa las de menor

³⁴ TIPOS DE RADACIÓN. [en línea]. < <https://cuentos-cuanticos.com/tag/desintegracion-gamma/> > [citado el 17 de octubre de 2018]

penetración, seguidas de las radiaciones beta y por ultimo las radiaciones más penetrantes, las radiaciones gama.

Imagen 3. Penetración de los Tipos de radiaciones



Fuente: Universidad Cooperativa de Colombia. La importancia de cuantificar las radiaciones ionizantes para prevenir sus efectos [en línea]. <<https://www.ucc.edu.co/prensa/2016/Paginas/la-importancia-de-cuantificar-las-radiaciones-ionizantes-para-prevenir-sus-efectos.aspx>> [citado el 17 de octubre de 2018]

1.2.2 Radioisótopo. Es un tipo de isótopo que debido a ciertas combinaciones entre neutrones y protones tienen un núcleo atómico inestable lo que le da al elemento la capacidad de emitir radiación, esta capacidad que va disminuyendo con el tiempo. Algunos pueden ser encontrados en la naturaleza y otros son productos de reactores nucleares. Se diferencian por sus características, por ejemplo, el tipo de radiación que emite (alfa, beta o gamma).

Existen varias aplicaciones de los radioisótopos en la industria, como en la medicina en donde son empleados como indicadores de diagnóstico en el comportamiento de algunos órganos para detectar cáncer; según la OIEA existen más de 1.800 isótopos, tan solo alrededor de 50 son usados en la medicina³⁵

³⁵ UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Servicio De Radioisótopos [en línea]. <<https://investigacion.us.es/scisi/sgi/servicios/radioisotopos/presentacion>> [citado el 17 de octubre de 2018]]

1.2.3 Aplicación Médica de la Radiación. Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes se basan en la interacción de la radiación con la materia y su comportamiento en ella. Los materiales radiactivos y las radiaciones ionizantes se utilizan ampliamente en medicina, industria, agricultura, docencia e investigación.

En medicina, el uso de radiaciones ionizantes se encuadra en la aplicación de técnicas de radiodiagnóstico, radioterapia y medicina nuclear.

El radiodiagnóstico comprende el conjunto de procedimientos de visualización y exploración de la anatomía humana mediante imágenes y mapas. Algunas de estas aplicaciones son la obtención de radiografías mediante rayos X para identificar lesiones y enfermedades internas, el uso de radioisótopos en la tomografía computarizada para generar imágenes tridimensionales del cuerpo humano, la fluoroscopia y la radiología intervencionista, que permite el seguimiento visual de determinados procedimientos quirúrgicos.

La radioterapia permite destruir células y tejidos tumorales aplicándoles altas dosis de radiación.

La medicina nuclear es una especialidad médica que incluye la utilización de material radiactivo en forma no encapsulada para diagnóstico, tratamiento e investigación. Un ejemplo es el radioinmunoanálisis, una técnica analítica de laboratorio que se utiliza para medir la cantidad y concentración de numerosas sustancias (hormonas, fármacos, etc.) en muestras biológicas del paciente.

1.2.4 Otras aplicaciones. En el ámbito industrial, las aplicaciones de las radiaciones ionizantes son muchas y muy variadas. La industria aprovecha la capacidad que tienen las radiaciones para atravesar los objetos y materiales y el hecho de que cantidades insignificantes de radionúclidos pueden medirse rápidamente y de forma precisa proporcionando información exacta de su distribución espacial y temporal.

Algunas de las aplicaciones más significativas de las radiaciones ionizantes en la industria son la esterilización de materiales, la medición de espesores y densidades o de niveles de llenado de depósitos o envases, la medida del grado de humedad en materiales a granel (arena, cemento, etc.) en la producción de vidrio y hormigón, la gammagrafía o radiografía industrial para, por ejemplo, verificar las uniones de soldadura en tuberías, los detectores de seguridad y vigilancia mediante rayos X en aeropuertos y edificios oficiales, los detectores de humo; detectores de fugas en canalizaciones y la datación por análisis del carbono ¹⁴ para determinar con precisión la edad de diversos materiales.

También son muchas las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la agricultura y la alimentación, por ejemplo, para determinar la eficacia de la absorción de abono por las plantas, determinar la humedad de un terreno y así optimizar los recursos

hídricos necesarios, para el control de plagas y para prolongar el periodo de conservación de los alimentos mediante su irradiación con rayos gamma.

Aparte de los logros tecnológicos anteriores, el uso de las radiaciones ha supuesto un increíble avance en todo tipo de actividades de investigación tales como los estudios de biología celular y molecular del cáncer, patologías moleculares, evolución genética, terapia genética, desarrollo de fármacos, etc.³⁶

1.3 RADIOISÓTOPO ¹³¹I

Es un radioisótopo que cuenta con 78 neutrones y 53 protones descubierto por Glenn Seaborg y John Livingood en el año 1938 en la Universidad de California, Berkeley.³⁷

Está asociado con la energía nuclear, con procedimientos de diagnóstico y tratamientos médicos, y producción de gas natural. El ¹³¹I juega un rol central como un isótopo radiactivo presente en los productos de una fisión nuclear.³⁸

1.3.1 Obtención del ¹³¹I. En los reactores, los átomos de sustancias irradiadas al capturar los neutrones se transforman en isótopos o se transmutan en otro elemento radiactivo. El ¹³¹I se obtiene de la irradiación del ¹³⁰Te.³⁹

Otra forma de obtención es la reacción en cadena que ocurre dentro del mismo combustible del reactor. El óxido de ²³⁵U muy puro al comienzo, se va recargando progresivamente de fragmentos radiactivos de fisión. En la práctica, muchos de ellos resultan con una actividad aprovechable, entre ellos el ¹³¹I.⁴⁰

En algunos países, Estados Unidos, sobre todo, la producción de grandes cantidades de ¹³¹I se verifica por vía fisión del uranio (12). Para producir pequeñas

³⁶ Consejo de Seguridad Nuclear. Uso de las radiaciones [en línea]. <https://www.csn.es/usos-de-las-radiaciones> [citado el 17 de octubre de 2018].

³⁷ UW-L Brachy Course. Iodine-131 <http://uwlbrachycourse.wikifoundry.com/page/Iodine-131> [Consultado el 30 de junio de 2019]

³⁸ Wikipedia (en línea) http://recursos.normalpopayan.edu.co:8983/wikipedia_es_all_2017-08/A/Yodo-131.html [citado el 20 de junio de 2019]

³⁹ SISTEMA INTERNACIONAL DE DOCUMENTACIÓN NUCLEAR. IAEA. Estudio de los productos de fisión de periodo corto. separación de los radionúclidos de fisión del yodo y del xenón. [en línea] <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/038/40038354.pdf?r=1&r=1> [citado el 8 de Agosto de 2019]

⁴⁰ CASTRO, Fidel. Energía Nuclear y Desarrollo Realidades del átomo contemporáneo. Reacción para la producción de yodo 131 con uranio y telurio [en línea]. Ediciones Del Sol, 1991 - 406 páginas <https://books.google.com.co/books?id=c_Zq3AjlLJkC&pg=PA123&dq=reaccion+para+la+produccion+de+yodo+131+con+uranio+y+telurio&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjfKyx7u3kAhXOmVkKHYZ6Cl8Q6AEILjAB#v=onepage&q&f=false> [citado el 8 de Agosto de 2019]

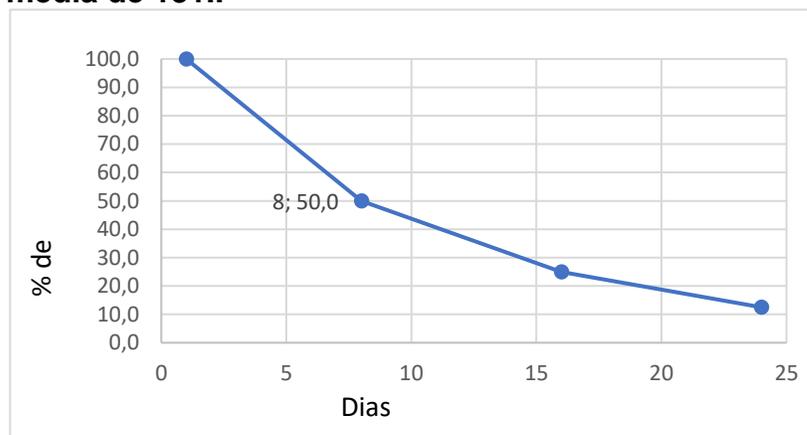
cantidades de ^{131}I , el método del telurio parece, no obstante, el más indicado, porque produce directamente ^{131}I libre de impurezas isotópicas activas e inactivas, y, por lo tanto, de utilización inmediata. Para la producción de grandes cantidades de ^{131}I , tal vez sea más indicado el empleo de uranio como materia prima, ya que este elemento o sus óxidos pueden someterse a elevados flujos instantáneos o integrales sin sufrir transformación química alguna, mientras que el ácido telúrico es un material de posibilidades bastante limitadas en este sentido. La irradiación de uranio tiene la desventaja, no obstante, de dar una mezcla compleja de yodos activos de fisión, de los cuales el ^{133}I de 21 horas es el componente que contribuye en mayor proporción a impurificar el ^{131}I , tanto por sí mismo como por su descendiente isobárico el ^{133}Xe . Otra desventaja de la irradiación de uranio reside en los espesores de blindaje necesarios para manejar la actividad resultante de todos los productos de fisión formados, si bien, y esto es una ventaja, la solución de uranio de la que se han destilado los yodos puede emplearse como solución madre para la recuperación de otros radionúclidos de fisión.⁴¹

1.3.2 Vida media. La vida media de un isótopo radiactivo es el tiempo que le toma en disminuir la mitad de su actividad original, es un índice particular para cada radioisótopo⁴² es importante tener en cuenta en experimentos y eliminación del ^{131}I que al haber transcurrido 7 vidas medias la radioactividad ha disminuido hasta un 1% y pasadas 10 vidas medias ha disminuido a un valor menos al 0.1%, como se ve en el **Diagrama 1**.

⁴¹ Sistema Internacional de Documentación Nuclear. IAEA. ESTUDIO DE LOS PRODUCTOS DE FISIÓN DE PERIODO CORTO. SEPARACIÓN DE LOS RADIONUCLIDOS DE FISIÓN DEL YODO Y DEL XENÓN. [en línea] <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/038/40038354.pdf?r=1&r=1> [citado el 8 de agosto de 2019]

⁴² DM, Vasudevan, S, Sreekumari. TEXTO DE BIOQUIMICA PARA ESTUDIANTES DE MEDICINA [en línea]. <https://books.google.com.co/books/about/Texto_de_Bioquimica_para_Estudiantes_de.html?id=IkISdcwT5IsC&redir_esc=y> [citado el 17 de octubre de 2019]

Diagrama 1 Reducción de la radiactividad y vida media de ^{131}I .



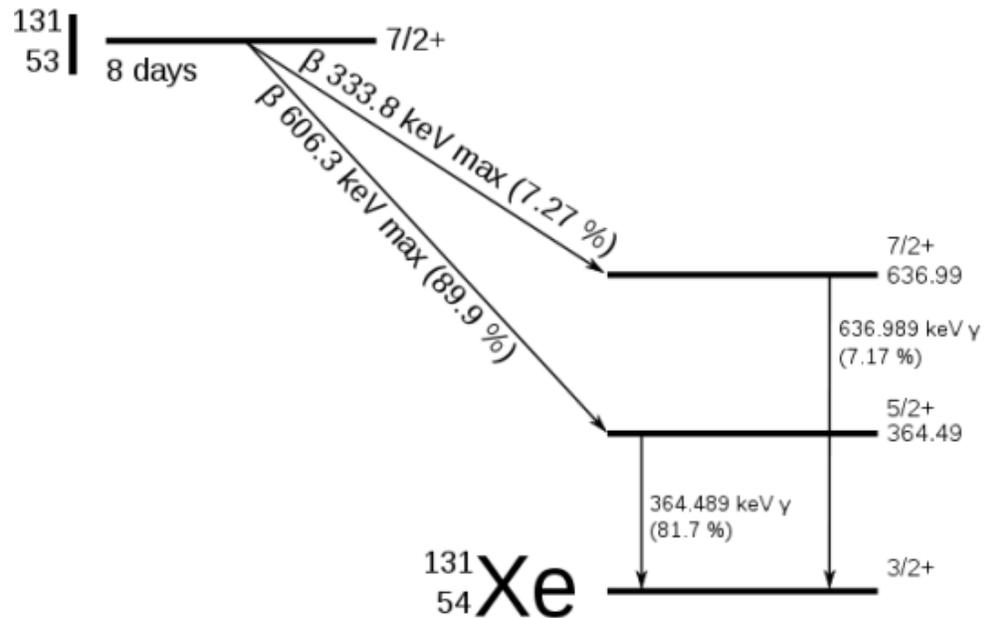
Fuente: DM, Vasudevan, S, Sreekumari. Texto de bioquímica para estudiantes de medicina. [en línea].

https://books.google.com.co/books/about/Texto_de_Bioquimica_para_Estudiantes_de.html?id=lklSdcwT5lsC&redir_esc=y [citado el 17 de octubre de 2019]

1.3.3 Desintegración radiactiva del yodo. El ^{131}I presenta desintegración beta. Lo que hace que sea radiactivo. Entre más rápido se descomponga mayor cantidad de radiación emite por unidad de tiempo. El ^{131}I se desintegra en ^{131}Xe por un proceso de primer orden, lo que significa que la tasa de decaimiento es directamente proporcional a la concentración de ^{131}I ., esto puede verse en la **Imagen 4**.

El tratamiento con ^{131}I es beneficioso para pacientes con anomalías en la glándula tiroidea como el hipotiroidismo y el hipertiroidismo, debido a que, la tiroides humana absorbe yodo para crear hormonas, sin embargo, si la glándula empieza a absorber ^{131}I , emite rayos beta que podrán causar daño en el ADN provocando cáncer.

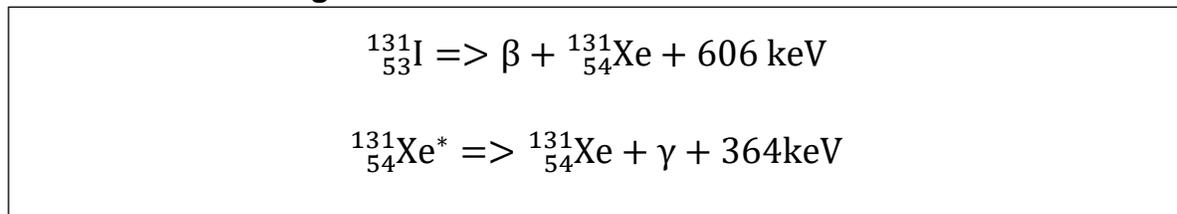
Imagen 4. Esquema de desintegración del ^{131}I (simplificado)



Fuente: GIZMODO. Usos del yodo radiactivo. (en línea). Disponible en internet. <https://es.gizmodo.com/nadie-sabe-el-origen-de-esta-misteriosa-radiacion-nucle-1792577613> [citado el 13 de febrero de 2020]

Cuando se produce su desintegración mediante un proceso beta menos y seguido rápidamente de una desintegración gamma el ^{131}I da lugar a un núcleo de ^{131}Xe estable, siguiendo las reacciones:

Ecuación 1. Desintegración del ^{131}I



Fuente: SKUGOR, Mario (2006). Thyroid Disorders. A Cleveland Clinic Guide. Cleveland Clinic Press. p. 82. ISBN 978-1-59624-021-6.

Las emisiones primarias de la desintegración del ^{131}I son electrones con una energía máxima de 606 keV (89% de abundancia, otros 248–807 keV) y 364 keV de radiación gamma (abundancia del 81%, otros 723 keV).⁴³ La desintegración beta también produce un antineutrino, que lleva cantidades variables de energía de desintegración beta. Los electrones, debido a su alta energía promedio (190 keV,

⁴³ Nuclide Safety Data Sheet. (en línea) [<http://hpschapters.org/northcarolina/NSDS/131IPDF.pdf>] Consultado el 26 de septiembre de 2019.

con típico espectro de desintegración beta presente) tienen una penetración de tejidos biológicos de entre 0,6 a 2 mm.⁴⁴

1.3.4 Usos. El yodo se puede transformar principalmente en dos isótopos radiactivos para usos médicos: ¹²³I y ¹³¹I. Estos isótopos pueden administrarse por vía oral a pacientes en los que se sospechan afecciones tiroideas. El yodo radiactivo se concentra en el interior de las células tiroideas exactamente de la misma manera que el yodo puede ser usado para diagnosticar o tratar problemas de la tiroides como se muestra en la figura 2.1. La radiación emitida por el yodo radiactivo puede ser inofensiva para las células tiroideas (¹²³I) o la radiación puede destruir las células tiroideas (¹³¹I). El yodo radiactivo que no es concentrado por las células tiroideas es eliminado del cuerpo a través del sudor y la orina.

1.4 RADIACIÓN EN EL HUMANO POR ¹³¹I

El ¹³¹I dispuesto como yoduro de potasio (KI) o yoduro de sodio (NaI) se administra a pacientes para tratar algunas patologías relacionadas con la glándula tiroides, en dosis de 15 a 30 mCi para hipertiroidismo y de 100 a 300 mCi en tratamientos de cáncer de tiroides.⁴⁵ La dosis administrada se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Dosis de ¹³¹I administrada a pacientes

Tratamiento	Dosis en mCi	Dosis en Bq
Hipertiroidismo	15 a 30	555.000.000 a 1.110.000.000
Cáncer de tiroides	100 a 300	3.700.000.000 a 11.100.000.000

Fuente: elaboración propia

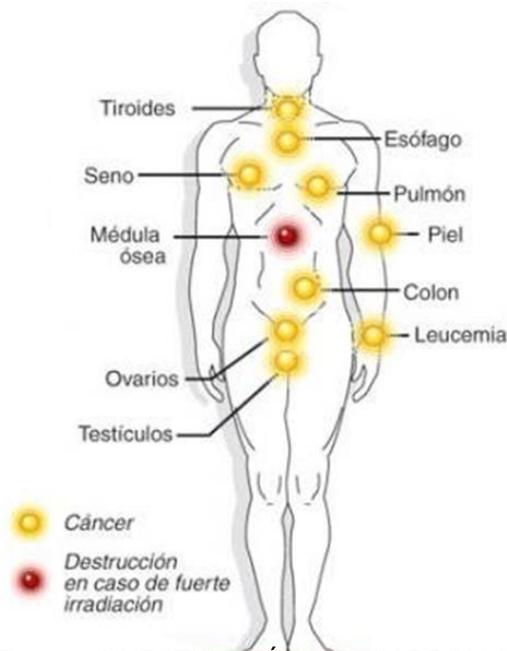
La dosis de radiactividad impartida por el ¹³¹I en el tejido tiroideo se debe esencialmente a la emisión de rayos beta y depende de la captación que exista en el tejido o tumor y de su período efectivo en el mismo. La irradiación a otros tejidos está en relación con los rayos gamma emitidos por el ¹³¹I concentrados en el tiroides y por los rayos gamma y beta del ¹³¹I circulante o concentrado localmente (vejiga, estómago, glándulas salivales y colon). La dosis de radiación en los distintos órganos depende del radio yodo circulante no concentrado en el tiroides o tumor,

⁴⁴ SKUGOR, Mario (2006). Thyroid Disorders. A Cleveland Clinic Guide. Cleveland Clinic Press. p. 82. ISBN 978-1-59624-021-6.

⁴⁵ CRUZ, Emeterio. MAYORGA, Manuel. QUIVERIO, Noelia y VILLADA, Julián. Planteamiento De Un Sistema De Remoción De ¹³¹I De Vertimientos Líquidos En Una Unidad Sanitaria De Medicina Nuclear Empleando ¹²⁷I Como Patrón De Referencia. IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA 2013. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, April 15-19, 2013. SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA – SBPR. [citado el 5 de julio de 2019]

de la concentración local, sobre todo en los tejidos que concentran el ^{131}I (glándulas salivales), de la liberación de metabolitos del tejido tiroideo o tumoral unidos orgánicamente al yodo y de la radiación recibida a través de órganos vecinos que concentren ^{131}I . Se ha estimado la dosis de radiación recibida en varios órganos como médula ósea, mama y gónadas, comprobándose cómo ésta se incrementa a medida que aumenta la captación del tumor, ya que la principal fuente de radiación de estos órganos es la liberación de compuestos orgánicos del ^{131}I . La radiación recibida en vejiga, estómago y glándulas salivales es generalmente 10 veces más elevada que en otros órganos,⁴⁶ tal como se observa en la **Imagen 5**.

Imagen 5. Impacto de las radiaciones en la salud



Fuente: INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO. El impacto de las radiaciones en la salud. Investigación y Desarrollo (en línea). <https://invdes.com.mx/infografias/el-impacto-de-las-radiaciones-nucleares-en-la-salud/attachment/attachment-el-impacto-de-las-radiaciones-nucleares-en-la-salud/> [citado el 12 de febrero de 2020]

⁴⁶ Smith T, Edmons CJ. Radiation dosimetry in the treatment of thyroid carcinoma for ^{131}I . <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/5/3/141/1603226>

El embarazo y la lactancia son contraindicaciones para el tratamiento con yodo radiactivo. El tejido tiroideo fetal es funcional desde la 10a - 12a semanas y podría ser destruido por el yodo radiactivo, lo que daría lugar a cretinismo. El radio yodo sólo se debe administrar si una mujer tiene una prueba de embarazo negativa 72 horas antes de la administración del tratamiento o si la posibilidad de embarazo queda excluida por un historial de esterilización quirúrgica en la paciente.⁴⁷

Además, se debe recomendar anticoncepción por al menos 6 a 12 meses posterior a la terapia. Existe aumento en la actividad del transportador NIS (proteína transportadora de yodo) en el tejido mamario estrogenizado, lo que resulta en la absorción del yodo radiactivo por parte de las mamas. Debido a esto, la lactancia debe suspenderse idealmente entre 6 y 8 semanas antes de la terapia con ¹³¹I para reducir la absorción de yodo radiactivo por el tejido mamario y no debe reiniciarse por ese hijo.

Las contraindicaciones relativas son depresión de la médula ósea, restricción de la función pulmonar en pacientes con metástasis pulmonares, hipofunción de glándulas salivales y presencia de síntomas o daño neurológico cuando la inflamación o edema local por radioyodoterapia en las metástasis pueda generar efectos compresivos severos.

1.4.1 Irradiación Externa. Se dice que hay riesgo de irradiación externa cuando, por la naturaleza de la radiación y el tipo de práctica, la persona sólo está expuesta mientras la fuente de radiación está activa y no puede existir contacto directo con un material radiactivo. Es el caso de los generadores de rayos X, los aceleradores de partículas y la utilización o manipulación de fuentes encapsuladas.

⁴⁷ Riesco-Eizaguirrea Garcilaso, Santistebana Pilar, Transportador de yodo (NIS) y su aplicación diagnóstica y terapéutica en diferentes enfermedades. Revista de Endocrinología y nutrición. Vol. 55. Núm. 3. páginas 107-110 (Marzo 2008). [en línea] <https://www.elsevier.es/es-revista-endocrinologia-nutricion-12-articulo-transportador-yodo-nis-su-aplicacion-S1575092208706454> [citado el 5 de julio de 2019]

1.4.2 Contaminación Radiactiva. Cuando puede haber contacto con la sustancia radiactiva y ésta puede penetrar en el organismo por cualquier vía (respiratoria, dérmica, digestiva o parenteral) se habla de riesgo por contaminación radiactiva. Esta situación es mucho más grave que la simple irradiación, ya que la persona sigue estando expuesta a la radiación hasta que se eliminen los radionucleidos por metabolismo o decaiga la actividad radiactiva de los mismos. En caso de contaminación radiactiva del organismo humano, según que los radionucleidos estén depositados en la piel, los cabellos o las ropas, o bien hayan penetrado en el interior del organismo, se considera contaminación externa o contaminación interna respectivamente. La gravedad del daño producido está en función de la actividad y el tipo de radiaciones emitidas por los radionucleidos.⁴⁸

1.4.3 Exposición. Se llama exposición al hecho de que una persona esté sometida a la acción y los efectos de las radiaciones ionizantes. Puede ser:

- Externa: exposición del organismo a fuentes exteriores a él.
- Interna: exposición del organismo a fuentes interiores a él.
- Total: suma de las exposiciones externa e interna.
- Continua: exposición externa prolongada, o exposición interna por incorporación permanente de radionucleidos, cuyo nivel puede variar con el tiempo.
- Única: exposición externa de corta duración o exposición interna por incorporación de radionucleidos en un corto periodo de tiempo.
- Global: exposición considerada como homogénea en el cuerpo entero.
- Parcial: exposición sobre uno o varios órganos o tejidos, sobre una parte del organismo o sobre el cuerpo entero, considerada como no homogénea.

1.5 RADIO DE INCIDENCIA DEL YODO 131

1.5.1 Radio-farmacias. Son los proveedores de los centros hospitalarios de los radioisótopos utilizados para la medicina nuclear, y una de las fuentes productoras de ¹³¹I como desecho radiactivo debido a sus actividades, se clasifican en hospitalaría, centralizada e industrializada y la norma que las rige es la Resolución 00004245 del 19 de octubre del 2015.

⁴⁸ MENEDEZ, Susana. GARCÍA, Antonia. PROCEDIMIENTOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA PARA LA MANIPULACION DE FUENTES NO ENCAPSULADAS UTILIZADAS EN LA INSTALACIÓN RADIATIVA CENTRAL (IRC) DE LA FACULTAD DE MEDICINA DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID (UCM)). [en línea]<https://www.ucm.es/data/cont/docs/256-2013-11-26-2013PROCEDIMIENTOS%20DE%20PROTECCI%C3%93N%20RADIOL%C3%93GICA%20Usuarios%20EN%20LA%20INSTALACI%C3%93N%20RADIATIVA%20CENTRAL.pdf> [citado el 5 de julio de 2019]

1.5.2 Instalaciones de Medicina Nuclear. Actualmente en Bogotá hay 28 instalaciones que se dedican a la medicina nuclear para el tratamiento de sus pacientes, 20 de estas instalaciones descargan sus aguas en el río Torca y Salitre que son las cuencas que llegan a la PTAR del salitre en la **Tabla 4** se muestra el número de hospitales por cuenca y la actividad autorizada por mes para la descarga de vertimientos de estos hospitales con estos datos se busca correlacionar las concentraciones de actividad encontradas con las descargas de instalaciones de medicina nuclear.

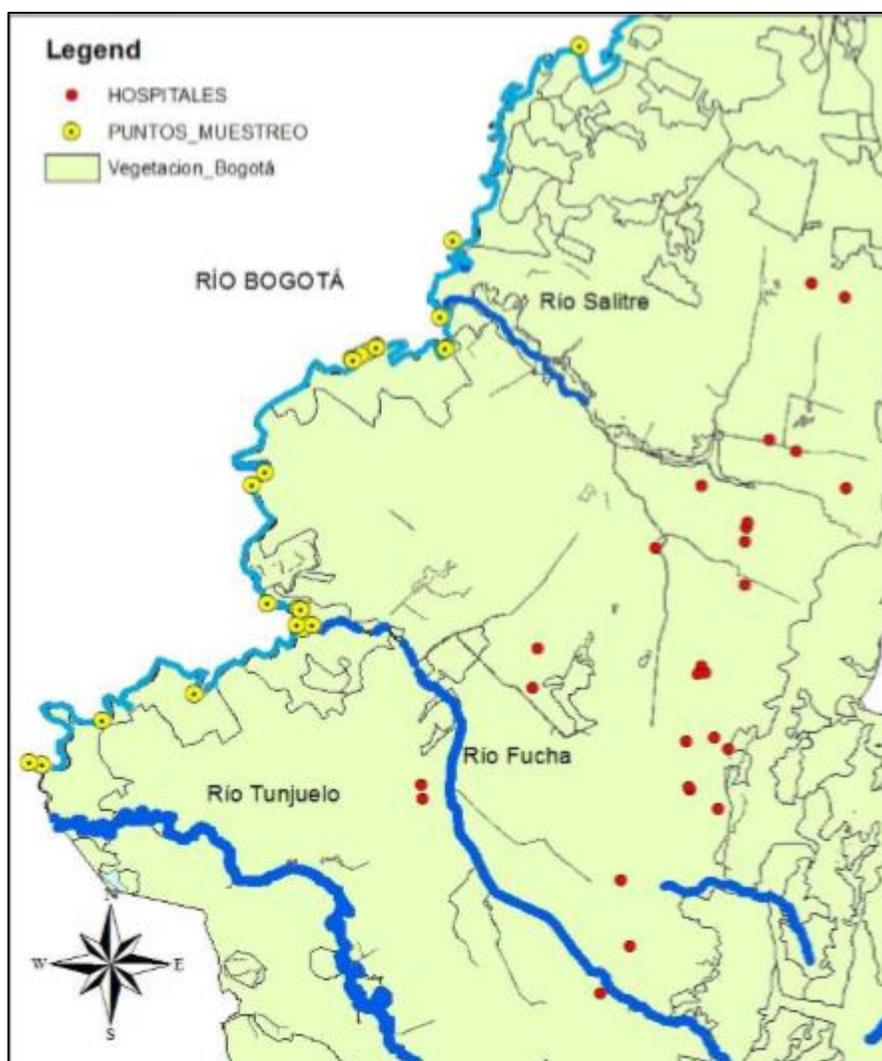
Tabla 4. Descargas de Instalaciones de medicina nuclear.

Zona	Número de instalaciones	Cuenca	Actividad autorizada en uso promedio (mCi/mes)
Norte	7	Torca	338
Nor-Occidental	13	Salitre	563
Sur Occidental	8	Fucha	491

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

En la **Imagen 6**. se muestra la ubicación de las instalaciones de medicina nuclear en Bogotá reflejándose que la mayor cantidad de estas instalaciones están ubicadas después de la calle 26, es decir que la mayoría de aguas residuales de estas instalaciones están en la zona abarcada por la PTAR del Salitre.

Imagen 6. Localización de Instalaciones de Medicina Nuclear en Bogotá⁴⁹



Fuente: mapa elaborado por Lizeth Andrea Ospina Perdigón.⁵⁰

⁴⁹ OSPINA PERDIGÓN, Liseth Andrea. Propuesta para la determinación del radio de incidencia del 131i a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá. Tesis de grado Ingeniero Químico. Bogotá. Fundación Universidad de América. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Química. 2018

⁵⁰ OSPINA PERDIGÓN, Liseth Andrea. Propuesta para la determinación del radio de incidencia del 131i a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá. Tesis de grado Ingeniero Químico. Bogotá. Fundación Universidad de América. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Química. 2018

1.5.3 ^{131}I en cuerpos de agua. Debido a las actividades como vertimientos de residuos hospitalarios, industriales o de radio farmacia sumando otros posibles factores que incurren como pacientes ambulatorios, mala disposición de equipos radiológicos entre otros, se encuentran registros de actividad de ^{131}I donde los efectos de la incidencia de este radionúclido en cuerpos de aguas son de nivel local regional involucrando a las habitantes de la ciudad de Bogotá y sus municipios aledaños a la ribera del río Bogotá.

1.6 EQUIPOS

1.6.1 Espectrómetro de radiación gamma y de alta resolución con detector de germanio híper puro HPGe

1.6.1.1 Canberra. Los detectores de HPGe son diodos semiconductores que tienen una estructura de clavijas en la que la región intrínseca es sensible a la radiación ionizante, particularmente los rayos X y los rayos gamma. Bajo polarización inversa, un campo eléctrico se extiende a través de la región intrínseca o agotada. Cuando los fotones interactúan con el material dentro del agotado volumen de un detector, portadores de carga (agujeros y electrones) son producidos y barridos por la electricidad campo a los electrodos p y n. Este cargo, que está en proporción a la energía depositada en el detector por el fotón entrante se convierte en un pulso de voltaje por un preamplificador sensible a la carga integral.

Debido a que el germanio tiene una brecha de banda relativamente baja, estos detectores deben enfriarse para reducir la generación térmica de portadores de carga (por lo tanto, inversa corriente de fuga) a un nivel aceptable. De otra manera, el ruido inducido por la corriente de fuga destruye la energía resolución del detector. Nitrógeno líquido, que tiene una temperatura de 77°K es el enfriamiento común medio para tales detectores.⁵¹

1.6.1.2 ORTEC LRA01. ORTEC ofrece una amplia gama de soluciones de detectores de radiación HPGe que cubren las energías para rayos X en el rango de cientos de electronvoltios (eV) hasta rayos gamma en el rango de 10 MeV y superior. Estos detectores se fabrican con germanio de alta pureza (HPGe) de tipo P y N. Todos los detectores en estas dos clases se enfrían criogénicamente, utilizando nitrógeno líquido o enfriadores electromecánicos.

Este tipo de espectrómetro que utiliza detectores de radiación de semiconductores de germanio se requiere enfriamiento criogénico teniendo opciones de enfriamiento electromagnéticas y opciones basadas en nitrógeno líquido.

⁵¹ MIRION Technologies. (en línea) <https://www.mirion.com/products/germanium-detectors> [citado el 20 de noviembre de 2019]

Dewars y criostatos es una opción de refrigeración estándar de nitrógeno líquido en una variedad de configuraciones de criostato y tamaños de dewar para admitir la mayoría de las aplicaciones de detectores de radiación.⁵²

1.7 NORMAS PARA MANEJO Y DISPOSICIÓN

1.7.1 Política para la Gestión de Desechos Radioactivos en Colombia

Establece los lineamientos para que la gestión de estos desechos producidos en Colombia y así garantice la seguridad de los trabajadores, el público y el medio ambiente, tomando en consideración las generaciones presentes y futuras, promoviendo la armonización de estos lineamientos con los demás existentes, nivel nacional y con las recomendaciones y esfuerzos promovidos en el ámbito internacional.⁵³

1.7.2 Resolución 41178 de 2016. En la resolución 41178 del Ministerio de Minas y Energía del 2 de diciembre de 2016, en la que se establecen los tipos de desechos radiactivos, su disposición, las entidades encargadas para cada tipo de desecho y donde se encuentra la tasa máxima de vertimiento para radionúclidos en establecimientos hospitalarios que manejen medicina nuclear entre sus servicios.⁵⁴

1.8 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DEL SALITRE

1.8.1 Ubicación de la PTAR del Salitre. En la **Imagen 7** se muestra la ubicación espacial de la PTAR del Salitre, se observa que está ubicada cerca a la rivera del río Bogotá y de localidades de la Ciudad de Bogotá, con lo cual las concentraciones de actividad de ¹³¹I que se encuentren en las aguas residuales provenientes de esta planta, pueden generar un posible aumento potencial en la dosis de aquellos habitantes de estas zonas.

⁵² ORTEC, HpGEDetectors [En línea] <<https://www.ortec-online.com/products/radiation-detectors/germanium-hpge-radiation-detectors/hpge-radiation-detector-types-how-choose>> [citado el 24 de julio de 2019]

⁵³ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA (en línea) minenergia.gov.co/documents/10180/423055/Politica-para-Gestion-de-Desechos-Radiactivos.pdf/c0acb298-279d-4a61-ab6b-0167ac202e05 [citado el 23 de julio de 2019]

⁵⁴ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Resolución 41178 del 2 de Diciembre del 2016,[en línea] <<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180//23517//37308-Resoluci%C3%B3n-41178-2Dic2016.pdf>> [citado el 23 de julio de 2019]

Imagen 7. Ubicación espacial de la PTAR del salitre.



Fuente: elaboración propia.

Coordenadas: 4.738524,-74.122017

1.8.2 Río Bogotá. Según el Instituto de estudios urbanos, del Ministerio de Hacienda:

“La cuenca del Río Bogotá está ubicada en el centro del país y del Departamento de Cundinamarca, sobre la cordillera Oriental. El Río Bogotá, nace en la región nororiental de Cundinamarca, en un sitio conocido como el Páramo de Guacheneque, de la Laguna del Valle, en el Municipio de Villa Pinzón, de la cordillera Oriental de Colombia, a 3.300 m.s.n.m., desde allí recorre 380 km, hasta el barrio la Boca en Girardot a 280 m.s.n.m., donde entrega todo su caudal al Río Magdalena”.

Se divide en tres cuencas principalmente, la cuenca alta, media y baja. La cuenca media que es la cuenca de interés para el desarrollo de esta investigación tiene 90 km de longitud, empieza desde el puente de la Virgen en Cota hasta antes del embalse de uña en Alicachín. Tiene 10 municipios en su división, Bogotá, Funza, Mosquera, Soacha, Sibaté, Subachoque, El Rosal, Madrid, Bojacá y Facatativá. Sus aguas son aportes de los ríos Fucha, Salitre y Tunjuelo, es usada para riego a través del distrito de Riego de la Ramada.

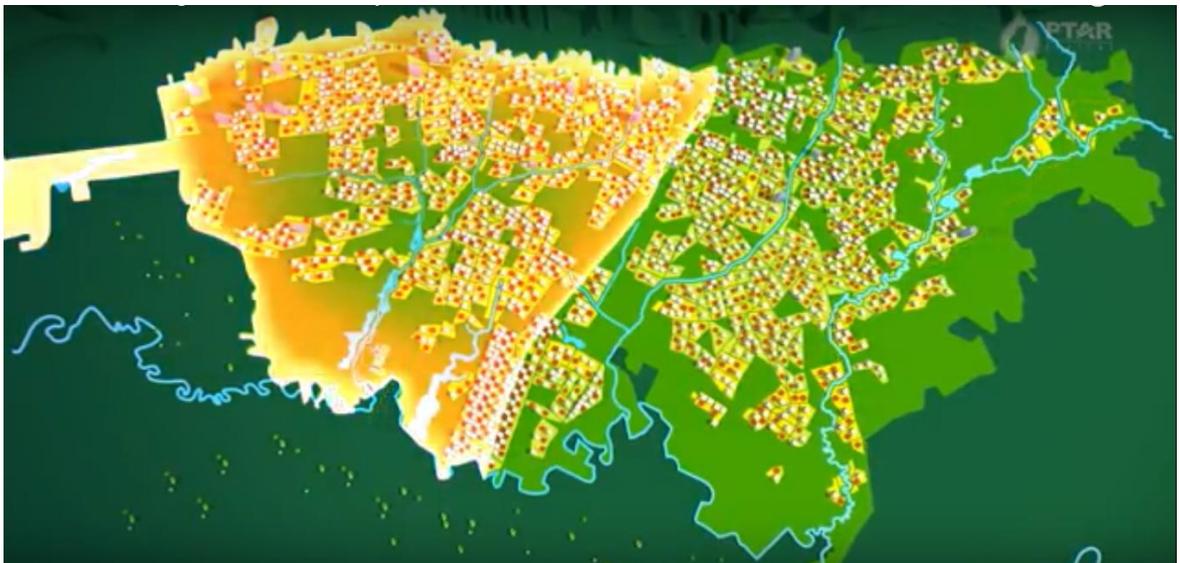
1.8.3 Función. Por medio de interceptores entre ellos el interceptor salitre se captan las aguas residuales del norte de Bogotá producidas por más de dos millones de habitantes.

En la PTAR del Salitre se busca tratar las aguas contaminadas para así poder recuperar los recursos hídricos como el río Bogotá que recibe las aguas residuales del norte de Bogotá captadas por la cuenca del salitre.

La PTAR del salitre es un esfuerzo mancomunado de varias instituciones entre ellas la Secretaría Distrital de Ambiente y Alcantarillado de Bogotá.

Cuenta con un sistema semiautomático de manejo que garantiza la eficiencia y la eficacia de su proceso de tratamiento de aguas residuales, en la Imagen 8 se muestra la zona que abarca la PTAR del Salitre para el tratamiento de sus aguas residuales.

Imagen 8. Zona de Bogotá que trata la PTAR del salite (fondo amarillo)



Fuente: Imagen tomada del vídeo PTAR SALITRE ¿Cómo funciona la planta? (en línea). Disponible en internet. <https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg> [tomada el 10 de agosto del 2019]

1.8.4 Proceso. La PTAR del salitre trata $4 \frac{m^3}{s}$ de agua, el cual es presentado en forma completa en la **Imagen 9**, y en forma de esquema general en el **Diagrama 2**. El proceso comienza dirigiendo las aguas hacia una compuerta de aproximadamente 5 m altura.

Pasa a un cribado grueso que utiliza un sistema de rejillas, que funciona como un gran colador, el cual retiene los residuos más grandes como bolsas canecas, palos, icopor, plásticos, entre otros.

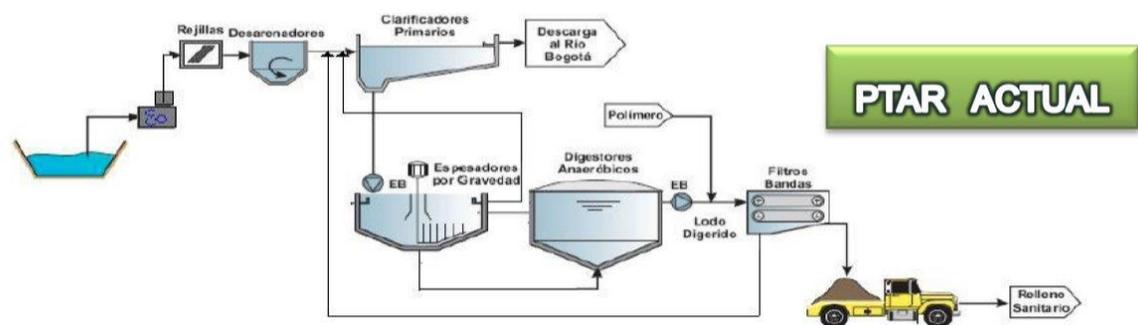
El agua proveniente del cribado es elevada hasta 9m por medio de los tornillos de Arquímedes.

Luego se dirige a cribado fino donde es llevada a un sistema de rejillas que se encarga de retener basuras más pequeñas.

En el proceso de cribado fino y grueso se retiran aproximadamente 60 toneladas de residuos mensuales.

Continúa hacia la extracción de grasas y arenas donde una vez libre de basuras el agua residual pasa de 7 a 12 minutos por un proceso de extracción de arenas y grasas en tres canales. Para ello se inyecta aire de tal manera que la grasa flote y la arena caiga al fondo.

Imagen 9. Proceso actual de la PTAR del salitre.⁵⁵



Fuente: PTAR El Salitre. Medios de difusión virtuales oficiales. (en línea) disponible en: <https://twitter.com/PTAREISalitre/status/854104427002769409> (citado el 10 de noviembre de 2019)

También se hace uso de algunos químicos para aglomerar otros residuos que no pudieron ser eliminados o retirados en los anteriores procedimientos y que por su peso tardarían mucho tiempo en sedimentarse por sí solos. La función de los químicos es acelerar el proceso de sedimentación.

Las basuras, aceites y grasas son llevadas a contenedores para su tratamiento ambiental posterior. Para garantizar un manejo adecuado de cada etapa del proceso la PTAR cuenta con un laboratorio con el cual busca tener un eficiente control de calidad del agua tratada en ella.

Continúa el proceso en los sedimentadores (8 tanques), ver **Imagen 10**, en ellos el agua permanece cerca de tres horas y media para que las partículas que aún flotan

⁵⁵ Twitter oficial PTAR EL SALITRE (en línea) <https://twitter.com/PTAREISalitre/status/854104427002769409> (citado el 10 de noviembre de 2019)

en el agua se asientan o sedimentan mediante el proceso de floculación que se da por la adición de los químicos al agua que aglomeran las partículas en suspensión formando en el fondo de los sedimentadores un lodo que contiene gran cantidad de materia orgánica, bacterias y parásitos pocos recomendables para el medio ambiente y la salud humana si se llevasen directamente a los ríos sin realizarles ningún tratamiento. Esta agua tratada más amigable ambientalmente continúa su recorrido hasta el río Bogotá.

Los lodos resultantes de los sedimentadores llegan a los espesadores (2 tanques), en ellos se trata de retirar la mayor cantidad de agua posible para que el lodo este más concentrado, el agua retirada de este proceso vuelve a ser tratada en la misma planta.

Imagen 10. Formación de lodos por sedimentación⁵⁶



Fuente: Imagen tomada del vídeo PTAR SALITRE ¿Cómo funciona la planta? (en línea). Disponible en internet. <https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg> [tomada el 10 de agosto del 2019]

Luego de que los lodos han sido espesados pasan a los digestores como se ve en la **Imagen 11** (3 tanques, 11000 m³ al día), donde permanecen de 17 a 22 días a una temperatura de 35° C donde se produce un proceso de digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) con ello se busca reducir los parásitos y material infección contenido en los lodos

⁵⁶ Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 24 de mayo de 2017. PTAR Salitre ¿Cómo funciona?. <<https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg>>

Imagen 11. Proceso de digestión de lodos⁵⁷



Fuente: imagen tomada del vídeo PTAR SALITRE ¿Cómo funciona la planta? (en línea). Disponible en internet.

<https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg> [tomada el 10 de agosto del 2019]

El Gas metano, dióxido de carbono y agua son productos de los procesos biológicos que se producen en los digestores, una parte de estos gases es usada en el calentamiento a 35°C de los lodos.

El restante producto del calentamiento de los lodos para reducir la contaminación del aire se lleva a un Gasómetro donde se queman estos gases.

Los lodos provenientes de los digestores se dirigen a un proceso de deshidratación de lodos en los cuales son tratados finalmente por un sistema de filtros donde son deshidratados extrayéndoles el agua que aún puedan tener.

El agua resultante de cada proceso vuelve a la cabeza del proceso para ser tratada.

El resultado del proceso de tratamiento de sólidos son los biosólidos el cual es prácticamente abono orgánico y actualmente este biosólido es utilizado en proyectos de revitalización y restauración de suelos, se extraen aproximadamente 4950 toneladas mensualmente, con ello se reduce la llegada de lodos al río Bogotá en aproximadamente 59400 toneladas al año equivalente a lo que pueden transportar 10102 volqueta. En la **Imagen 12** es posible ver la disposición final de los biósólidos.

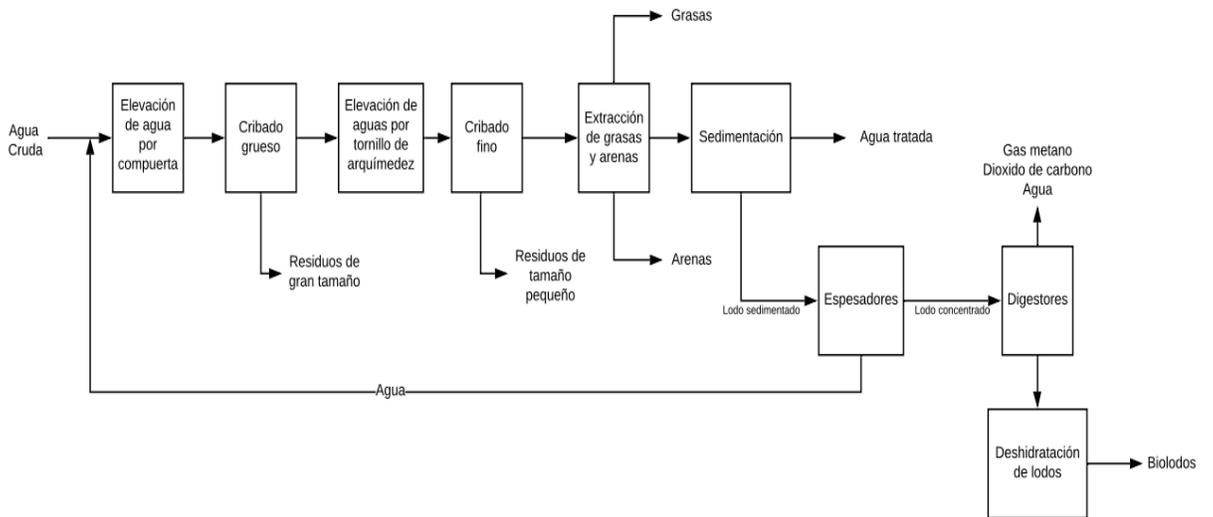
⁵⁷ Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 24 de mayo de 2017. PTAR Salitre ¿Cómo funciona?. <<https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg>>

Imagen 12. Disposición final de biosólidos



Fuente: elaboración propia

Diagrama 2. Esquema general de tratamientos de aguas residuales de la PTAR del salitre.

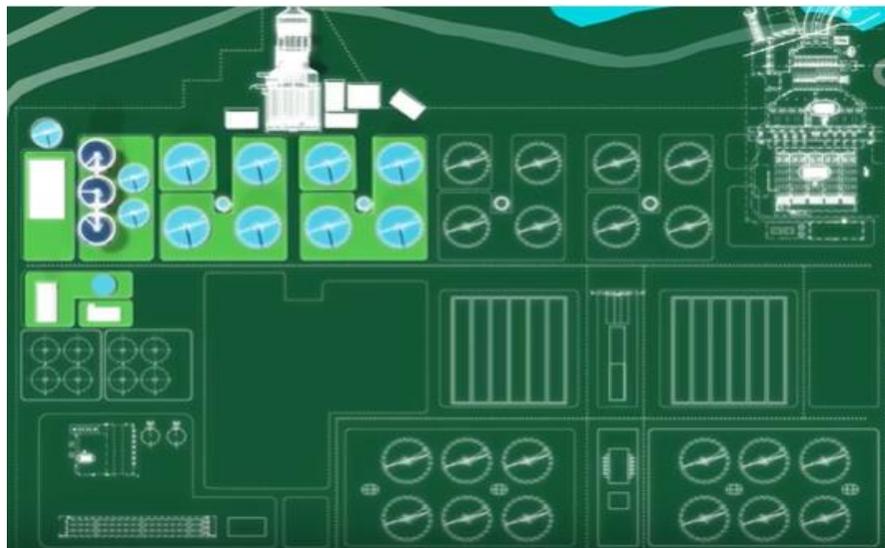


Fuente: elaboración propia

1.8.5 Ampliación. La PTAR del Salitre cuenta actualmente con un proceso de implementación que será la fase 2 y es mostrado en la **Imagen 13**, que hace parte del plan de saneamiento del río Bogotá y la recuperación de este para el tratamiento de aguas residuales con ello se busca un agua que pueda utilizarse en actividades como la agricultura e impedirá que un promedio de 450 toneladas mensuales de basuras llegue al río, con esta implementación aumentara los tiempos de retención de las aguas consecuente a esto habrá mayor decaimiento radiactivo de este radioisótopo generando una disminución de la concentración de actividad de ^{131}I en las salidas.

En la siguiente imagen se muestra la ampliación que tendrá la PTAR del Salitre, donde la parte en verde claro es proceso que actualmente tienen las aguas residuales conocido como tratamiento primario, la parte de color verde oscuro es la implementación de la PTAR del Salitre que se conoce como tratamiento secundario y con la que se busca que las aguas provenientes de este proceso se puedan utilizar, uno de los usos contemplados es la agricultura.

Imagen 13. Ampliación de la PTAR del salitre.⁵⁸



Fuente: Imagen tomada del vídeo PTAR SALITRE ¿Cómo funciona la planta (en línea). Disponible en internet. <https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg> [tomada el 10 de agosto del 2019]

⁵⁸ Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 24 de mayo de 2017. PTAR Salitre ¿Cómo funciona?. <<https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg>>

2. COMPORTAMIENTO DEL ¹³¹I EN LA PTAR DEL SALITRE

Debido a que los resultados de esta investigación pueden generar potencialmente un impacto a nivel económico, social y ambiental, en este capítulo se describen las actividades realizadas y las consideraciones tenidas en cuenta para que se obtengan resultados correctos y con alta confiabilidad, por ello se utilizaron las mejores prácticas de laboratorio y se tuvieron en cuenta los procedimientos y protocolos óptimos para el desarrollo de este trabajo ya que de estos dependen directamente los resultados de las mediciones, con las cuales se justificarán cualquier medida de control regulatorio a tomar de ser el caso.

De forma complementaria a lo mencionado anteriormente los inconvenientes de una gran cantidad de investigaciones están fuertemente ligados a las prácticas de laboratorio, estándares de medición⁵⁹ entre otros factores. Para evitar esto, entre los estándares de medición implementados está el estándar de práctica con el cual se garantiza que los procedimientos realizados fueron correctos y el estándar de referencia de materiales con el cual se garantiza las características esenciales como composición, pureza y concentración de las sustancias utilizadas en el proceso de calibración de los dispositivos de medición.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Antes de realizar una descripción de los equipos de espectrometría utilizados se explicará que es el efecto fotoeléctrico puesto que es un mecanismo de interacción de la radiación con los detectores.

El efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones que se da cuando una partícula de luz (fotón) que lleva cierto valor de energía suficiente, colisiona con la superficie de un material.

El ¹³¹I es un radionúclido con periodo de semidesintegración de 8,02 días y es emisor beta y gamma. Las energías de emisión gamma características se muestran en la Tabla 5, el fotópico de 364 keV se seleccionó para realizar la cuantificación de la actividad debido a su alto rendimiento gamma.

⁵⁹ Estándartes de medición. DIEC (en línea)

http://lcr.uns.edu.ar/electronica/Introducc_electr/Clases/Diana/Clase%203.pdf (citado el 10 de agosto de 2019)

Tabla 5. Fotones gamma característicos del ¹³¹I

Energía [keV]	Rendimiento gamma
80,1850	0,02607
284,305	0,0606
364,489	0,812
636,989	0,0726
722,911	0,0196

Fuente: MOSOS, F. ABADÍA, A. GómezJ.W. y Casallas, P. Montaje para la determinación in situ por espectrometría gamma de descargas líquidas de ¹³¹I en servicios de terapia. Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares. Servicio Geológico Colombiano. Edición, octubre de 2017.

2.1.1 Espectrómetro de radiación gamma y de alta resolución con detector de germanio hiper puro HPGe.

2.1.1.1 Canberra DET01. Este equipo se utilizó para la lectura de la mayor parte de las muestras por su alta eficiencia está ubicado en el laboratorio Radiometría Ambiental del SGC, a continuación, se presentan las especificaciones del equipo de espectrometría DET01 (**Tabla 6**) y en la **Imagen 14** se muestra el equipo de espectrometría DET01.

Tabla 6. Especificaciones del equipo de espectrometría DET01.

Característica	Sistema CANBERRA
Tipo de Detector	Detector coaxial semiconductor de GeHP, tipo P
Eficiencia Relativa (%)	70%
Resolución en fotopico de 1.3 MeV	< 2.0
Rango de energía útil	0.04 – 2.7 MeV

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Dirección de Asuntos Nucleares.

Imagen 14. Detector HPGE CANBERRA INDUSTRIES



Fuente: elaboración propia

2.1.1.2 Canberra GL0515. El equipo usado en la calibración de la cápsula de ^{131}I es un sistema portátil de espectrometría gamma de alta resolución con detector de germanio hiperpuro (GeHp) que tiene una eficiencia relativa del 10% a la energía de 1,33 MeV. En la **Tabla 7** se presentan las principales especificaciones del equipo, y en la **Imagen 15** es presentado el equipo.

Tabla 7. Especificaciones del sistema de espectrometría portátil GL0515.

Especificación	Valor
Marca	Canberra
Modelo del detector	GL0515
Multicanal	MCA-527
Dimensiones del detector	Área: 500 mm ² Espesor: 15 mm
Autonomía del criostato	22 h
Intervalo energético	> 5 keV
Resolución para 122 keV	0,55 keV

Fuente: Dirección de Asuntos Nucleares. Servicio Geológico Colombiano

Imagen 15. Espectrómetro portátil GL0515



Fuente: elaboración propia

2.1.1.3 ORTEC LRA01. El análisis de muestras con geometría filtro y una cantidad muy pequeña de muestras de geometría tres fue llevado a cabo en el espectrómetro HPGe ORTEC LRA01 de radiación gamma y rayos X ubicado en el laboratorio de Radiometría Ambiental del Servicio Geológico Colombiano, para detectar emisores gamma de los isotopos radiactivos, sus especificaciones técnicas son expuestas en la **Tabla 8**. Este detector consta de un blindaje de plomo y un enfriamiento criogénico de nitrógeno líquido (**Imagen 17**) que es necesario para soportar varias geometrías de conteo, entre sus características más importantes están la identificación de más de 100 radionúclidos simultáneamente, métodos precisos de espectrometría gamma, tiene un umbral bajo para su detección, determina e identifica la actividad de los radionúclidos, puede emplearse para diferentes muestras como rocas, lodos, suelos, aire, agua, minerales, entre otros⁶⁰, como se muestra en la **Imagen 16**.

⁶⁰ ESPECTRÓMETRO HPGe CON ESCUDO DE PLOMO, [en línea] <

<http://bsi.lv/en/products/hpge-detectors-spectrometers/hpge-spectrometer-lead-shield/> > [citado el 11 de octubre de 2017]

**Imagen 16. Blindaje de plomo
(Dewars y criostatos)**



Fuente: Lizeth Andrea Ospina Perdigón.⁶¹

⁶¹ OSPINA PERDIGÓN, Lizeth Andrea. Propuesta para la determinación del radio de incidencia del 131i a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá. Tesis de grado Ingeniero Químico. Bogotá. Fundación Universidad de América. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Química. 2018

Imagen 17. Enfriador criogénico (Dewars y criostatos)⁶²



Fuente: ORTEC (en línea)
[https://www.ortec-online.com/products/product-index-by-model?rid=5093D81C-B1A4-4CA6-80BB-A13B846759B4&bu=High%20Purity%20Germanium%20\(HPGe\)%20Radiation%20Detectors](https://www.ortec-online.com/products/product-index-by-model?rid=5093D81C-B1A4-4CA6-80BB-A13B846759B4&bu=High%20Purity%20Germanium%20(HPGe)%20Radiation%20Detectors)

Tabla 8. Especificaciones del espectrómetro LRA01

Característica	Sistema ORTEC
Tipo de Detector	Detector coaxial semiconductor de GeHP, tipo P
Eficiencia Relativa (%)	30%
Resolución en fotopico de 1.3 MeV	< 2.0
Rango de energía útil	0.04 – 2.7 MeV

Fuente: Paper concentración de ¹³¹I en el río Bogotá. Servicio Geológico Colombiano

⁶² ORTEC [en línea] [https://www.ortec-online.com/products/product-index-by-model?rid=5093D81C-B1A4-4CA6-80BB-A13B846759B4&bu=High%20Purity%20Germanium%20\(HPGe\)%20Radiation%20Detectors](https://www.ortec-online.com/products/product-index-by-model?rid=5093D81C-B1A4-4CA6-80BB-A13B846759B4&bu=High%20Purity%20Germanium%20(HPGe)%20Radiation%20Detectors) [citado el 10 de agosto de 2019]

2.1.2 Espectrómetro CANBERRA con detector de yoduro de sodio. Este espectrómetro se utilizó para verificar los resultados de las lecturas de las muestras leídas en el DET01, está ubicado en la planta gamma del Servicio Geológico Colombiano, como se ve en la **Imagen 18**. El espectrómetro de yoduro de sodio utiliza su material centellador dopado con talio NaI (TI). En este la energía de los fotones incidentes se invierte en producir cierta cantidad de fotones ópticos, cuyo número es proporcional a la energía del fotón incidente. Luego estos fotones ópticos inciden en el fotomultiplicador, el cual a la salida entrega una señal de tensión medible en función de la energía del fotón captado por el centellador.⁶³

Imagen 18. Espectro con detector de yoduro de sodio.⁶⁴



Fuente: elaboración propia

2.2 PLAN DE MUESTREO

Con el fin de analizar el comportamiento del ^{131}I en la planta de tratamiento de aguas del Salitre se realizó un plan de muestreo capaz de brindar resultados representativos y confiables.

⁶³ Espectroscopía de rayos gamma: Caracterización del Centellador NaI(Tl) de Harshaw [en línea] http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/G3nuclear.pdf [citado el 15 de noviembre de 2019]

⁶⁴ Canberra [en línea] Detectores de centelleo < <https://www.directindustry.es/prod/canberra-industries/product-23661-1625959.html> > [citado el 15 de noviembre de 2019]

Basados en el conocimiento de que los tratamientos de radioterapia usando ^{131}I inician habitualmente los días lunes, se hizo el planteamiento de realizar el muestreo en tres fases que permitieran analizar la evolución durante la semana y durante las horas del día respecto al comportamiento de la concentración en la planta y sí de igual manera responde a los protocolos de tratamientos de los pacientes, para así en la última fase desarrollar el estudio del balance de masa de ^{131}I en el periodo de tiempo de mayor actividad. Se escogió el valor de 9 semanas como el tiempo total de muestreo.

Este plan de muestreo se ajustó a las limitaciones de tiempos de análisis de muestras en el Servicio Geológico Colombiano y de igual manera a los horarios disponibles para muestreo de la PTAR salitre.

2.2.1 Fase 1. Evolución en la semana. La fase 1 se diseñó con el fin de evidenciar sí el comportamiento de la actividad de ^{131}I en el agua cruda variaba a lo largo de los días de la semana. En la **Tabla 9** se evidencia el plan de muestreo que se llevó acabo en la primera fase.

Tabla 9. Plan de muestreo semana

EVOLUCIÓN EN SEMANA					
Este muestreo se realizó por tres semanas dando así un número total de 360 muestras.					
Año	Fecha aproximada		Hora	Muestra	Número de muestras
	Mes	Día			
2019	Julio				
2019	Julio				
2019	Julio				
2019	Julio	15 al 19	Comenzando con la primera toma a las 12:00 a.m. con intervalos de una hora siendo la última toma a las 11:00 p.m.	Agua cruda	24
2019	Julio				
2019	Julio				
2019	Julio				
2019	Julio				

Fuente: elaboración propia.

Se realiza de la misma manera para las siguientes dos semanas, del 22 al 26 de julio del 2019 y del 29 de julio al 2 de agosto del 2019.

2.2.2 Fase 2. Evolución en el día. La fase 2 corresponde a la evolución o mejor a la variación de la actividad durante las horas del día y es presentado en la **Tabla 10**. Este muestreo se realizó en el agua cruda y sólo se hizo durante el día de la semana que presentó mayores valores y mejor reproducibilidad en la fase I. Se formula en periodos de hora determinados que permitan evidenciar sí el avance en las horas del día influyen en el cambio de la actividad de ^{131}I , el día escogido fue el jueves ya que hubo una concentración de actividad alta comparada con el comportamiento del día y los datos fueron más homogéneos.

Tabla 10. Plan de muestreo día

EVOLUCIÓN EN EL DÍA					
Este muestreo se realizó por duplicado dando así un número total de muestras de 10.					
Año	Fecha aproximada		Hora	Operación para la toma de muestra	Número de muestras
	Mes	Día			
2019	Agosto	Jueves 15 y 22	8:00 a. m.	Agua cruda	1
2019	Agosto	Jueves 15 y 22	10:00 a. m.	Agua cruda	1
2019	Agosto	Jueves 15 y 22	12:00 a. m.	Agua cruda	1
2019	Agosto	Jueves 15 y 22	2:00 p. m.	Agua cruda	1
2019	Agosto	Jueves 15 y 22	4:00 p. m.	Agua cruda	1

Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Fase 3. Balance de Masa. Con la finalidad de realizar el diagnóstico del comportamiento del ^{131}I en la PTAR del salitre y su respuesta a las diferentes operaciones a las que se ve sometido el agua durante el proceso en la planta se estructura la fase 3 del muestreo, su inicio es posterior al análisis del comportamiento en la entrada a la PTAR del salitre según el día y la hora de mayor actividad, es decir posterior al análisis del agua cruda llevado a cabo durante las fases 1 y 2. Para el desarrollo de este plan de muestreo se hizo necesario tener en cuenta el tiempo de retención que tiene el agua en cada proceso y operación de la PTAR, de igual forma se seleccionaron las salidas significativas del proceso (ver **diagrama 10**) para así cerrar el balance de masa de manera coherente. La hora de muestreo seleccionada del agua cruda, como primera muestra a tomar en el día del muestreo responderá a la hora evidenciada con mayor actividad durante la fase 2 del muestreo.

En la **Tabla 11** se presenta el plan de muestreo para la fase 3.

Tabla 11. Plan de muestreo para balance.

BALANCE					
Año	Fecha aproximada		Hora	Operación para la toma de muestra	Número de muestras
	Mes	Día			
2019	8	Jueves 29	Las muestras se toman simultáneamente o según indiquen los tiempos de residencia del agua, para que las tomas sean colaterales a la muestra de agua tomada inicialmente. La hora se estipula con los resultados que se obtenga en el muestreo de Evolución en semana y en el día.	Agua cruda	1
	9	Jueves 5			
	9	Jueves 12			
2019	8	Jueves 29		Grasas	1
	9	Jueves 5			
	9	Jueves 12			
2019	8	Jueves 29		Arenas	1
	9	Jueves 5			
	9	Jueves 12			
2019	8	Jueves 29		Lodos primarios	1
	9	Jueves 5			
	9	Jueves 12			
2019	8	Jueves 29		Aguas Tratadas	1
	9	Jueves 5			
	9	Jueves 12			

Fuente: elaboración propia.

Esta tercera y última etapa de muestreo se realizó en el siguiente intervalo de fechas específicamente, escogidos por en base a los resultados obtenidos en las fases anteriores, en el día y hora que la actividad sea alta y los datos sean más homogéneos:

- Semana del 26 al 30 de agosto de 2019.
- Semana del 2 al 6 de septiembre de 2019.
- Semana del 9 al 13 de septiembre de 2019.

2.3 PROTOCOLOS

2.3.1 Protocolo de Muestreo para Evolución en Semana y Evolución en Día.

Se resalta que, para mejorar los resultados en la toma de las muestras, el Servicio Geológico Colombiano brindó una capacitación desarrollada por la Policía Nacional de Colombia evidenciada en la **Imagen 19**, donde se abarcaron los siguientes temas:

Parte A:

- Tipos de situaciones
- Tipos de muestras

- Tipos de amenazas

Parte B

- Recolección- Equipamiento
- Procedimiento estándar

Imagen 19. Curso de muestreo desarrollado por la Policía Nacional de Colombia.



Fuente: elaboración propia.

2.3.1.1 Identificación del sitio de toma de la muestra. La recolección de la muestra se hace en la salida del cribado fino esta agua es denominada agua cruda y su ubicación es presentada en la **Imagen 20.**

Imagen 20. Ubicación de toma de muestra de agua cruda dentro de la PTAR del Salitre.



Fuente: Google Maps. Información geoespacial de la muestra: 4.738524,-74.122017

2.3.1.2 Procedimiento.

1. Para que los resultados sean representativos se toman muestras puntuales del agua cruda cada hora (**Imagen 21**), ésta que se van mezclando durante el día formando así una mezcla compuesta.

Imagen 21. Punto de muestreo de agua cruda.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 22. Muestra compuesta de agua cruda



Fuente: elaboración propia.

2. Con la mezcla compuesta del día (**Imagen 22**) se procedió a agitarla y luego se tomó una alícuota de un poco más 100 ml en una probeta, el excedente de los 100 ml se hizo para que al final se pudiera asegurar tener los 100 ml exactos de volumen ya que, en medio del proceso de trasvasado, filtración y acidificación puede haber pérdidas de volumen.

3. Esta alícuota tomada de la muestra compuesta se le hizo una filtración al vacío (**Imagen 23**) para remover cualquier partícula presente en el agua.

Imagen 23. Montaje de la filtración al vacío.



Fuente: elaboración propia.

El filtro que se utilizó para la filtración al vacío, se puede ver en la **Imagen 24** fue:

- Filtro de microfibras de vidrio.
Especificaciones: Diámetro 47 mm
Cat No. 1827 047

Imagen 24. Filtro de microfibras de vidrio.



Fuente: elaboración propia.

4. Después de haber retirado las partículas, se pasó la muestra a un beacker para posteriormente realizar la acidificación de la muestra (**Imagen 26**).

Imagen 25. Beacker con muestra compuesta de agua cruda filtrada.



Fuente: elaboración propia.

5. Se procedió a la acidificación de la muestra para evitar la proliferación de microorganismos con:

- Plancha de agitación
- Potenciómetro
- Barra agitadora o magnetizador
- Electrodo
- Ácido clorhídrico concentrado 30%

Imagen 26. Montaje para realizar la acidificación.



Fuente: elaboración propia.

6. Estando la muestra acidificada hasta un pH de 2 se procedió a medir los 100 ml de la muestra, **Imagen 27**, en la probeta para confirmar que el volumen al envasar la muestra sea el correcto.

Imagen 27. Muestra compuesta de agua cruda acidificada.



Fuente: elaboración propia.

7. Confirmado el volumen se procedió a envasar la muestra con su respectivo rótulo, bolsa resellable y teniendo en cuenta que el método de estabilización de muestras radiactivas es similar a la de las muestras convencionales de agua, se

mantuvo a una temperatura de 1 a 5 °C desde su toma hasta la recepción en el laboratorio, este montaje es presentado en la **Imagen 28**.

Imagen 28. Montaje para transporte de muestra.



Fuente: elaboración propia.

2.3.2 Protocolo de Muestreo del balance de masa. Se escogieron cinco puntos claves para la elaboración del balance de masa (entradas y salidas principales del proceso) los cuales fueron agua cruda, salidas de grasas y arenas, lodos primarios y aguas tratadas y se hizo la recolección de las muestras, como se muestra en la **Imagen 29**:

Imagen 29. Muestras recolectadas para el balance de masa.



Fuente: elaboración propia.

Luego de la recolección de las muestras , en la cual cabe resaltar que se tuvieron en cuenta los tiempos de retención para cada operación siendo calculados pos el sistema automatico de la planta y así las muestras tomadas en las salidas tuvieran correlación con la muestra de entrada (agua cruda), se hizo el mismo protocolo de muestreo realizado para la evolución de semana y día para las muestras de agua cruda y agua tratada, las muestras tomadas de grasas, arenas y lodos primarios se llevaron en envases de vidrio y asegurando la cadena de frio adecuada, como se

observa en la **Imagen 30** y en la **Imagen 31** para el transporte de muestras radiactivas hasta llegar al SGC donde se procedió a realizar los procesos de análisis espectrométricos correspondientes a este tipo de muestras.

Imagen 30. Muestras puntuales listas para traslado al SGC para su lectura y/o procedimiento a realizar.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 31. Muestras del balance de masa en nevera para transporte.



Fuente: elaboración propia.

2.3.3 Protocolo para identificación de muestra. Al llegar la muestra al Servicio Geológico Colombiano se siguió el siguiente protocolo para asegurar la veracidad de los resultados y evitar también posibles contaminaciones de los equipos de espectrometría.

Nota: Previo al envasado de las muestras los envases fueron pesados.

Para las muestras de lodos primarios, grasas y arenas que no venían preparadas en la geometría estándar, se les hizo primero un filtrado para separar cualquier sólido, obteniéndose dos lecturas para una misma corriente, una la parte sólida de la corriente y la otra la parte líquida.

El primer día de cada semana de muestreo se calibró la balanza para garantizar la exactitud en los resultados (**Imagen 32**).

Imagen 32. Kit de calibración de pesa.



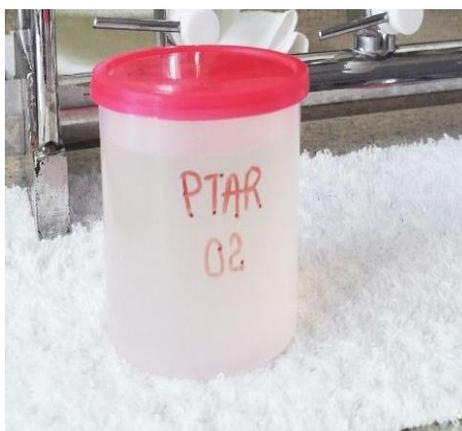
Fuente: elaboración propia.

Luego de estar la balanza calibrada se procedió a sacar la muestra y luego se colocó sobre un papel adsorbente donde se verificó que no hubiese fugas, de haberse presentado alguna fuga se hace necesario secar el envase muy bien y cambiar la bolsa resellable para no contaminar el equipo.

Asegurando que el envase se encuentra limpio, se cortó un pedazo de papel tipo vinipel que se colocó sobre la balanza y luego se taró, nuevamente con el fin de evitar la contaminación de los equipos.

Se llevó la muestra sin bolsa resellable a la balanza y se tomó el dato del envase más la muestra de agua cruda.

Imagen 33. Muestra lista para pesado.

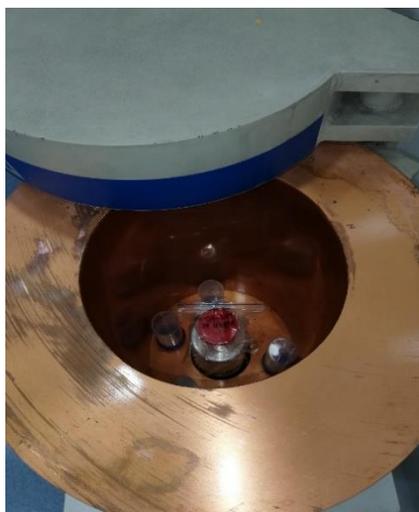


Fuente: elaboración propia.

Con precaución se colocó la muestra nuevamente en la bolsa resellable sin contaminar la parte externa de la bolsa, con el fin de no contaminar el detector y por posibles derrames.

Se llevó el pedazo cortado de papel vinipel y se colocó sobre el detector de germanio hiperpuro (**Imagen 34**), cerciorándose de que la zona que tuvo contacto con el envase a la hora de pesado no quede en contacto con el detector. Sobre esta zona se volvió a colocar la muestra.

Imagen 34. Muestra lista para análisis sobre el detector.



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente y con el espectrómetro listo, se hace la lectura en la geometría tres del ^{131}I por un tiempo de 23 horas dejando una hora de holgura para realizar los cambios de muestra en el sistema de lectura.

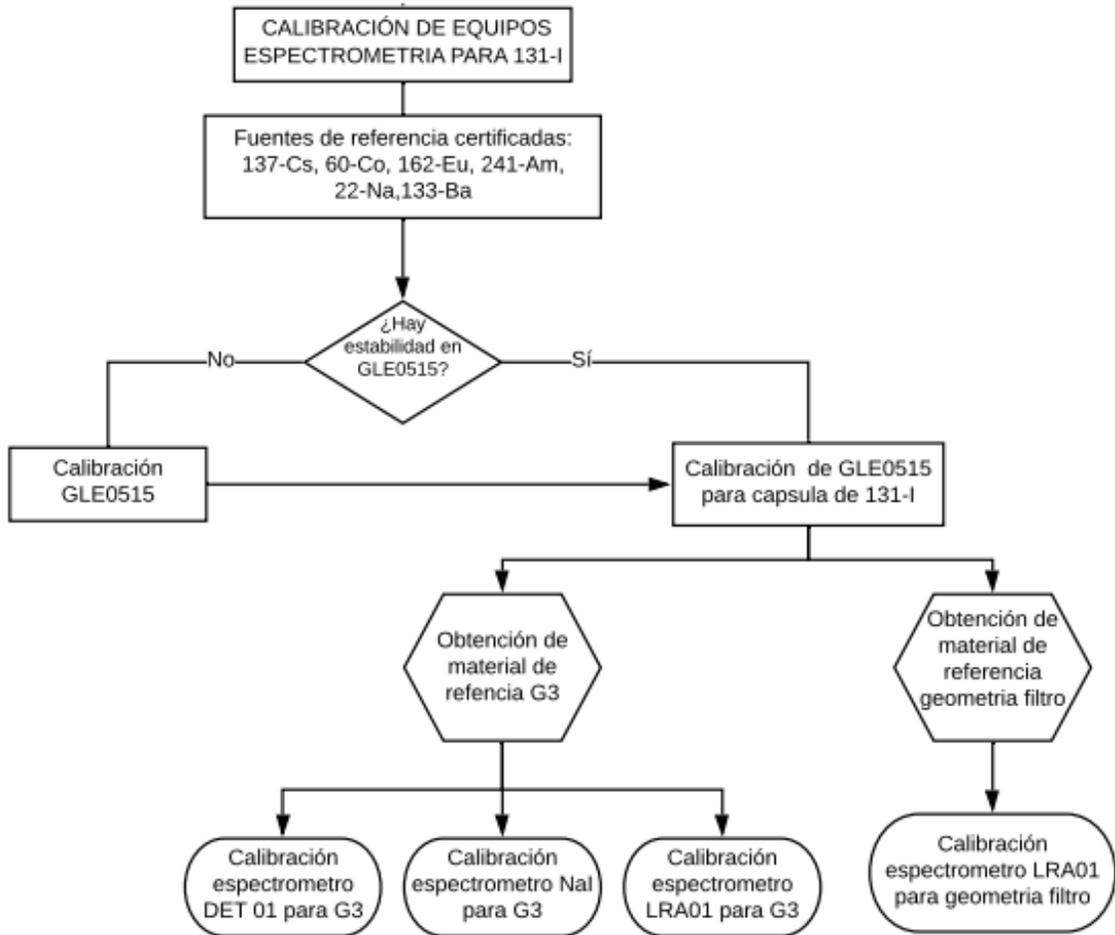
Finalmente, transcurrido este tiempo y a una energía de 364.5 KeV que corresponde al ^{131}I se toman las lecturas de:

- Área neta
- Área gruesa o integral
- Incertidumbre
- Fecha de inicio de lectura
- Hora de inicio de lectura

2.4 CALIBRACIÓN DE EQUIPOS ESPECTROMETRIA PARA ^{131}I

Puesto que se ha convertido en un problema frecuente que la calibración de los instrumentos termine impactando en las investigaciones, y teniendo en cuenta de que las pruebas para la detección de ^{131}I son muy sensibles se hizo necesaria una calibración de cada uno de los equipos y una específica para la geometría de muestra que se estaba usando, siguiendo el flujograma presentado en el **Diagrama** ; esta última para poder determinar la concentración de actividad en la geometría usada y para obtener resultados exactos.

Diagrama 3. Flujograma del proceso de aseguramiento metrológico



Fuente: Elaboración propia

2.4.1 Estabilidad. Para la calibración de un equipo de espectrometría se utilizan fuentes radiactivas que son de tamaño pequeño, cada uno de estos radionúclidos tiene fotones que poseen energías características, su contenido de actividad y la incertidumbre de esa actividad está certificada. Para la calibración del espectrómetro portátil GL0515 se utilizaron las siguientes fuentes puntuales (Imagen 35):

- ^{137}Cs
- ^{60}Co
- ^{152}Eu
- ^{241}Am
- ^{22}Na
- ^{133}Ba

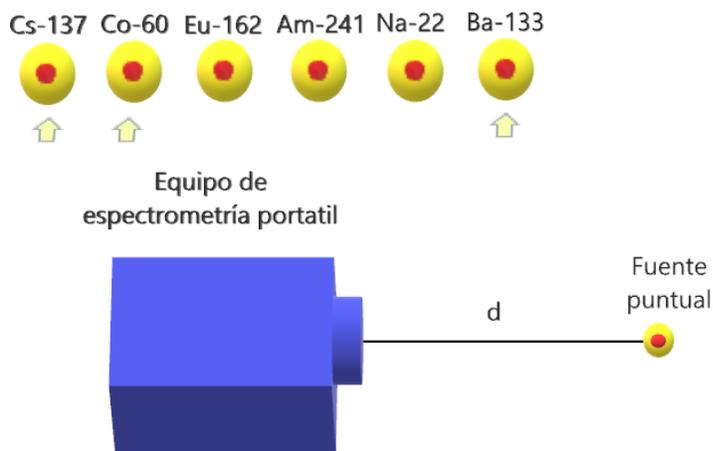
Imagen 35. Almacenaje de fuentes de referencia.



Fuente: elaboración propia.

Con el fin de poder hallar la concentración de ^{131}I en cada uno de los instantes de muestreo se considera importante que los equipos estén calibrados. El equipo GL0515 tiene como función garantizar la trazabilidad metrológica a partir de las fuentes puntuales y permitir la calibración de una fuente de ^{131}I , **Imagen 38**, en geometría de cápsula (solicitada a una radiofarmacia), y sigue el esquema presentado en la **Imagen 36**. Puesto que este equipo ya había sido calibrado anteriormente, para verificar que el equipo este dando buenos resultados se realizan pruebas de estabilidad con algunas de las fuentes puntuales donde se espera tener una desviación inferior al 3%, de no darse los resultados esperados se debe calibrar nuevamente con todas las fuentes puntuales de referencia.

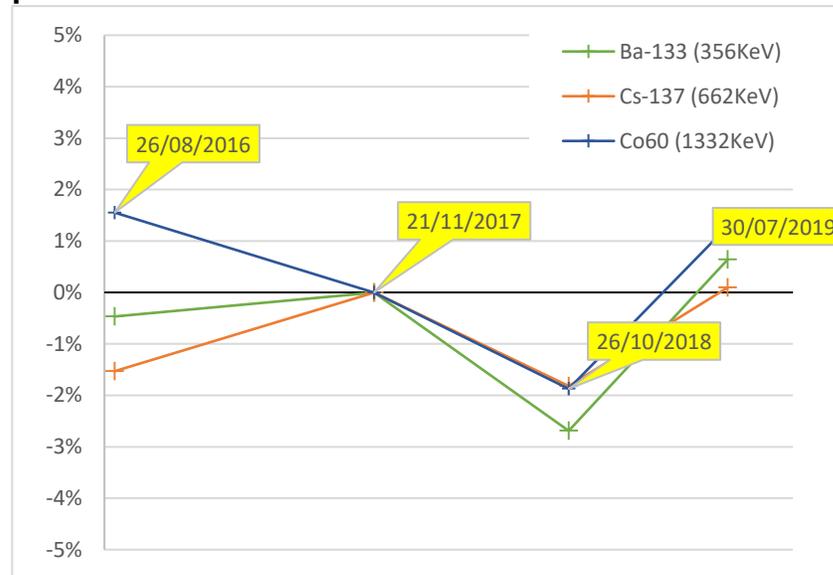
Imagen 36. Esquema para estabilidad de espectrómetro GL0515.



Fuente: elaboración propia.

A una distancia conocida del espectrómetro en este caso 10 cm, se colocaron las fuentes puntuales emisores gamma Cs-137, Ba-133, Co-60 arrojando una serie de resultados que mediante una hoja Excel elaborada por el Servicio Geológico Colombiano se obtuvo el **Diagrama 4** donde se reportan cada una de las pruebas de estabilidad realizadas y las de calibración:

Diagrama 4. Reportes de estabilidad del espectrómetro portátil

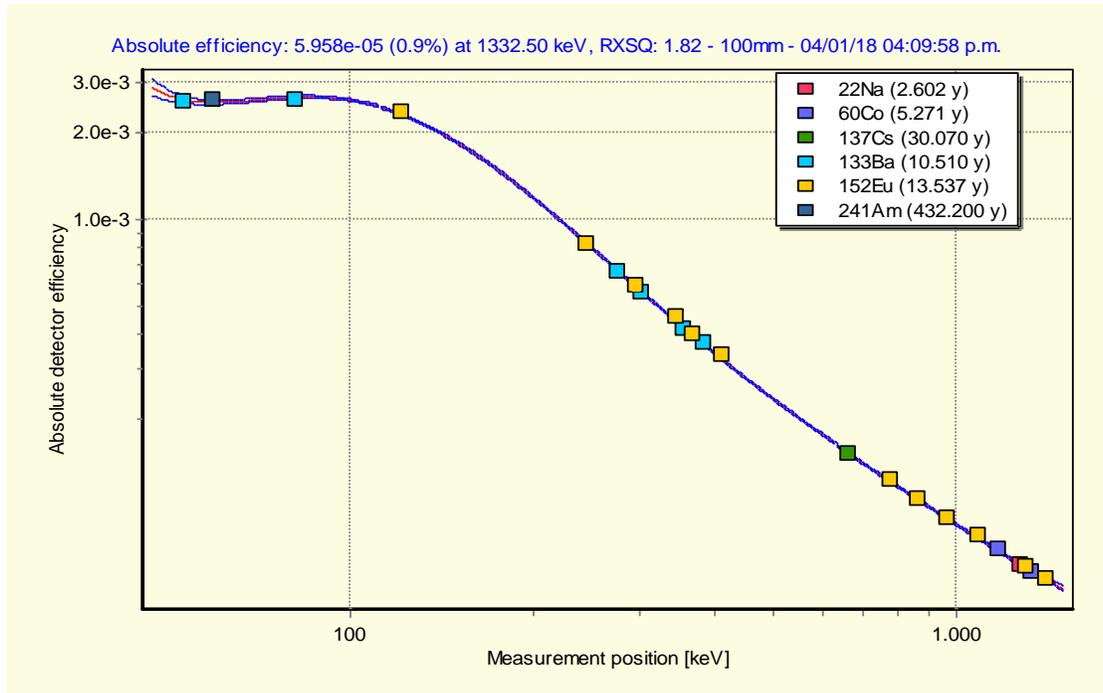


Fuente: Dirección de Asuntos Nucleares. Servicio Geológico Colombiano.

El **Diagrama 4** arrojó resultados de estabilidad aceptables (^{60}Co : 1.28%, ^{137}Cs : 0.09%, ^{133}Ba : 0.67%) siendo todos menores al 3% de desviación, esto permitió trabajar con el equipo sin necesidad de calibrarlo nuevamente ya que había mantenido su estabilidad daría resultados con exactitud.

Luego de verificar la estabilidad del equipo se obtuvo la curva de eficiencia y energía, presentada en el **Diagrama 5**, y generada por el programa Hyperlab:

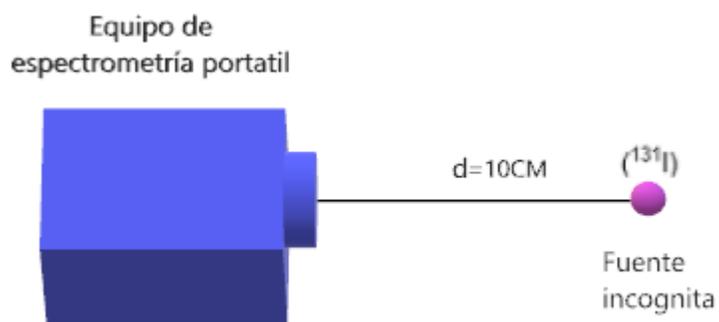
Diagrama 5. Curva de eficiencia y energía



Fuente: elaboración propia.

2.4.2 Calibración de la cápsula de yodo (1MBq). Usando la curva de calibración de eficiencia y energía (**Diagrama 5**) y una fuente incógnita puntual con la misma geometría, se hizo el montaje colocando la fuente incógnita (^{131}I) a la misma distancia (**Imagen 37**).

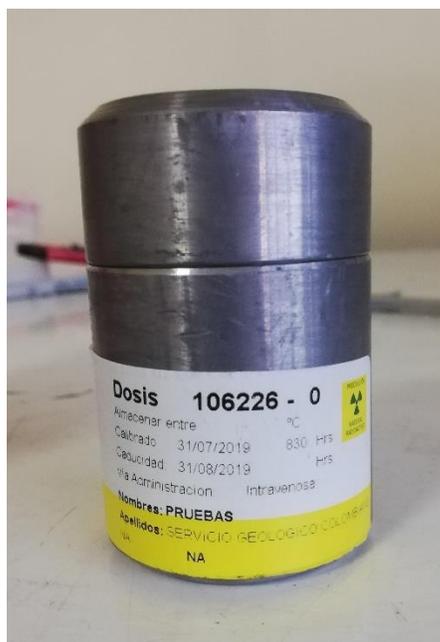
Imagen 37. Esquema para lectura de fuente incógnita puntual



Fuente: elaboración propia.

Para esta calibración la fuente incógnita puntual es ¹³¹I el cual es el radionúclido de interés, se solicitó una cantidad aproximada de 1 MBq y es la cual es una cantidad suficiente para la preparación de las soluciones de referencia.

Imagen 38. Dosis de ¹³¹I



Fuente: elaboración propia.

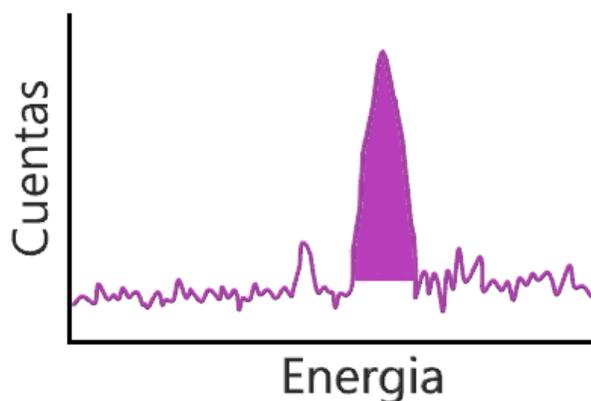
Imagen 39. Espectrómetro portátil detectando ^{131}I .



Fuente: elaboración propia.

Pasados 297 segundos tiempo suficiente para la lectura del espectro de ^{131}I debido al alto contenido de actividad, se obtuvo un espectro gamma expuesto en el **Diagrama 6** donde en el eje de la abscisa se encuentra la energía y en eje de la ordenada las cuentas.

Diagrama 6. Espectro gamma del ^{131}I



Fuente: elaboración propia.

La fuente de ^{131}I genera un fotópico de 364 keV el cual es leído por el GLE0515, este espectrómetro a diferencia de los otros espectrómetros utilizados para la lectura de las muestras, entrega la actividad del radionúclido en el instante de la toma. Sin embargo como este equipo no fue el utilizado para la lectura de las muestras y como se mencionó anteriormente los equipos utilizados no arrojan datos de actividad, se hizo una comparación de los resultados que arroja el equipo de espectrometría portátil y la hoja de cálculos de Excel (hoja utilizada para hallar la actividad de todas la muestras tomadas) utilizando los datos de área neta, integral, tiempo de lectura, hora de lectura, incertidumbre, datos que también arroja el

GLE0515 y que son los datos que se pueden extraer de los espectrómetros DET01, LRA01 y el de NaI. Con estos datos y por medio de la hoja de cálculos de Excel se halló la concentración de actividad de la capsula de ^{131}I a partir de la hoja de cálculos de Excel con lo cual se puede ver en la **Tabla 12** en cuanto difieren los valores de concentración de actividad para caso:

Tabla 12. Resultados de actividad de capsula de ^{131}I

YODO-131 (COL250)			
Equipo Portátil		Formato Excel	
Actividad (KBq)	1032	Actividad (KBq)	1140
incertidumbre	0,60%	Área (Bq)	100177
Fecha	31/07/2019	incertidumbre	0,08
Hora	9:05:12	Fecha	31/07/2019
Live time(s)	297	Hora	9:05:12
Mínimo nivel de detección (KBq)	10,81	Live time(s)	297
		Rendimiento	81,5

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los resultados la disimilitud fue muy pequeña por lo que el uso de la hoja Excel para hallar la concentración de actividad de las muestras se consideró óptimo.

2.4.3 Obtención de solución de referencia para Geometría Tres⁶⁵. Esta preparación (**Imagen 40**) se hace con el fin de obtener una solución con cantidad conocida de ^{131}I en la misma geometría que se realiza el muestreo y de esta manera tener la referencia para comparar con las muestras recolectadas y finalmente calcular la radiactividad de las mismas. Se hizo una dilución a 50 para evitar saturar los equipos de medición y se trabajó mediante una técnica gravimétrica.

⁶⁵ GEOMETRIA TRES (G3): es el nombre que recibe la geometría que será trabajada en este proyecto y su denominación se da por los Criterios de aceptación del laboratorio de espectrometría gamma del SGC.

Imagen 40. Esquema de trazabilidad para componer geometría tres.



Fuente: elaboración propia.

2.4.3.1 Desarrollo de la técnica gravimétrica. Se hizo el correspondiente pesado de los balones aforados como se muestra en la Imagen 41:

Imagen 41. Pesado de balones aforados.



Fuente: elaboración propia.

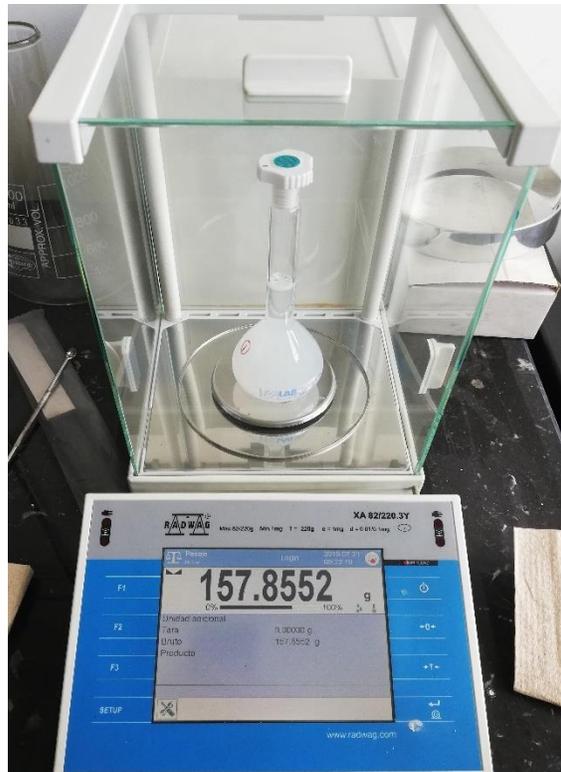
Luego de haberlos pesado se procedió a diluir en el balón aforado N°1, la cápsula de ^{131}I en una solución de ácido clorhídrico y posteriormente a su pesado.

Imagen 42.
Cápsula de ^{131}I en
ácido clorhídrico



Fuente: elaboración propia.

Imagen 43. Pesado de solución de ^{131}I
en ácido clorhídrico



Fuente: elaboración propia.

Teniendo este dato, se procedió a tomar una alícuota de aproximadamente 2 ml y se llevó al balón aforado 2, luego se pesó y se tomó este dato, después de la toma del dato del balón aforado N°2 y la alícuota se llevó hasta un volumen de 100 ml y se pesó nuevamente.

No obstante, se debe tener en cuenta que hay propagación de incertidumbre ya que en el balón aforado 1 se tiene una actividad con una incertidumbre, al transferirlo al balón aforado 2 se genera otra incertidumbre y al transferir a la geometría tres se genera otra incertidumbre por pérdidas volumétricas, sin embargo, por diferencia de pesos se puede corregir esta última fuente de incertidumbre.

2.4.4 Calibración para Geometría filtro. Esta calibración se hace con el fin de poder hallar la concentración de actividad en el filtro que es la geometría que se trabajó para la parte sólida de las muestras de arena, grasas y lodos primarios, no se realizó con 1MBq ya que si se coloca esa cantidad en cualquiera de los sistemas trabajados el sistema se satura por lo cual se hizo una dilución a 50 y se trabajó mediante una técnica gravimétrica.

2.5 RESULTADOS Y ANALISIS

2.5.1 Resultados de material de referencia G3 y calibración de equipos. Finalmente se obtuvieron los datos de calibración, presentados en la **Tabla 13**:

Tabla 13. Datos de calibración ¹³¹I

	Valor	Unidad
m_{B1}	55,47659	g
m_{B2}	53,19845	g
m_{B1+I}	157,8552	g
m_{FB2}	55,53333	g
m_{NB1}	102,37861	g
m_{NB2}	2,33488	g
m_{NP}	0,23759	g
m_{B2+P}	53,43604	g
A	1032	KBq
m_I	2,09729	g

Fuente: elaboración propia.

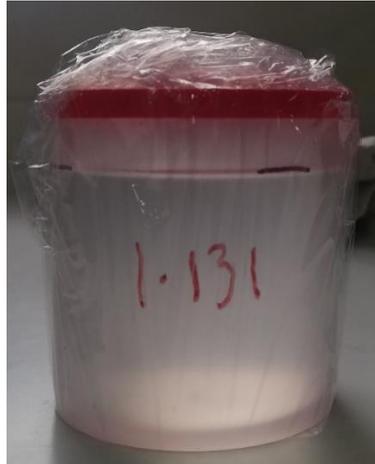
Donde:

m_{NP} = Masa neta de pérdidas

m_{B2+P} = Masa balón aforado 2

m_{NB2} = Masa neta del balón aforado 1
 m_{NB1} = Masa neta del balón aforado 2

Imagen 44. Geometría tres



Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la **Tabla 13** y la actividad conocida de la capsula de ^{131}I se realizan los siguientes cálculos para determinar la actividad de la geometría tres y la eficiencia de esa actividad:

Ecuación 2. Masa neta de pérdidas

$$m_{NP} = m_{B2+P} - m_{B2}$$

$$m_{NP} = 53.43604 - 53.19845$$
$$m_{NP} = 0.23759$$

Ecuación 3. Fracción de pérdidas

$$X = \frac{m_{NP}}{100g}$$

Donde:

X = Fracción de pérdida

$$X = \frac{0.23759}{100g} = 0.0023759$$

Ecuación 4. Actividad de geometría tres

$$A_{G3} = A_0 \left(\frac{m_{NB2}}{m_{NB1}} \right) (1 - X)$$

A_{G3} = Área de la geometría 3

A_0 = Actividad inicial del ^{131}I

m_{NB2} = Masa neta del balón aforado 1

m_{NB1} = Masa neta del balón aforado 2

X = Fracción de pérdida

a = Concentración de actividad

$$A_{G3} = 1032 \left(\frac{2.33488}{102.37861} \right) (1 - 0.0023759)$$

$$A_{G3} = 23480 \text{ Bq}$$

$$a = 23480 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$$

Ecuación 5. Eficiencia

$$e = \frac{\text{cts}}{A_{G3} \gamma t_c f_d}$$

Donde:

cts = Cuentas

A_{G3} = Actividad de geometría tres $\left(Bq = \frac{1 \text{ desintegración}}{s} \right)$

γ = Rendimiento gamma

t_c = Tiempo de lectura (s)

f_d = Factor de desintegración

$$e = \frac{529929}{(23480 \text{ Bq})(0,815)(600s)(0.9788)}$$

$$e = 0.0471538$$

Con la Actividad calculada de la geometría tres (A_{G3}) y la eficiencia, se halló la eficiencia y su incertidumbre del espectrómetro DET01, del espectrómetro con detector de yoduro de sodio y del espectrómetro LRA 01.

Con esta eficiencia y la incertidumbre dada por el programa, se hallaron las

concentraciones de actividad de cada una de las muestras utilizando la eficiencia y la incertidumbre del equipo donde fueron analizadas, presentados en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Resultados de equipos calibrados para G3

Espectrómetro DET01		Espectrómetro con detector de yoduro de sodio		Espectrómetro LRA01	
I +/- de A	741,9006	I +/- de A	2911	I +/- del A	413
Área neta	529929	A neta	222535	Área neta	143493
Integral	536728	Á gruesa	310798	Integral	167266
t de conteo	600	t de conteo	300	t de conteo	54000
Fecha	31-jul	Fecha	31/07/2019	Fecha	20-ago
Hora	14:57:39	Hora	15:20:08	Hora	15:52:33
Eficiencia	0,04720	Eficiencia	0,03970	Eficiencia	0,01202
I +/-	0,00141	I +/-	0,00490	I +/-	0,00034

Fuente: elaboración propia.

2.5.2 Resultados de material de referencia geometría filtro y calibración de equipo. Esta se realizó para las lecturas hechas sobre sólidos filtrados y sus resultados se exponen en la **Tabla 16**.

Ecuación 6. Masa neta de pérdidas

$$m_{NP} = m_{B2+P} - m_{B2}$$

Con:

m_{B2+P} : Masa de balón aforado 2 mas perdidas

m_{B2} : Masa neta del balón aforado 2

$$m_{NP} = 53.43604 - 53.19845$$

$$m_{NP} = 0.23759 \text{ g}$$

Ecuación 7. Actividad geometría filtro.

$$A_{G4} = A_0 \left(\frac{m_{NB3}}{m_{NB1}} \right) (1 - X)$$

A_{G4} = Área de la geometría 4

A_0 = Actividad inicial del ^{131}I (Bq)

m_{NB3} = Masa neta del balón aforado 1

m_{NB1} = Masa neta del balón aforado 2

X= Fracción de pérdida

Tabla 15. Masas para geometría 4

GEOMETRIA 4		
m_{NB1}	102,37861	g
m_{NB3}	3,276	g
m_{NP}	0,23759	g
X	0,0023759	
A_0	1032000	Bq

Fuente: elaboración propia.

$$A_{G4} = 1032000 \left(\frac{3,276}{102,37861} \right) (1 - 0,0023759)$$

$$A_{G4} = 32944,3766 \text{ Bq}$$

$$i_{A_{G4}} = A_{G4} * i_{B1}$$

Con:

$i_{A_{G4}}$: incertidumbre de la actividad de la geometria filtro

i_{B1} : Incertidumbre del balón aforado 1

$$i = 32944,3766 * 0,0286$$

$$i = 942.20917$$

Tabla 16. Resultados de equipo calibrado para geometría filtro

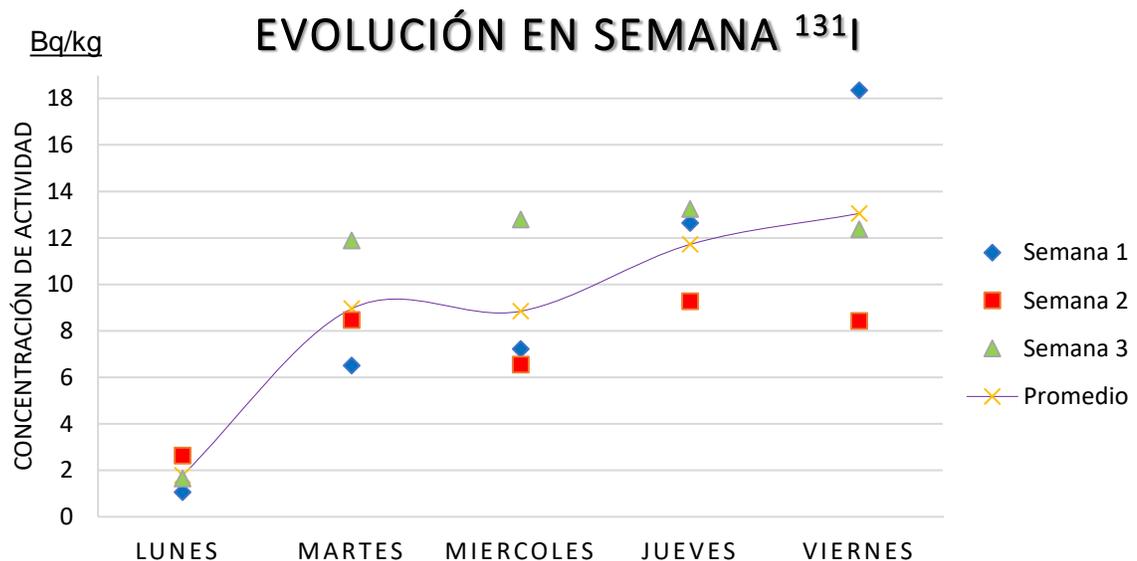
Espectrómetro LRA01	
Eficiencia	1,82E-02
l+/-	4,51E-04

Fuente: elaboración propia.

2.5.3 Evolución en el día del ¹³¹I. Con el fin de conocer el comportamiento del ¹³¹I dentro de la PTAR del salitre se hizo un primer estudio buscando entender que tan variable eran las concentraciones de este radioisótopo en los días de la semana.

Los resultados de las 3 semanas de muestreo sobre la evolución de ^{131}I durante la semana se evidencian en la **Gráfica 1** donde se reportan en el eje de las ordenadas los datos de concentraciones de actividad de un radionúclido (^{131}I) que se deben informar en unidades de becquerels por kilogramo (Bq / kg) o becquerels por litro (Bq / L) como lo indica la norma y en el eje de las abscisas se reportan los días de la semana en que fueron tomadas, se realizó de la misma manera para las semanas 15 al 19 de agosto de 2019, del 22 al 26 de julio del 2019 y del 29 de julio al 2 de agosto del 2019. Resultado de esto fue que en todas las muestras recolectadas se encontró presencia de ^{131}I , evidenciando que la concentración de actividad de ^{131}I aumenta significativamente a lo largo de los días de la semana teniendo los picos más altos los jueves y viernes. Como los datos de concentración de actividad menos dispersos y altos fueron el jueves, se escogió este día para la siguiente etapa del muestreo correspondiente a la evolución en día.

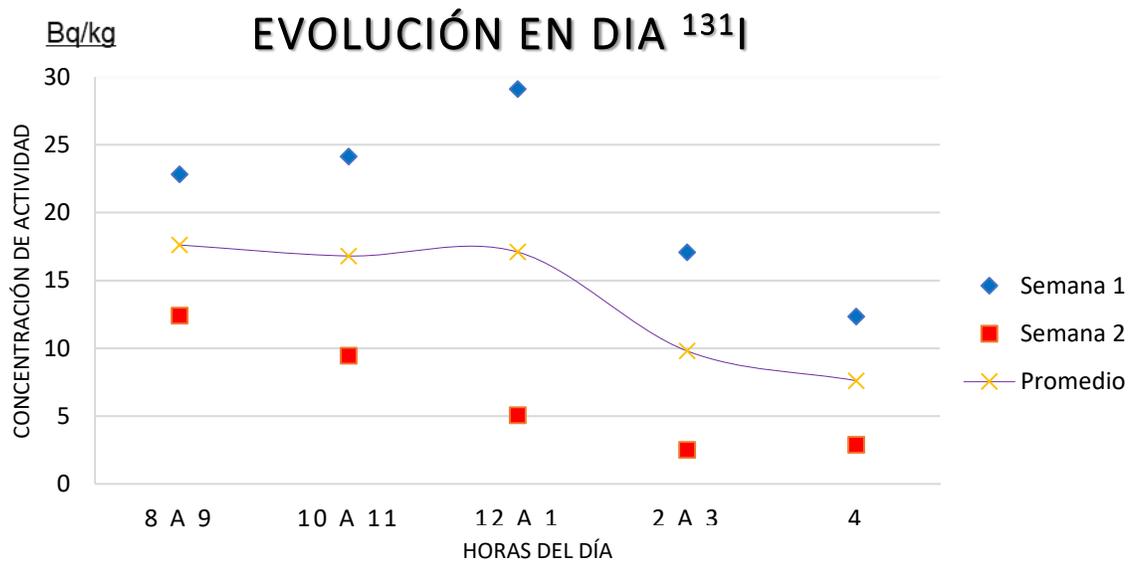
Gráfica 1. Resultados evolución del ^{131}I en semana



Fuente: elaboración propia.

2.5.4 Evolución en el día del ^{131}I . Un segundo muestreo se realizó para entender el comportamiento del ^{131}I en el transcurso del día, los resultados de las 2 semanas de muestreo para ver la evolución de ^{131}I durante el día se evidencian en la **Gráfica 2**.

Gráfica 2. Resultados evolución de ^{131}I en el día



Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 2** se reportan en el eje de las ordenadas los datos de concentraciones de actividad de un radionúclido (^{131}I) en unidades de becquerels por kilogramo (Bq/kg) y en el eje de las abscisas se reportan el intervalo de hora donde fueron tomadas las muestras. La toma de estas muestras se realizó los jueves 15 y 22 de agosto de 2019 ya que fueron los días cuya concentración de actividad fue alta y los resultados obtenidos durante las tres semanas fueron menos dispersos, se encontraron concentraciones de actividad en todas las muestras sin embargo en la parte del día en que se hallaron concentraciones de actividad de ^{131}I más altas fue en la mañana, seguido de un constante decrecimiento de la concentración de actividad durante el día.

Existen algunas recomendaciones para los niveles de ^{131}I y otros radioisótopos sin embargo hay una que es muy reciente y con la cual se cotejaron cada una de las concentraciones de actividad de ^{131}I encontradas, es un TECDOC⁶⁶ donde participaron la OMS (Organización Mundial de la Salud), la IAEA (Organización internacional de energía atómica) y la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), que estipula los niveles de referencia para algunos radioisótopos entre ellos el ^{131}I presentados en la **Tabla 17**.

Con este TECDOC se pudo evaluar las condiciones radiológicas de las aguas de la PTAR del salitre ya que es destinado a ser utilizado por los organismos reguladores, los encargados de formular políticas y las partes interesadas con responsabilidades

⁶⁶ IAEA-TECDOC-1788

en relación con el manejo de diversas situaciones en las que los radionúclidos están o podrían estar presentes en los alimentos y en el agua potable, excepto en una emergencia nuclear o radiológica.

Este TECDOC distingue los tres tipos de exposición existentes:

Situaciones de exposición planificadas: tales exposiciones pueden restringirse desde el principio por un buen diseño de las instalaciones y equipos, uso de procedimientos operativos apropiados y personal debidamente capacitado. Su control directo se puede ejercer sobre la fuente de radiación desde el principio.

Situación de exposición de emergencia: es una situación de exposición que surge como resultado de un accidente, un acto malicioso o cualquier otro evento inesperado y requiere una acción inmediata para evitar o reducir las consecuencias adversas, no se puede ejercer tal control directo sobre la fuente de radiación. Sin embargo, se pueden tomar medidas sobre las vías de exposición y sobre el comportamiento de los individuos expuestos.⁶⁷

Situaciones de exposición existentes: una situación de exposición existente es una situación de exposición que ya existe cuando se debe tomar una decisión sobre la necesidad de control, no se puede ejercer tal control directo sobre la fuente de radiación. Sin embargo, se pueden tomar medidas sobre las vías de exposición y sobre el comportamiento de los individuos expuestos.

La situación en donde se encontraron las diferentes actividades de ¹³¹I pertenecen a situaciones de exposición existentes las cuales son las que se abarcan específicamente en este TECDOC y que son las situaciones en las que es probable que solo haya subgrupos de la población afectados.

Tabla 17. Niveles de orientación de la OMS para radionúclidos en agua potable

Radionuclide*	Guidance level (Bq/L)
³ H	10 000
¹⁴ C**	100
⁹⁰ Sr, ¹³¹ I**, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ²³⁸ U***	10
²²⁶ Ra, ²²⁸ Th, ²³⁰ Th, ²³² Th, ²³⁴ U, ²³⁹ Pu, ²⁴¹ Am	1
²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²²⁸ Ra	0.1

Fuente: IAEA-TECDOC-1788

⁶⁷ IAEA-TECDOC-1788

* 40K, un radionúclido que ocurre naturalmente en una proporción fija a potasio estable no está incluido. Esto se debe a que el potasio es un elemento esencial para los humanos y su concentración en el cuerpo está controlada por procesos metabólicos. Si se supera el nivel de detección de 1 Bq / L para la concentración bruta de actividad beta, se realiza una determinación separada del potasio total y se resta la contribución de 40K a la actividad beta.

** 3H y 131I no serán detectados por las mediciones estándar de actividad de alfa bruto o beta bruta. Los análisis por separado son necesarios solo si hay razones para creer que estos radionúclidos pueden estar presentes.

*** El uranio se controla normalmente en función de su toxicidad química.

Según esta referencia, las concentraciones de actividad encontradas durante las semanas de muestreo la mayoría se encuentra sobre los niveles establecidos para ^{131}I .

La dosis efectiva anual para la persona generalmente no debe superar 1 mSv, pero esta dosis puede estar potencialmente superada debido a que hay personas de las localidades de Suba, Fontibón, Bosa y Kennedy que se dedican al cultivo de hortalizas, maíz, papá y a la producción de leche, utilizan esta agua para el riego de sus cultivos o para la que las vacas beban como se evidencia en la Imagen 45 tomada por la CAR, Generando un problema donde los implicados son los habitantes de la capital, sus vecinos y otros 47 municipios cercanos a la ribera del río Bogotá, puesto que se está propagando a los hogares el ^{131}I en los alimentos y bebidas.

Otro aspecto importante está en torno a los trabajadores que tratan o tienen constante contacto con estas aguas que de manera ininterrumpida reciben radiaciones de este radionúclido sin tener control alguno sobre las dosis adsorbidas.

Imagen 45. Usos del agua del río Bogotá.



Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)

Es importante destacar que al haberse excedido los niveles de orientación se amerita realizar una investigación mayor puesto que esto no indica necesariamente que el agua sea insegura, y las muestras tomadas no determinan si es representativa de la situación en otras épocas del año. Se debe tener en cuenta

que, si se supera un nivel de referencia en una muestra individual, el criterio de dosis individual solo se superará si las mismas concentraciones medidas persisten durante un año completo, sin embargo, el uso del yodo es permanente lo que supondría una condición radiológica crónica en el año

No obstante, se debe tener en cuenta que en la investigación se encontraron picos hasta 5 veces sobre el nivel de orientación.

Teniendo en cuenta esto para el muestreo de evolución en semana donde se tiene una mezcla compuesta totalmente representativa del día, aunque no todos los días se superó el nivel de orientación, si se hace un promedio semanal los valores sobrepasan este nivel de referencia o están bastantes cercanos a él.

En la evolución durante el día se observó algo muy similar, no en todas las horas del día se supera el nivel de orientación, pero si se hace un promedio diario si se excede o está muy cerca de excederlo. Puntualmente para la evolución en el día haciendo un promedio de los datos obtenidos el jueves este está sobre los niveles de referencia.

Una hipótesis preliminar es que el muestreo de evolución del ^{131}I en el día se hizo en hora laborales es decir no es totalmente representativo, equivale a una cuarta parte del tiempo total y aun así promediando este tiempo se obtuvieron valores por encima del nivel de referencia explicando los resultados anteriores, es decir que esto podría estar asociado a que el restante del día no muestreado lo que hace es diluir estas concentraciones de actividad pero no hasta el punto de estar por debajo de los niveles de orientación.

Como consecuencia de esto se podría inferir que en las horas donde generalmente el individuo está realizando el mayor número de actividades, específicamente para los trabajadores que tratan estas aguas, posiblemente en sus horas de trabajo estarían expuestos a concentraciones altas de ^{131}I . De igual manera y en relación con lo anterior las labores humanas de riego de vegetales y alimentación de animales son popularmente en estos horarios, lo cual apoyaría la idea de que haya una mayor posibilidad de que estos vegetales o bebidas lácteas contengan cantidades altas de ^{131}I , puesto que se están regando con el agua más cargada de ^{131}I en el día.

Resaltando las debilidades la literatura previa se encuentra que en Colombia no existe una tasa máxima de ^{131}I en aguas residuales, por lo que se hizo necesario tomar como referencia los niveles de orientación internacionales, sin embargo, una aproximación inicial de los niveles de concentración de actividad de ^{131}I es la Resolución 41178 del 2016 la cual indica los niveles máximos de dispensa (**Tabla 18**) en forma líquida a vertederos, alcantarillas y grandes masas de agua en la instalación que genera dicho desecho.

Tabla 18. Niveles de dispensa en forma líquida a vertederos y alcantarillas.⁶⁸

Radionucleidos	Tasa de emisión anual (Bq/año)	Tasa de concentración de actividad en (Bq/L)
¹³¹ I	1,00E+07	1,90E+01

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la **Tabla 18** lo que indica la Resolución 41178 de 2016 es que los niveles de emisión en concentración de actividad para el ¹³¹I en Colombia deben ser de 19 Bq/L, si comparamos este valor con los niveles de actividad encontrados la diferencia es tan solo marginal, cuando debería existir una diferencia enorme entre estos dos valores ya que las descargas de los 20 hospitales frente al resto de vertimientos de los habitantes de la ciudad son mínimas y deberían estar diluidas con las aguas residuales de los otros habitantes de la ciudad de Bogotá y no se deberían encontrar niveles tan cercanos a la tasa de concentración de actividad.

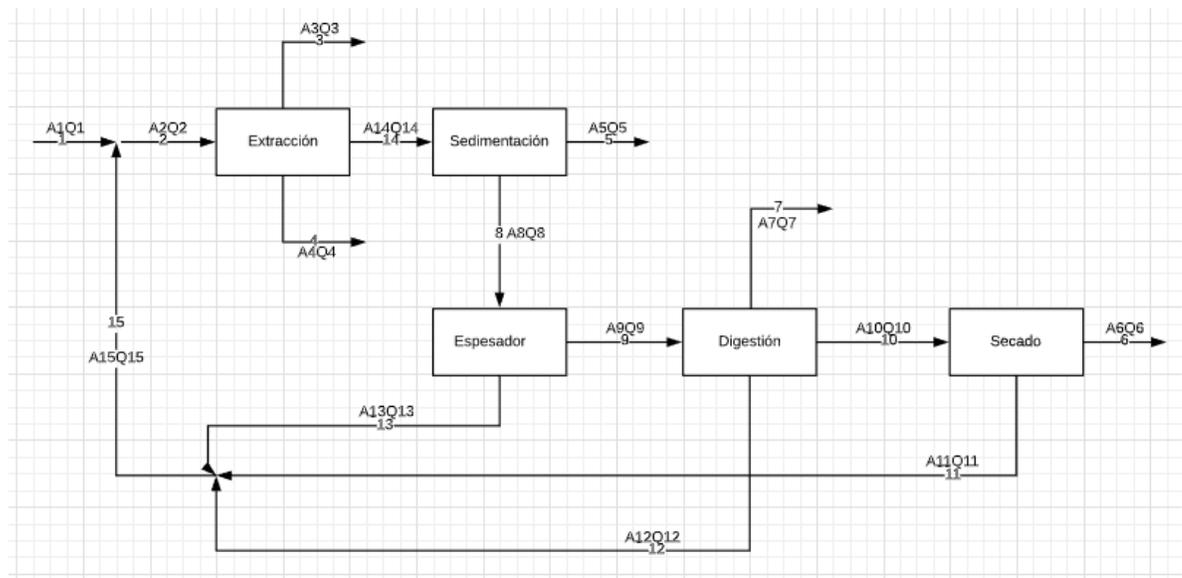
2.6 BALANCE DE MASA DE ¹³¹I

En este apartado se comprenderá el comportamiento del ¹³¹I mediante un balance de masa con las entradas y salidas principales de la PTAR del salitre, y se abarcarán las implicaciones potenciales que puede estar teniendo a nivel social, ambiental y económico el que se encuentre este radioisótopo en las principales corrientes de salida.

A continuación, en el **Diagrama 7** se presenta el esquema para realizar el balance de masa general en la planta de tratamiento de aguas del salitre abarcando todas las corrientes de salida y corrientes internas de cada proceso:

⁶⁸Resolución 41178 del MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Resolución 141178 del 2 de Diciembre del 2016, [en línea] <<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180//23517//37308-Resoluci%C3%B3n-41178-2Dic2016.pdf>> [citado el 21 de octubre de 2019]

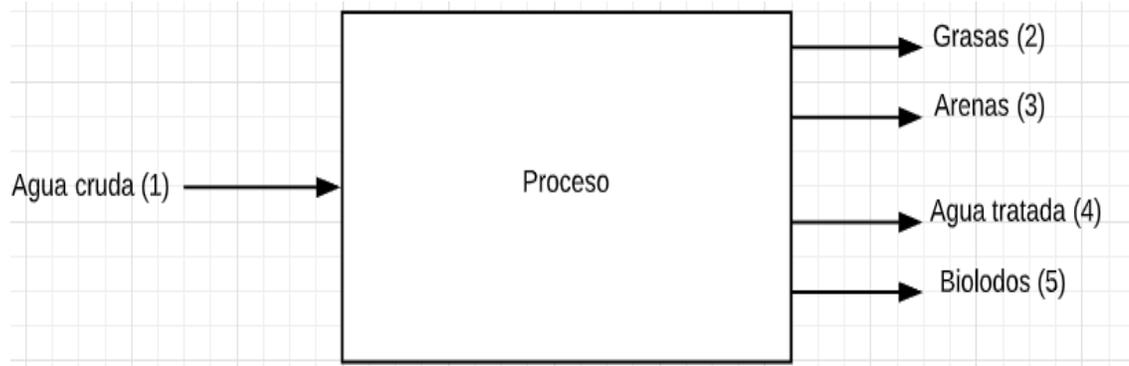
Diagrama 7. Esquema para balance de masa con todas las corrientes en la PTAR del salitre.



Fuente: elaboración propia.

Bajo estas condiciones se decidió hacer un balance de masa con el cual también se puede hacer un diagnóstico del comportamiento del ¹³¹I estudiando las principales corrientes de entrada y salida del agua y el cual se presenta en el **Diagrama 8**.

Diagrama 8. Esquema para balance de masa con las corrientes de agua



Fuente: elaboración propia

2.6.1 Parámetros principales de operación⁶⁹. A continuación, se presentan los principales parámetros de operación que se manejan en la PTAR del salitre:

Caudal medio: 4 m³ /s

Caudal pico: 9.9 m³ /s

Pico respecto al promedio: la planta puede aceptar 5 m³ /s de caudal medio durante 24 horas Características afluente crudo

Sólidos suspendidos: 356 mg/l (promedio):123100 kg/d

DBO5 : 274 mg/l (promedio) 94520 kg/d Calidad efluente: I Fase II Fase

Reducción DBO5 : 40 +/- 5% 20 mg/l DBO salida

Reducción SS: 60% 20 mg/l de salida

Humedad biosólidos: 30 +/- 2%

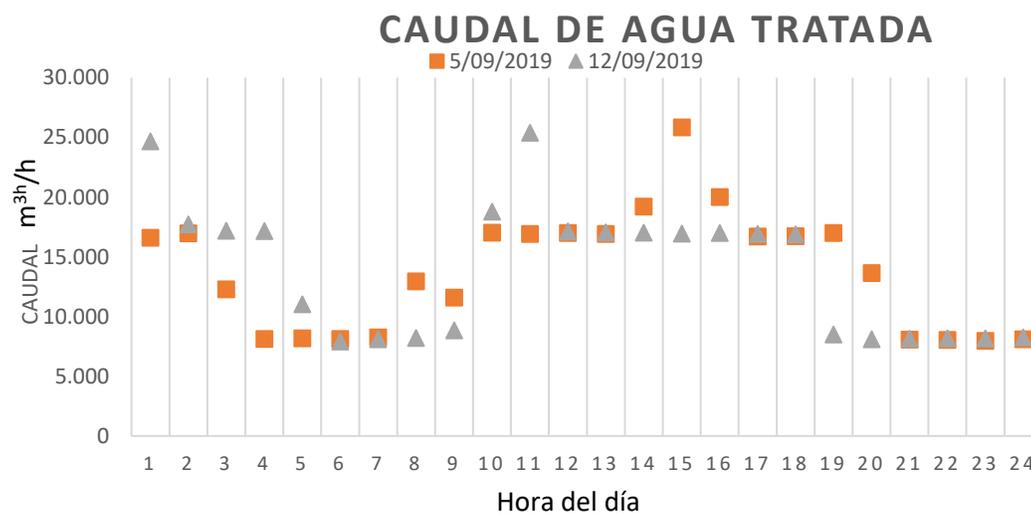
En la **Tabla 19** se presentan los datos para el balance de masa:

⁶⁹ PTAR Salitre <en línea> <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal43/salitre.pdf> . Citado el 27 de noviembre de 2019

Tabla 19. Caudales

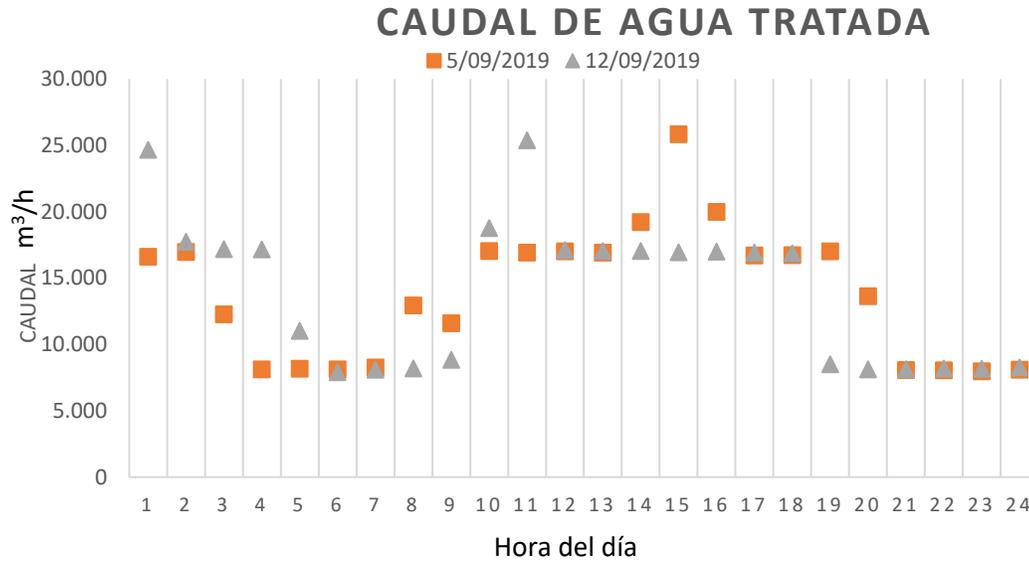
CAUDALES (m ³ /h)		
Operación/Fecha	5/09/2019	12/09/2019
Agua Cruda	12230,00	19760,00
Agua Tratada	17030,00	25390,00
Decantadores	8419,71	8066,51
Grasas	0,054166667	0,054166667
Arenas	0,041666667	0,041666667

Gráfica 3. Caudales de agua cruda durante el día.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4. Caudales de agua tratada durante el día.



Fuente: elaboración propia.

2.6.2 Desarrollo del balance. La **Tabla 20** muestra los resultados de la primera semana de muestreo donde se analizaron por primera vez cada una de las salidas de la PTAR del salitre.

Tabla 20. Resultados en concentración de actividad en las diferentes corrientes.

Balance de masa S1		$t_{1/2}(s) = 693377$
Componente medido	A (Bq/kg)	t retención (s)
Agua cruda	22,290	0
Agua de grasas	23,999	900
Grasas	379,592	900
Agua de arenas	68,499	900
Arenas	0	900
Agua de lodos	28,251	5700
Lodos	112,747	5700
Agua tratada	19,300	9000

Fuente: elaboración propia.

La **Tabla 21** y la **Tabla 22** muestran los resultados de los análisis del agua residual respecto al ^{131}I de dos semanas más de muestreo en la corriente de entrada y en

las corrientes de salida, estos son los datos que se utilizaran para los balances de masa.

Tabla 21. Resultados de concentración de actividad para el balance de masa 1

Balance de masa 1		
Componente medido	(Bq/kg)	t retención (s)
Agua cruda	19,383	0
Agua de grasas	10,610	900
Grasas	0	900
Agua de arenas	15,768	1080
Arenas	0	1080
Agua de lodos	12,126	4800
Lodos	0	4800
Agua tratada	12,707	6300
Bio-lodos	31,002	2134080

Fuente: elaboración propia.

Tabla 22. Resultados de concentración de actividad para el balance de masa 2

Balance de masa 2		
Componente medido	(Bq/kg)	t retención (s)
Agua cruda	1,452	0
Agua de grasas	1,420	600
Grasas	0	600
Agua de arenas	1,199	420
Arenas	0	420
Agua de lodos	0,862	1200
Lodos	0	1200
Agua tratada	1,982	7200
Bio-lodos	31,869	2134080

Fuente: elaboración propia.

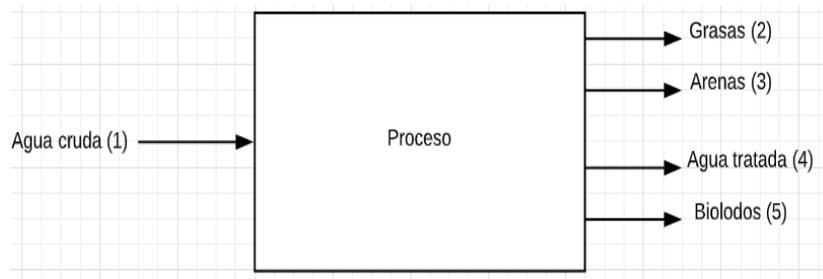
2.6.2.1 Balance. Para realizar el balance de masa del ^{131}I se asumió que la PTAR tiene un modelo de comportamiento como flujo pistón donde se espera que toda la actividad de ^{131}I que entra sea igual a la suma de todas las actividades de ^{131}I de salida considerándose en cada caso los tiempos de retención por lo que se incluyó en el planteamiento del balance el postulado de la ley del decaimiento universal:

Ecuación 8. Postulado de la ley del decaimiento universal

$$e^{\lambda t_d} \text{ con } \lambda = \frac{-\text{Ln}2}{t_{1/2}}$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Según el **Diagrama** (a continuación, se vuelve a presentar), esquema para balance de masa con las corrientes de agua se hace el planteamiento de masa el cual se muestra en la ecuación 8.



Ecuación 9. Balance de las corrientes de agua

$$A_1 Q_1 = \frac{A_2 Q_2}{e^{\frac{\text{Ln}2 t_{R2}}{t_{1/2}}}} + \frac{A_3 Q_3}{e^{\frac{\text{Ln}2 t_{R3}}{t_{1/2}}}} + \frac{A_4 Q_4}{e^{\frac{\text{Ln}2 t_{R4}}{t_{1/2}}}} + \frac{A_5 Q_5}{e^{\frac{\text{Ln}2 t_{R5}}{t_{1/2}}}}$$

Donde:

A = Concentración de actividad en Bq/kg

Q = Flujo masico en kg/h

t_R = Tiempo de retención

$t_{1/2}$ = Tiempo de vida media del ^{131}I

A continuación, en la **Tabla 23** y la **Tabla 24**, se muestran los resultados del balance de masa el cual se hizo por duplicado:

Tabla 23. Resultados balance de masa 2

Componente	A (Bq/kg)	t retención (s)	Flujo masico (kg/h)	Entrada	Salidas	
				A•ṁ (Bq/h)	A•ṁ (Bq/h)	A•ṁ* (Bq/h)
Agua cruda	19		12'230.000	237'052.255	-	-
Agua de grasas	11	900	54		1	575
Grasas	0	900	54		0	0
Agua de arenas	16	1.080	42		1	658
Arenas	0	1.080	42		0	0
Agua tratada	13	6.300	17'030.000		216.406	217'772.879
Biolodos	31	1'818.000	5.417		167.928	1'033.733
					Total salidas	218'807,845
					Entradas-salidas	18'244,410

Fuente: elaboración propia.

Para la **Tabla 23** y la **Tabla 24** se tiene que:

$A \cdot \dot{m}$ = Actividad por flujo másico

$A \cdot \dot{m}^*$ = Actividad por flujo másico llevada al instante de la toma de la muestra de agua cruda por medio del postulado de la ley de decaimiento universal.

Tabla 24. Resultados balance de masa 3

Componente medido	A (Bq/kg)	t retención (s)	Flujo masico (kg/h)	Entrada			Salida			
				A•m (Bq/h)	A•m (Bq/h)	A•m* (Bq/h)	A•m (Bq/h)	A•m* (Bq/h)	A•m* (Bq/h)	
Agua cruda	1,452	0	19'760.00	28'698.76	-	-	-	-	-	
			0	5						
Agua de grasas	1,420	600	54	-	77			77		
Grasas	0,000	600	54	-	0			0		
Agua de arenas	1,199	420	42	-	50			50		
Arenas	0,000	420	42	-	0			0		
Agua tratada	1,981	7200	17'030.00	-	33'744.85			33'988.615		
			0		7					
Biolodos	31,869	1815300	5.417	-	172.624			1'059.778		
								35'048.520		
				Total salidas						
				Entradas-salidas						-
										6.349.755

Fuente: elaboración propia.

Antes de analizar a profundidad cada dato se hace mención de que la diferencia entre las entradas y salidas no se deben entender como pérdidas en el proceso ya que la misma se encuentra dentro de la incertidumbre del método que es de alrededor de 4%.

Con los resultados obtenidos de los balances de masa se puede evidenciar el comportamiento del ^{131}I , se observa que tiende a irse por las corrientes agua en una proporción muy alta frente a las otras corrientes, otras corrientes importantes de resaltar es la de agua de lodos y lodos, que ambas van altamente cargadas con ^{131}I , en cuanto a las corrientes de arenas y grasas el ^{131}I es más afín con las grasas que con las arenas pues comparando los valores encontrados es hasta 10 veces más alto en grasas que en arenas.

Sería satisfactorio haber encontrado los mismos valores de ^{131}I en la entrada y en la salida, sin embargo, es muy difícil que esto llegue a suceder por la exactitud que se debería tener para tomar las muestras y la cantidad de factores que pueden afectar estos resultados. Pero también se puede evidenciar que la diferencia entre las entradas y las salidas es demasiado alta, esto se debe a la recirculación que hay de las aguas que se extraen durante el proceso en operaciones como extracción de grasas y arenas, sedimentación de lodos, entre otras, en las cuales se busca retirar la mayor cantidad de agua posible y esta agua que logran retirar se recircula a la entrada del sistema.

También se debe a que a nivel general en la planta se debe llevar un control estricto de las aguas que entran y salen, como se ve en los siguientes diagramas de entrada y salida de agua debe salir la misma cantidad de agua que entra a la planta aun cuando se sabe que el agua que entra a uno hora específica no sale de inmediato, sino que se tienen unos tiempos de retención por cada operación.

Con base en lo anterior los resultados que emergen del muestreo de los balances de masa pueden variar ya que los caudales pueden estar disminuyendo o concentrando el ^{131}I .

De manera general para los dos balances y por medio de la **Gráfica 5** se puede entender el comportamiento del ^{131}I dentro de la planta de tratamiento de aguas del salitre:

Gráfica 5. Resultados balances de masa.



Fuente: elaboración propia.

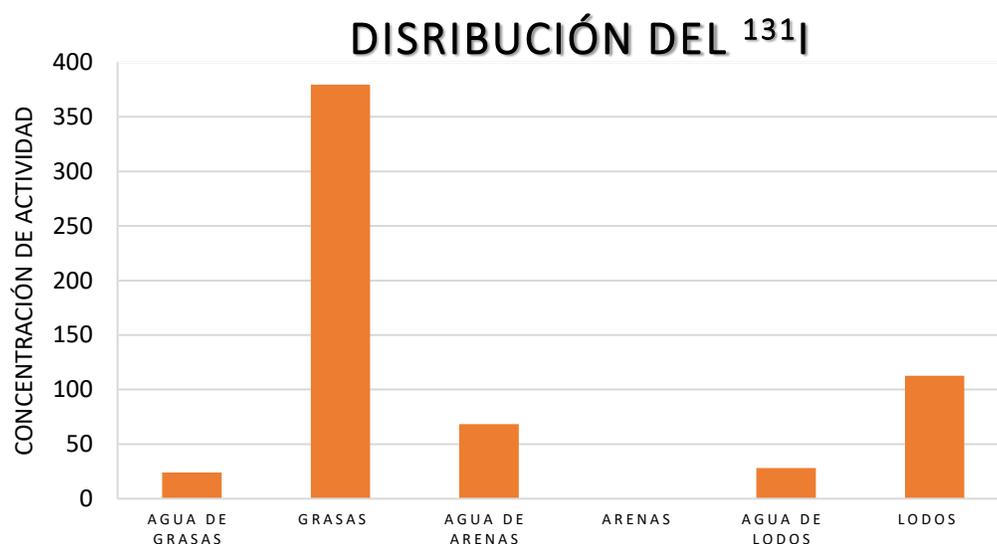
La **Gráfica 5** es bastante revelador en cuanto al comportamiento del ^{131}I en las principales corrientes de la PTAR del Salitre, a partir de estos datos se puede observar que la mayor cantidad de ^{131}I tiende a encaminarse siempre en las corrientes de agua, para este caso en específico la mayor parte de este radionúclido sale por la corriente de agua tratada, cabe resaltar que además de esto, los hallazgos de este estudio son consistentes con la literatura que nos dice que el ^{131}I tiene gran tendencia a irse entre los lodos como se evidencia en el diagrama 9 donde los lodos son los picos más altos luego de los de agua tratada.

Un aspecto importante de mencionar es que, aunque en algunos casos en las grasas y arenas filtradas no se registró presencia de ^{131}I esto no quiere decir que haya ausencia de ^{131}I , esto se debe a que la cantidad que se logró filtrar de cada

muestra de 100 ml por corriente es demasiado baja y no es detectable con los equipos de espectrometría utilizados.

Sin embargo, buscando comprender más a fondo el comportamiento del ^{131}I también se realizó un análisis de las corrientes de grasas, arenas y lodos donde si se detectaron concentraciones de ^{131}I en una cantidad de 100 ml de cada una de las corrientes y que fue filtrada al vacío, se obtuvieron dos partes por cada corriente, una parte acuosa y una sólida producto de la filtración y las cuales fueron analizadas por aparte arrojando los resultados que se muestran en la **Gráfica 6**.

Gráfica 6. Distribución del ^{131}I



Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que de un volumen de 100 ml el ^{131}I tiende a tener mayor afinidad por la parte sólida de las grasas, igualmente en la corriente de los lodos tiende a irse en mayor proporción por la parte sólida de los lodos, y hay una excepción en la corriente de las arenas donde hay mayor afinidad por la parte acuosa de las arenas.

Unas de las cuestiones desprendidas de estos resultados es el uso que se le dan a los biosólidos, agua tratada, arenas y grasas; por lo cual, se proporcionan a continuación algunas incidencias que pueden causar estas salidas desencadenadas de los procesos de la PTAR del salitre:

2.6.3 Biosólidos. El resultado que emerge de la sedimentación son unos lodos que tienen unos tratamientos en diferentes operaciones para eliminar la mayor cantidad de impurezas posibles, efectivamente esta serie de procesos hacen que estos lodos estén libres de una gran cantidad de contaminantes, las características de los biosólidos⁷⁰:

- Alto contenido de sólidos (30%)
- Estable (No tienen olor desagradable)
- Color negro
- Concentraciones de contaminantes por debajo de normas internacionales
- Material reutilizable agrícolamente

Al no tenerse un conocimiento del campo de radiometría ambiental, la importancia del control de los desechos radiactivos por sus efectos en la salud y en el medio ambiente, se pasó por alto un criterio para el contenido de radionúclidos en los biosólidos llegándose a tener una concentración de actividad de 31 Bq/kg.

Debido a que actualmente este biosólido se utiliza como abono orgánico y también es utilizado en proyectos de revitalización y restauración de suelos, se podría estar generando zonas con altas concentraciones de radiactividad y las cuales no podrían ser seguras para el ser humano puesto que estarían expuestos a altos niveles de radiación, en la **Imagen 46** y la **Imagen 47** se muestra una zona revitalizada con estos biosólidos.

⁷⁰ PTAR Salitre <en línea> <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal43/salitre.pdf> . Citado el 27 de noviembre de 2019

Imagen 46. Revitalización y restauración de suelos con biosólidos década de los 90. ⁷¹



Fuente: PTAR Salitre <en línea>
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal43/salitre.pdf>. Citado el 27 de noviembre de 2019

Imagen 47. Revitalización y restauración de suelos con biosólidos en la actualidad



Fuente: PTAR Salitre <en línea>
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal43/salitre.pdf>. Citado el 27 de noviembre de 2019

⁷¹ PTAR Salitre <en línea> <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal43/salitre.pdf> . Citado el 27 de noviembre de 2019

Las implicaciones de reportar actividad de ^{131}I están dadas por la irradiación y la contaminación radiactiva ya que se está transfiriendo la energía de un material radiactivo a otro material (animales, humanos) y dado que las actividades que se realizan en estos lugares de revitalización o las de abonar requieren contacto directo con este biosólido y también se considera otra posible afectación por contaminación radiactiva ya que estas mismas zonas revitalizadas pueden tener en un futuro utilidad como parques o zonas comunes donde tanto como niños y adultos pueden en cualquier momento tener contacto con este biosólido y así enfrentarse a la presencia no deseada de material radiactivo en cualquier superficie.

2.6.4 Arenas y Grasas. Hasta el momento no se ha encontrado un uso para estos productos, se sabe que son almacenadas en contenedores (**Imagen 48 e Imagen 49**) hasta que se llenan y luego se llevan al relleno de doña Juana, por lo cual solo podría cuestionarse algunas implicaciones frente a la exposición de los trabajadores que tienen contacto con estos contenedores.

Imagen 48. Salida de arenas.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 49. Salida de grasas



Fuente: elaboración propia.

2.6.5 Agua tratada. Este proyecto se desencadenó ya que la investigadora Liseth Ospina había llamado la atención con los resultados encontrados de concentración de actividad de ^{131}I río arriba y río abajo luego de las descargas de la PTAR del salitre, encontrando concentraciones de actividad más altas río abajo luego de las descargas de la PTAR del Salitre en los resultados encontrados en este proyecto se dio soporte a esos resultados puesto que vemos que la PTAR del salitre si aporta un aumento de concentración de actividad de ^{131}I en sus descargas , por lo cual, es importante realizarse una investigación ya que la dieta de los habitantes de 47 municipios cercanos a la ribera del río Bogotá y la de los habitantes de Bogotá podría no ser saludable ya que muchas verduras y leche se producen con sus aguas que vienen cargadas con este radionucleido.

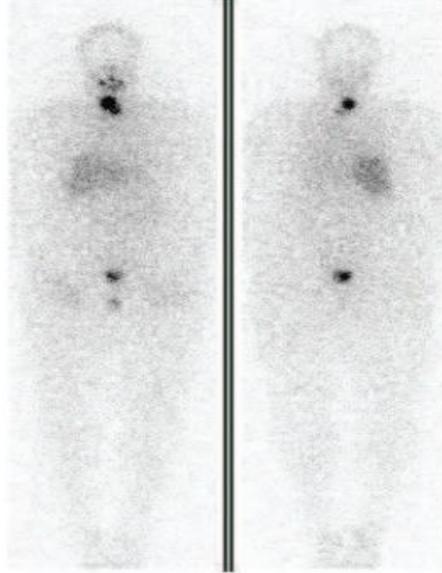
Imagen 50. Riego de hortalizas con aguas provenientes del río Bogotá.



Fuente: Revista Semana. (en línea).
<https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/rio-bogota-en-suba-cultivaban-papa-con-agua-de-este-contaminado-acuifero/36021> (Tomada el 14 de febrero de 2020)

En la **Imagen 50** se evidencia el riego con esta agua proveniente del río Bogotá cargada con ^{131}I en alimentos y a como una potencial consecuencia de esto podemos ver en la **Imagen 51** muestra la asociación del ^{131}I principalmente en la tiroides pero también en otras zonas del cuerpo como la zona pélvica luego de la ingesta.

Imagen 51. Imágenes tomadas por una cámara especial de Medicina Nuclear que muestra las áreas oscuras donde el 131I es absorbido por el cuerpo.



Fuente: UWMC Imaging Services.
Yodo radioactivo I-131 para tratar el
cáncer de tiroides. Disponible en
internet.
[https://studylib.es/doc/6024638/yodo-
radioactivo-i-131-para-tratar-el-
c%C3%A1ncer-de-tiroides](https://studylib.es/doc/6024638/yodo-radioactivo-i-131-para-tratar-el-c%C3%A1ncer-de-tiroides)

3. PROPUESTA DE REMOCIÓN

En este capítulo se expone la experimentación realizada en laboratorio con la finalidad de probar un método de control o separación del ^{131}I a nivel generadores (centro médicos) del ^{131}I , ya que a pesar de las altas actividades encontradas en la PTAR del salitre plantear un método de control a escala PTAR pública sólo es justificable si las concentraciones son extremadamente altas, situación que comúnmente solo ocurre en plantas de tratamiento de aguas residuales de centrales de energía nuclear.

En la delimitación de esta investigación para la experimentación en la separación de ^{131}I , se deja claro que, debido a la imposibilidad del manejo de fluidos con compuestos radiactivos, así como los desechos y la contaminación en materiales generada, la experimentación se realizaría con el único isótopo estable del Yodo, este isótopo es el ^{127}I , el cual presenta el mismo comportamiento químico en fluidos que el ^{131}I , sin embargo la investigación logro un mayor alcance puesto que se realizaron las pruebas usando el ^{127}I y el ^{131}I , esto fue posible gracias a una solución de ^{131}I suministrada por el Servicio Geológico Colombiano, la cual no necesitaba ser controlada.

Cualquier propuesta de remoción/separación, en su diseño, está acompañada por un sistema de tanques de decaimiento por lo tanto los resultados de las pruebas de experimentación permiten desarrollar el **capítulo 4**. De la misma manera los resultados obtenidos permitieron determinar que no era viable presentar un diseño de parámetros técnicos para la adsorción por ende se realiza únicamente el diseño de los tanques de retención.

3.1 GESTIÓN DE DESECHOS

En la gestión de desechos radiactivos los materiales pueden liberarse o descargarse en el medio ambiente, o caso contrario deben confinarse y aislarse de la biosfera hasta que los radionúclidos perjudiciales queden desintegrados naturalmente y reducidos a concentraciones no peligrosas. La cantidad de radiactividad liberada debe ajustarse a los niveles admisibles de exposición tanto para grupos de población como el medio ambiente y está determinada por reglamentos y guías nacionales, basados generalmente en las normatividades de la OIEA.⁷²

La inmovilización y separación del yodo radiactivo como forma de disposición es una estrategia usada con el fin de cumplir la normatividad atómica y proteger de la contaminación causada por los diferentes radionúclidos y su posible posterior incorporación al metabolismo humano. Como se ha mencionado en capítulos anteriores son distintas las fuentes de yodo radiactivo siendo las más importantes

⁷² IAEA. GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS, [en línea],
<https://www.iaea.org/sites/default/files/185_604644047_es.pdf> [citado el 10 de agosto de 2019]

la generación de energía en plantas de potencia, los tratamientos médicos con procesos de irradiación, medida de trazabilidad en nutrientes en suelos, entre otros. La importancia y objetividad de estos procesos de separación radica directamente en la vida media del radioisótopo de interés. Para los casos de radioisótopos como el ^{129}I con una vida media $t_{1/2}=1.6 \times 10^7$ años las operaciones de separación deben garantizar una posterior inmovilización para una correcta disposición de los desechos.⁷³

Específicamente en la gestión de desechos líquidos existen complicaciones debido a las composiciones químicas y radioquímicas complejas. En la industria los tratamientos más comunes son la evaporación, la precipitación, la adsorción y el intercambio iónico, en los cuales se debe garantizar un máximo de descontaminación y una reducción de los volúmenes de líquido contaminado.⁷⁴

Como ya se ha especificado anteriormente, en Colombia es la Resolución 41178 de 2016 establece los límites de vertimientos de la siguiente manera: la tasa de emisión mensual en concentración de actividad es de 19 Bq/L y el límite de emisión anual de 1000000 Bq/año (0.27027 mCi/año), lo que hace necesaria la implementación de métodos para tratar los desechos generados principalmente en Colombia por los pacientes tratados con ^{131}I para luego ser vertidos a los alcantarillados.

3.1.1 Estrategia de Remoción. Alrededor del mundo son aplicados y estudiados distintos métodos tanto de control como de separación del ^{131}I . Al ser un residuo de baja actividad debido a su vida media ($t_{1/2}=8.04$ días) pero generado en grandes volúmenes, se hace necesario su control para impedir su acumulación y una posterior contaminación. La metodología comúnmente más usada en Latinoamérica es el confinamiento capaz de permitir un decaimiento natural del radionúclido para su posterior desecho.⁷⁵

⁷³ RILEY, Brian. VIENNA, John. STRACHAN, Denis. MCCLOY, John. JERDEN, JAMES. MATERIALS AND PROCESSES FOR THE EFFECTIVE CAPTURE AND IMMOBILIZATION OF RADIOIODINE: A REVIEW. En: Journal of Nuclear Materials 2016, pp 307 a 326.

⁷⁴ INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES. Gobierno Mexicano. Ntercambiadores Iónicos Y Adsorbentes De Interés En Procesos Nucleares Y Ambientales. [en línea]. <<http://www.inin.gob.mx/documentos/publicaciones/contridelinin/Cap%C3%ADtulo%2016.pdf>>[citado el 10 de agosto de 2019]

⁷⁵ ROMERO, H. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA IZTAPALAPA. Confinamiento De Desechos Radiactivos De Baja Y Media Actividad, [en línea]. <https://www.academia.edu/1166948/Confinamiento_de_desechos_radiactivos_de_baja_y_media_actividad>[citado el 10 de agosto de 2019]

3.1.2 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. En la separación específicamente de los radioisótopos del yodo se busca que la sal se mantenga concentrada y eliminar el líquido evaporado por medio del vertimiento al alcantarillado. La complicación de este método yace en la necesidad de plantear otro método que controle las concentraciones que posiblemente tiendan a la fase vapor, es decir plantear un método de separación para gas y posteriormente hacer el vertimiento.⁷⁶

El tipo de evaporador elegido, así como las condiciones de temperatura y presión en la evaporación son determinados por las características físicas tanto de la sal a concentrar, así como del líquido a evaporar. La **Tabla 25** y la **Tabla 26** muestran los factores que comúnmente intervienen directamente sobre el proceso de evaporación.

Tabla 25. Factores que afectan el proceso de evaporación.

Factores	Descripción
Concentración de la solución	A medida que se evapora la solución, se incrementa la concentración por lo que hay mayor viscosidad y densidad de la solución, lo cual conlleva a que el coeficiente global de transferencia de calor disminuya, desfavoreciendo el proceso de evaporación.
Solubilidad	A medida que se calienta la solución y aumenta la concentración del soluto, puede excederse el límite de solubilidad del material en solución y se formarán cristales. Esto puede limitar la concentración máxima que pueda obtenerse por evaporación de la solución.
Formación de espuma	Se genera puesto que algunas sustancias, principalmente orgánicas, forman una capa de espuma estable durante la ebullición, dicha capa es indeseable por que el vapor formado la arrastra llevando consigo una cantidad importante de líquido.
Sensibilidad a la temperatura	Muchos productos químicos se alteran cuando se calientan a temperaturas moderadas durante espacios de tiempo cortos, esto se da principalmente en productos químicos, alimenticios y farmacéuticos.
Formación de incrustaciones	Se generan por la presencia de sustancias cuya solubilidad disminuye con la temperatura o por los productos de descomposición que tienden a depositarse sobre las superficies de calentamiento.

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA

⁷⁶ TAVERA, Edgner Maer. Temas selectos de operaciones unitarias para la carrera de ingeniería industrial. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Instituto de ciencias básicas a ingeniería. 12 p.

NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

Tabla 26. Factores que afectan el proceso de evaporación (continuación).

Factores	Descripción
Presión y temperatura	Cuanto más elevada sea la presión de operación del evaporador, mayor será la temperatura de ebullición. Además, la temperatura de ebullición también se eleva a medida que aumenta la concentración de la solución por la evaporación.
Material de construcción	La selección de los materiales de construcción del evaporador tiene importancia en la prevención de la corrosión. En la mayoría de los casos se usa materiales como cobre, níquel, acero inoxidable, aluminio, grafito y plomo.

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

Es necesario prestar atención a varios de estos parámetros para así controlar el proceso de evaporación y hacerlo eficiente. Por ejemplo, es necesario operar a presiones de vacío (por debajo de 1 atm) para mantener los materiales termosensibles en temperaturas bajas. La corrosión se puede controlar adaptando los niveles de pH, así como se puede evitar la espuma eliminando los materiales orgánicos.⁷⁷

⁷⁷ TAVERA, Edgner Maer. Temas selectos de operaciones unitarias para la carrera de ingeniería industrial. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Instituto de ciencias básicas a ingeniería. 78 p.

3.1.3 Adsorción. La adsorción es la transferencia de uno o más solutos de una fase fluida a un lote de partículas sólidas. La fase fluida contiene el compuesto que se desea separar, adsorbato, y la fase sólida se conoce como material adsorbente. Es un método bastante usado para la captura de los radioisótopos de interés en la disminución de contaminación en los diferentes generadores de desechos de carácter radiactivo. Actualmente la investigación se centra en el desarrollo y prueba de materiales con la afinidad suficiente para disminuir los niveles de concentración en los fluidos contaminados.

La adsorción se divide en dos tipos, adsorción de tipo física y adsorción de tipo química, y depende de la naturaleza de las fuerzas activas que existen en la superficie del sólido y de su afinidad con el material a adsorber.⁷⁸

- Adsorción física o fisorción: las interacciones que se establecen entre la superficie del sólido y el adsorbato son de naturaleza física, fundamentalmente por fuerzas de Van der Waals. Este fenómeno es reversible y no se comparten ni se transfieren electrones, manteniéndose la individualidad del sólido y del adsorbato.
- Adsorción química o quimisorción: las fuerzas que se establecen son enlaces químicos, en este las moléculas dejan de ser individuales resultando un fenómeno irreversible. No ocurre sobre toda la superficie del sólido, solamente sobre los centros activos.

Son varios los factores que intervienen o influyen en el proceso de adsorción, en la **Tabla 27** se presentan las propiedades de adsorbente, en la **Tabla 28** la naturaleza del adsorbato y en la **Tabla 29** son presentados en que influyen las características de la fase líquida.

⁷⁸ MESTANZA, María. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Universidad complutense de Madrid. Madrid, 2012. 318 p.

Tabla 27. Propiedades del adsorbente

Propiedades del sólido	
Superficie específica	La adsorción es un fenómeno superficial, y como tal, cuanto mayor sea la superficie del
Distribución del tamaño de poro	adsorbente, mayor será la adsorción. Es un factor importante ya que determinará la superficie accesible para la adsorción.
Tamaño de partícula del adsorbente	A menor tamaño de partícula del adsorbente, se obtiene una mayor área superficial o de contacto que favorece el proceso de adsorción.

Fuente: MESTANZA, María. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Universidad complutense de Madrid. Madrid, 2012. 318 p.

Tabla 28. Naturaleza del adsorbato

Naturaleza del adsorbato	
Estructura del adsorbato	La presencia de grupos funcionales favorece las interacciones entre el soluto y el adsorbente, dando lugar a una adsorción específica.
Tamaño molecular del adsorbato	No sólo determina la velocidad de adsorción, sino también la capacidad de la misma ya que pueden surgir impedimentos estéricos que impidan la entrada de la molécula adsorbible en determinados poros.
Solubilidad del adsorbible en el disolvente	Cuanto mayor es la solubilidad, menor será la adsorción.
Naturaleza iónica del adsorbato	La carga neta del adsorbato puede favorecer o dificultar su adsorción sobre el adsorbente.

Fuente: MESTANZA, María. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Universidad complutense de Madrid. Madrid, 2012. 318 p.

Tabla 29 Características de la fase líquida

Características de la fase líquida	
pH	El pH no solo determinará la concentración de iones hidronio e hidroxilo en el medio, sino que también condicionará el grado de disociación del adsorbible.
Temperatura	De manera general, se puede afirmar que aumentos en la temperatura desfavorecen los procesos de adsorción; sin embargo, se encuentran múltiples ejemplos de lo contrario, sobre todo en fase líquida.
Naturaleza del disolvente	<p>Naturaleza química del disolvente: Determinará en gran parte la afinidad del sólido por el disolvente y por el adsorbible</p> <p>Tensión superficial: Los adsorbatos que disminuyen la tensión superficial tienden a desplazarse hacia la zona superficial, favoreciéndose de este modo la adsorción. Además, determinará el grado de contacto sólido-líquido. Estos pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tensión superficial positiva: Predominan las fuerzas de cohesión líquido – líquido sobre las de atracción líquido– sólido. - Tensión superficial compensada: Igualdad entre las fuerzas de cohesión y las de atracción. - Tensión superficial negativa: Predominan las fuerzas de adhesión.

Fuente: MESTANZA, María. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Universidad complutense de Madrid. Madrid, 2012. 318 p.

3.1.4 Selección del Método de Remoción. Después de una revisión bibliográfica se decidió escoger la adsorción como método de separación para la fase experimental, cabe aclarar que cualquiera de los dos métodos utilizados debe ser acompañado posteriormente con un proceso de decaimiento para el control total de los desechos. La evaporación es un método de menor precisión y que trae consigo la necesidad de plantear una posterior adsorción para tratar el vapor generado aumentando así los costos y el número de operaciones a realizar, ya de entrada no es una elección del todo viable para los intereses del proyecto. La adsorción, en cambio, permite realizar un desarrollo experimental medible y con mayor facilidad para la gestión de los desechos radiactivos.

La selección del método de remoción a utilizar se hizo basada en bibliografía y en las capacidades logísticas para desarrollar la experimentación, explicadas en la delimitación del proyecto.

En la matriz de selección generada por QUIVERIO y VILLADA, 2014, se comparan la adsorción por medio de carbón activado y la evaporación como métodos de remoción, siendo esta la principal fuente para seleccionar el método a utilizar en este proyecto. A continuación, en la **Tabla 30** y la **Tabla 31** son presentadas las justificaciones de los parámetros usados para la matriz de selección.

Tabla 30. Justificación de los parámetros de la evaporación

Parámetro	Calificación	Justificación
Inversión inicial	2	35'399.253 \$COP ¹³⁴
Eficiencia teórica	5	90-95% ¹³⁵
Condiciones de operación	2	Presión 1 a 10 atm. Temperatura hasta 200°C. ¹³⁶
Periodicidad de mantenimiento	4	Mantenimiento anual del equipo.
Facilidad de adquisición	4	Adquisición fácil, debido a que en Colombia hay algunas empresas dedicadas a la fabricación de equipos de tipo industrial como evaporadores.
Vida útil	4	De 10 a 20 años. ¹³⁷
Total	21	Suma de puntaje calificativo

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

Tabla 31. Justificación de los parámetros de la adsorción con carbón activado

Parámetro	Calificación	Justificación
Inversión inicial	5	1'307.930 \$COP ¹³⁸
Eficiencia teórica	5	90% ¹³⁹
Condiciones de operación	5	Presión hasta 7 atm. Temperatura ambiente. ¹⁴⁰
Periodicidad de mantenimiento	1	Mantenimiento semanal hasta mensual.
Facilidad de adquisición	5	El carbón activado es un adsorbente de muy fácil adquisición, debido a este adsorbente ha sido utilizado muy ampliamente en el tratamiento de agua.
Vida útil	1	Inferior a 2 años.
Total	22	Suma de puntaje calificativo

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

Posteriormente se presenta en la **Tabla 32** la matriz de selección generada para determinar la viabilidad de escoger uno u otro método.

Tabla 32. Matriz de selección del sistema de remoción

Sistema de remoción /Parámetro	Porcentaje de ponderación	Procesos físicos y químicos		Adsorción por Carbón Activado	
		Evaporación			
		C	P	C	P
Inversión inicial	25%	2	0.5	5	1.25
Eficiencia teórica de remoción	20%	5	1	5	1
Condiciones de operación	20%	2	0.4	5	1
Periodicidad de mantenimiento	10%	4	0.4	1	0.1
Facilidad de adquisición	10%	4	0.4	5	0.5
Vida útil	10%	4	0.4	1	0.1
Costo anual en insumos	5%	1	0.05	5	0.25
Total	100%	21	3.15	22	4.2

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

Como se puede observar en la **Tabla 32** en el promedio ponderado la adsorción tiene un puntaje casi de una unidad por encima de la evaporación como método de remoción. A pesar de que el sistema de evaporación requiere una manutención más prolongada su alto costo en la inversión inicial y el problema que trae consigo correspondiente a los desechos que salen en fase gaseosa que también deben ser sometidos a procesos posteriores de separación hacen este método no tan viable para las condiciones de este proyecto y por ende ponen a la adsorción por encima.

Puesto que en la normatividad colombiana la trazabilidad que se debe seguir para desechar este radionúclido está el decaimiento hasta llegar a los niveles de

dispensa establecidos en este apartado de igual manera se hará una revisión bibliográfica de esta forma de gestionar el desecho de ¹³¹I.

3.2 DECAÍMIENTO

La mayoría de procesos de separación de un radioisótopo, sean por adsorción o evaporación requieren posteriormente el uso de un sistema de tanques de decaimiento acorde a los resultados obtenidos en la separación, por eso el diseño de estos tanque hace parte del diseño total de un sistema de remoción propuesto y para este proyecto el no obtener resultados favorables en la adsorción generaría por consiguiente el presentar la propuesta diseñando únicamente los tanques de retención que cumplan con límites de vertimiento que pide la normatividad vigente en Colombia.

La estrategia de remoción por decaimiento consiste la implementación de un sistema de almacenamiento dispuesto en tanques donde se conservan los radioisótopos hasta que su actividad este en los límites de descargas ya sea de radio farmacias, industriales hospitalarias u otro oficio que implique el manejo de sustancias radiactivas. El diseño de estos tanques se basa en parámetros ceñidos a la ley de decaimiento universal según en el radioisótopo o los radioisótopos a tratar con este sistema, toma en cuenta caudales manejados, actividad esperada de los desechos, así como la normatividad vigente del vertimiento, entre otros parámetros que serán expuestos posteriormente. Comúnmente esta estrategia es combinada con una dilución que permita no saturar por actividad los tanques de decaimiento.

Para el desarrollo de un sistema de decaimiento debe ser tenido en cuenta el nivel de actividad de la muestra:

- Los residuos de baja actividad no requieren blindaje para su almacenamiento y transporte, pero para evitar la dispersión requieren sistemas de confinamiento.
- Residuos de actividad media requieren blindaje para su almacenamiento y transporte.
- Los residuos de alta actividad como puede ser el combustible gastado en una central nuclear necesitan estar refrigerados por su alta radiactividad y la generación de calor que esta conlleva.

3.3 ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso de separación en el cual es cargada agua a un reactor o columna junto un material adsorbente (generalmente carbón, activado, resinas y otros adsorbentes específicos), con la finalidad de separar compuestos orgánicos, inorgánicos e impurezas debido a la interacción de estas partículas con la superficie del adsorbente. Los parámetros que interfieren en el desarrollo del proceso son las

características físicas del adsorbente, los contaminantes envueltos y las condiciones de operación del proceso. Generalmente la eficiencia en adsorciones orgánicas es inversamente proporcional a la solubilidad del compuesto orgánico.⁷⁹

Por método de adsorción son distintos los materiales que se investigan y que se usan en la recuperación directa de estos radionúclidos. En el año 2010 fueron evaluadas soluciones de trampas de agua para recuperar el ¹³¹I y el ¹³⁷Cs, usando adsorbentes orgánicos e inorgánicos, siendo el adsorbente Fizkhimin granulado con base gel de sílice grueso porosa modificada con Ag y Ni el que mayor porcentaje de disminución de concentración obtuvo (<99%).⁸⁰ En 2002 se probó La adsorción de Yodo radiactivo en una columna cargada con polvo de platino como material adsorbente de una solución acuosa acidificada, obteniendo resultados por encima del 80% de adsorción.⁸¹

⁷⁹ STANDAR METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 23RD EDITION, APHA© AWWA© WEF©, P 1-49

⁸⁰KULYUKHIN, KONOVALOVA, RUMER, GORBACHEVA, y MIZINA RECOVERY OF ¹³¹I AND ¹³⁷Cs FROM A SOLUTION SIMULATING NPP TRAP WATERS. En: Radiochemistry, 2010, Vol. 52, No. 5, pp. 515–522.

⁸¹ BRAKER, A., MOET, F., VAN DERZWART, EERSELS,, HERSCHEID, J,. ADSORPTION OF RADIOIODINE ON PLATINUM: A FAST AND SIMPLE COLUMN METHOD TO OBTAIN CONCENTRATED AND PURE RADIOIODIDE IN EITHER WATER OR ANHYDROUS SOLVENTS. En: Applied Radiation and Isotopes, 2002, Vol. 57, pp 475–482

Tabla 33. Adsorbentes sólidos usados en la industria para la captura de ¹³¹I en fuentes líquidas y gaseosas

Adsorbente	Temperatura de Operación (°C)	Máximo Contenido de Yodo (mass%)
MOFs	75	55-75
Grafeno Aerogel	25	51
Grafeno Polvo	25	45
Chalcogel	25-60	54-71
Ag° Silica Aerogel	150-200	31
Pb° Faujasita (PbX)	150	30-40
Ag° Faujasita (AgX)	150	17
Ag° Modernite (AgZ)	150-200	10 – 17
AgNO ₃ Impregnada SiO ₂ (AgS)	130	10
AgNO ₃ Impregnada Al ₂ O ₃ (AgA)	130	6.2
Carbón Activado Granular	<120	1.5 Gas 20- 80 Líquido

Fuente: RILEY, Brian. VIENNA, John. STRACHAN, Denis. MCCLOY, John. JERDEN, JAMES. MATERIALS AND PROCESSES FOR THE EFFECTIVE CAPTURE AND IMMOBILIZATION OF RADIOIODINE: A REVIEW. En: Journal of Nuclear Materials 2016, pp 307 a 326.

3.3.1 Selección del Material Adsorbente. Como se observó en la **Tabla 33** son múltiples los materiales adsorbentes desarrollados e investigados para el control del yodo radiactivo en la industria; en la mayoría de los casos son usados materiales patentados y sintetizados bajo procesos de elevados costos y modificados principalmente con metales preciosos como la Plata (Ag) y el Platino (Pt). Esto dificulta en mayor medida la selección del material siendo el costo, la viabilidad de síntesis y el acceso comercial los principales ítems a tener en cuenta en la selección para este proyecto.

De manera comercial son las zeolitas y el carbón activado los materiales de mayor accesibilidad capaces de retener o ser preparados para retener el ¹³¹I.

3.3.1.1 Zeolitas. Se han investigado también el empleo de varias zeolitas con intercambio de metales para separar el yodo radiactivo, pero esta técnica se encuentra actualmente en la etapa de desarrollo⁸², esto debido a la poca especificidad de la zeolita con los no metales.

Las zeolitas naturales son aluminosilicatos formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros o por la alteración de vidrios volcánicos. Son varias las condiciones que interfieren en su formación como la temperatura, la presión, la presión parcial del agua y actividad iónica. Estas condiciones de formación y del medio son las que definen la especie de las zeolitas.

Se emplean en la remoción de metales pesados en efluentes de la industria minera y metalúrgica, es común usarla en el proceso de adsorción de vapor de mercurio, así como en el tratamiento de suelos con actividad radiactiva y de soluciones radiactivas producidas de las centrales nucleares.⁸³

A pesar de las características propias de la zeolita, la cual posee canales y cavidades porosas, cationes, diámetros de poro mínimos de 3 a 10 angstroms, un área superficial de 24,9 m²/g y su capacidad de intercambio iónico⁸⁴, su naturaleza ácida particular hace a la zeolita tener poca especificidad para la separación del yodo, necesiéndose de tratamientos de impregnación principalmente con plata (Ag) que aumenta los costos del uso de éste material, debido a los elevados costos en el mercado de compuestos como el Nitrato de Plata.

3.3.1.2 Carbón Activado. El carbón activado es una sustancia solida la cual se puede encontrar tanto en polvo como de manera granulada. Es de color característico negro y posee una las fuerzas de adsorción física más alta conocida debido a su porosidad adsorbente, debido a su alta área superficial específica que puede llegar hasta 1000 m²/g.⁸⁵

En cuanto a su conformación el carbón activado posee carbono entre un 87% y un 97%, entre el 13 % y el 3 % lo conforman hidrogeno, azufre y nitrógeno.⁸⁶

⁸² GESTIÓN DE LOS RADIONUCLEIDOS PROCEDENTES DE EFLUENTES GASEOSOS DE PLANTAS DE REELABORACIÓN, [en línea]. < https://www.iaea.org/sites/default/files/21105642331_es.pdf > [citado el 28 de agosto de 2019]

⁸³ ZEOLITES AND THEIR APPLICATION IN THE DECONTAMINATION OF MINE WASTEWATER, [en línea]. < https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017 > [citado el 5 de agosto del 2019]

⁸⁴ APLICACIÓN DE LAS ZEOLITAS NATURALES AL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE RESIDUOS.[en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/285589895_Aplicacion_de_las_zeolitas_naturales_al_tratamiento_biologico_de_residuos> [citado el 20 de septiembre de 2019]

⁸⁵ Production of Activated Carbon from Palm Oil Shell Waste and Its Adsorption Characteristics., 2006 pág. p.1

⁸⁶ Olson KR. Activated charcoal for acute poisoning, DOI: 10.1007/s13181-010-0046-1. 2010 pág. p.2

Entre las aplicaciones industriales del carbón activado se encuentran el uso en sectores de alimentación, procesos químicos y farmacéuticos. Específicamente se usan para separación de contaminantes orgánicos en tratamientos de agua potable, para separación de gases o recuperar disolventes. Es usado de igual forma en la industria nuclear para descontaminación de ambientes radiactivos.⁸⁷

3.3.2 Selección. Según la **Tabla 34** a pesar de que los costos de la Zeolita son más bajos por kg en el mercado, la principal desventaja es la no especificidad propia de la zeolita con el ¹³¹I, haciendo necesaria la impregnación desde el principio y eliminando la posibilidad de comparar una adsorción propia del material con una después de realizar la modificación, el cual fue planteado en la delimitación. Los costos altos por los tipos de compuestos usados en la impregnación también constituyen una limitación, las repeticiones por experimentación aumentarían el valor por encima del proyectado para este proyecto.

Tabla 34. Comparación entre el Carbón Activado y la Zeolita.

Característica\ Material	Carbón Activado	Zeolita
Afinidad con el ¹³¹ I	Sí	NO (es necesaria la impregnación)
Precio en el mercado	\$ 10.000 - \$ 20000 COP / KG Facilidad comercial de conseguir en cantidades pequeñas. Fuente: Biocidas y Químicos S.A.S. Carbón de origen vegetal.	Se consigue en mayor medida sólo en altas cantidades, es decir desde los 10 kg en adelante. \$ 70.000 / 20 kg Zeolita Mineral Purikor. El valor y la facilidad comercial depende de la especie de la zeolita, muchas especies no existen en Colombia.
Impregnación	NaOH ZnCl ₂ Ag	Au Ag Pt
Aumento en costos por impregnación	Nitrato De Plata, Acs, 99.9+%, 100g \$ 812.500 Importado. Chemsav. NaOH 99% sólido por 1 kg \$ 30.000	Nitrato De Plata, Acs, 99.9+%, 100g \$ 812.500 Importado. Chemsav.

Fuente: Elaboración propia.

⁸⁷ Application Of iron impregnated activated carbon for removal of arsenic from water, 2010 pág. p.1

La selección del material como se mencionó estuvo sujeta a las limitaciones por acceso comercial (costo y existencia en el país) así como la viabilidad experimental, esto debido a que algunos tipos de síntesis o de impregnaciones como la de Plata requieren equipos especializados y un alto control en el laboratorio.

Para el caso del carbón activado los costos siguen siendo bajos, levemente más altos comparados con algunos tipos de zeolita, existiendo una oferta comercial que permite seleccionar el carbón más acorde para realizar la experimentación. La capacidad del carbón de ser afín a los isotopos del yodo ofrece la oportunidad de plantear una experimentación con y sin impregnación para posteriormente comparar la eficiencia en la adsorción. Teniendo la impregnación como ítem a evaluar este material ofrece la oportunidad de evaluar la impregnación con compuestos de uso común y no solo con metales preciosos.

En base a este planteamiento se decidió el uso del carbón activado de origen vegetal como material adsorbente para la experimentación.

3.3.3 Carbón Activado para la adsorción de Radioisótopos del Yodo. Según estudios el carbón activado es capaz de adsorber y absorber los radioisótopos del Yodo no sólo con la finalidad de eliminarlos sino también de cuantificarlos por medio de técnicas como la espectrometría gamma debido a su capacidad de retención. Estas capacidades se ven maximizadas por los tratamientos de impregnación a los que el carbón activado es sometido, en los cuales por medio de otros elementos y compuestos se busca aumentar la especificidad. En los procesos de la industria nuclear se usa para adsorber yodo radiactivo, siendo ^{129}I y ^{131}I los más comunes.

En el trabajo de grado titulado “Propuesta de un sistema para la remoción de ^{131}I en vertimientos líquidos de una unidad sanitaria de medicina nuclear empleando ^{127}I como patrón de referencia” se realizó una caracterización de los carbones activados comerciales capaces de retener el Yodo. En la **Tabla 35** se muestran tres tipos de carbón activado.

Tabla 35. Especificaciones Técnicas de los Carbones Activados.

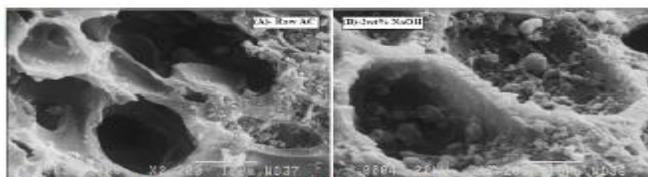
Hydraffin 30 N	
Granulometría (mm)	0.6 – 2.36
Densidad aparente (kg/m ³)	470 ± 50
Contenido de humedad (wt. %)	< 5
Adsorción de yodo (mg/g)	1000 ± 50
Hydraffin 40 N	
Granulometría (mm)	0.4 – 1.7
Densidad aparente (kg/m ³)	480 ± 30
Contenido de humedad (wt. %)	< 5
Adsorción de yodo (mg/g)	1000 ± 50
CGC impregnado en plata	
Granulometría (mm)	0.6 – 2.3
Densidad aparente (g/ml)	0.45 mínimo
Contenido de humedad (%)	8 máximo
Número de Yodo (mg I ₂ /g CA)	800 mínimo

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

3.3.4 Impregnación de Carbón Activado. La impregnación es una técnica que nos permite mejorar las propiedades del carbón activado, como se mencionó anteriormente, modificando su estructura interna y mejorando su capacidad de retención.

Para un estudio de impregnación se utilizó microscopía electrónica de barrido para observar los poros sin ningún proceso de impregnación, como se muestra en la **Imagen 52 (A)**, según el estudio más del 50% del ¹³¹I fue atrapado en poros de tipo micro, meso y macro. Posteriormente se compara la estructura interna después de impregnación, **(B)** a una concentración adecuada del 2% de NaOH permite observar mayor nivel de absorción y adsorción en los poros llegando a ser esta del 99,65%.

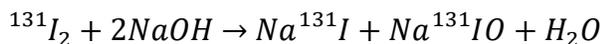
Imagen 52 Retención de ¹³¹I en Carbón activado usando Microscopía electrónica de barrido antes (A) y después de un proceso de impregnación (B).



Fuente: MAGHSOUD, Gourani. ASGHA, Sadighzadeh. FARHANG, Mizani. Effect of impregnating materials in activated carbon on Iodine -131 removal efficiency, 10-Apr-2015. DOI: 10.4103/0972-0464.154882

Varios compuestos y sustancias químicas para impregnación se han estudiado tales como $ZnCl_2$, Ag y NaOH, estos estudios han demostrado que la mejor sustancia para remover yodo radiactivo es NaOH al 2% presentado un 46% de aumento en la eficiencia por encima $ZnCl_2$ y otros. Se evidencia en la **Ecuación 10**.

Ecuación 10. Reacción de adsorción de Yodo



Fuente: EFFECT OF IMPREGNATING MATERIALS IN ACTIVATED CARBON ON IODINE -131 REMOVAL EFFICIENCY, 2014 pág. p.3

Donde el ^{131}I sumado a dos moléculas de hidróxido de sodio reaccionan formando yoduro de sodio ($Na^{131}I$), más yodito de sodio y agua ($Na^{131}IO + H_2O$). Esta reacción maximiza el proceso de adsorción mejorando las capacidades debidas a las características propias de adsorción del carbón activado, y permite obtener una eficiencia del 99.65% de retención de yodo.⁸⁸

3.3.5 Cálculo de la actividad específica y de concentración a tratar. En la medicina el yodo radioactivo (suministrado en forma de NaI-131) se usa para contrarrestar algunas enfermedades de la glándula tiroides como el hipertiroidismo o el cáncer. De la dosis total suministrada para el tratamiento cerca del 80 % es eliminado por el cuerpo a partir de las 24 horas del inicio del tratamiento y durante los siguientes días. Del total de ^{131}I eliminado en los días posteriores el 90% se elimina por medio de la orina y el 10 % restante se elimina por medio de la saliva, la sudoración y la materia fecal.⁸⁹

Teniendo presente el comportamiento de la forma en que el cuerpo elimina el ^{131}I necesario conocer la concentración a tratar por medio del sistema de remoción a plantear. Para ello se parte del cálculo de la actividad específica (SA), la cual se define como la actividad por unidad de masa, por ejemplo, Bq/g o Ci/g. Sí el cálculo se realiza para un radionúclido puro la SA está determinada por constante de decaimiento (λ), la vida media (T), el número de átomos por gramo del núclido (N) $=6,02 \times 10^{23}$ y la masa atómica (M).⁹⁰

La **Ecuación 11** muestra el cálculo de la actividad específica:

⁸⁸ MAGHSOUD, Gourani. ASGHA, Sadighzadeh. FARHANG, Mizani. Effect of impregnating materials in activated carbon on Iodine -131 removal efficiency, 10-Apr-2015. DOI: 10.4103/0972-0464.154882

⁸⁹ Cavalieri RR. IODINE METABOLISM AND THYROID PHYSIOLOGY: CURRENT CONCEPTS. Thyroid 1997;7:177-81.

⁹⁰ J. Turner E., RADIATION AND RADIATION PROTECTION, Germany: Wiley Verlag GmbH & Co., (2007).

Ecuación 11 Actividad Específica.

$$SA = \frac{6,02 \times 10^{23} \lambda}{M * T} = \frac{4,17 \times 10^{23}}{MT}$$

Fuente: J. Turner E., RADIATION AND RADIATION PROTECTION, Germany: Wiley Verlag GmbH & Co., (2007).

Se procede a calcular la actividad específica del ^{131}I con una vida media $T=8,04$ días y una masa atómica $M= 131$ g/mol.

$$SA(^{131}\text{I}) = \frac{4,17 \times 10^{23}}{131 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 8,04 \text{ días} * \left(\frac{24\text{horas}}{1\text{día}}\right) * \left(\frac{3600\text{s}}{1\text{hora}}\right)}$$

$$SA(^{131}\text{I}) = 4,58 \times 10^{15} \text{Bq/g}$$

Según bibliografía médica el aproximado de actividad promedio suministrada es de $5,55 \times 10^9$ Bq o 5,55 GBq, y conociendo que el 80% es eliminado por el cuerpo, se calcula (4) la actividad total a remover (At).

$$A = 5,55 \times 10^9 \text{ Bq} * 0,8$$
$$A = 4,44 \times 10^9 \text{ Bq} = 4,44 \text{ GBq}$$

Por último, se usa la actividad específica del ^{131}I previamente calculada y la actividad eliminada por paciente para hallar el equivalente en masa (M_I) usando la **Ecuación 12**.

Ecuación 12 Equivalente en masa

$$M_I = \frac{A}{SA^{131}\text{I}}$$

$$M_I = \frac{4,44 \times 10^9 \text{ Bq}}{4,58 \times 10^{15} \text{Bq/g}}$$

$$M_I = 9,69 \times 10^{-7} \text{g}$$

Se determinó entonces que por paciente se deben tratar $9,69 \times 10^{-7}$ g de desechos con una actividad equivalente a $4,44 \times 10^9$ Bq, cálculo que posteriormente se hace necesario en la práctica experimental, así como en el diseño de la propuesta de tratamiento a nivel de los generadores.

3.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN Y AGITACIÓN

A continuación, se describen los métodos usados en el desarrollo de la primera parte de la experimentación para determinar los tiempos de agitación y estabilización con el objetivo final de construir las isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich para evaluar el comportamiento de adsorción del ^{127}I en carbón activado Hydriffin 40N y en carbón activado impregnado por medio de NaOH. Todos los materiales divididos en materia prima y equipos son presentados en el **ANEXO E**.

3.4.1 Impregnación de Carbón activado con NaOH. El pretratamiento realizado al carbón activado se hizo con el fin de aumentar el área superficial el carbón y así poder evaluar un posible aumento en la eficiencia para la remoción de ^{127}I en líquidos, ya que se ha evaluado su uso solo para corrientes gaseosas.⁹¹

El carbón activado fue expuesto a una solución preparada de 500 ml de NaOH al 2% masa durante 15 minutos, posteriormente se llevó a filtración al vacío para separar el carbón.

Posterior a la impregnación el carbón activado debe ser reactivado por un proceso térmico, la reactivación del carbón se hizo en un horno (Imagen 53) a 60°C por un tiempo de 6 horas.

⁹¹ CADENA, Daniel. ELABORACIÓN DE FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DEL YODO MOLECULAR 131 EN EL ÁREA DE MEDICINA NUCLEAR DEL HOSPITAL ANDRADE MARÍN. Trabajo de grado Biofísico. Riobamba, Ecuador. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Facultad de ciencias. [en línea]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6187/1/86T00037.PDF> [citado el 3 de septiembre de 2019]

Imagen 53. Horno para la reactivación del carbón impregnado usado a 60° C



Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Metodología. Con el fin de evaluar la capacidad de adsorción de cada uno de los carbones activados se partió por el siguiente experimento; se preparó una solución sobre 200mL de agua destilada (disolvente) usando como soluto el yoduro de potasio (^{127}I)⁹², posterior a esto se agregaron 2 gramos de carbón activado. Se realizaron 3 repeticiones por experimento bajo las mismas condiciones que se exponen en la **Tabla 36**. Especificación de las soluciones para adsorción de ^{127}I , la temperatura ambiente medida fue de 18°C. Cada experimento se realizó tanto para el carbón activado Hydraffin 40 N como para el carbón activado impregnado con NaOH.

Imagen 54. Esquema de preparación de muestras.



Fuente: elaboración propia

Tabla 36. Especificación de las soluciones para adsorción de ^{127}I

Hydraffin 40 N				C.A. impregnado NaOH			
Experimento	M_{KI} (g)	M_{CA} (g)	$V_{\text{H}_2\text{O}}$ (ml)	Experimento	M_{KI} (g)	M_{CA} (g)	$V_{\text{H}_2\text{O}}$ (ml)
1	6,0	2,0	200	1	6,0	2,0	200
2	6,0	2,0	200	2	6,0	2,0	200
3	6,0	2,0	200	3	6,0	2,0	200

Fuente: elaboración propia

Al ser preparadas las soluciones por experimento se procedió a realizar el análisis del tiempo de agitación y estabilización para la adsorción en carbón activado. Para esto cada solución fue sometida a una agitación a 125 rpm durante 50 minutos a

⁹² QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ^{131}I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ^{127}I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

temperatura ambiente. Los parámetros de medida escogidos para el análisis de estabilización fueron la conductividad eléctrica (CE) y el potencial de hidrógeno (pH) medidos en periodos de 10 minutos.

3.4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

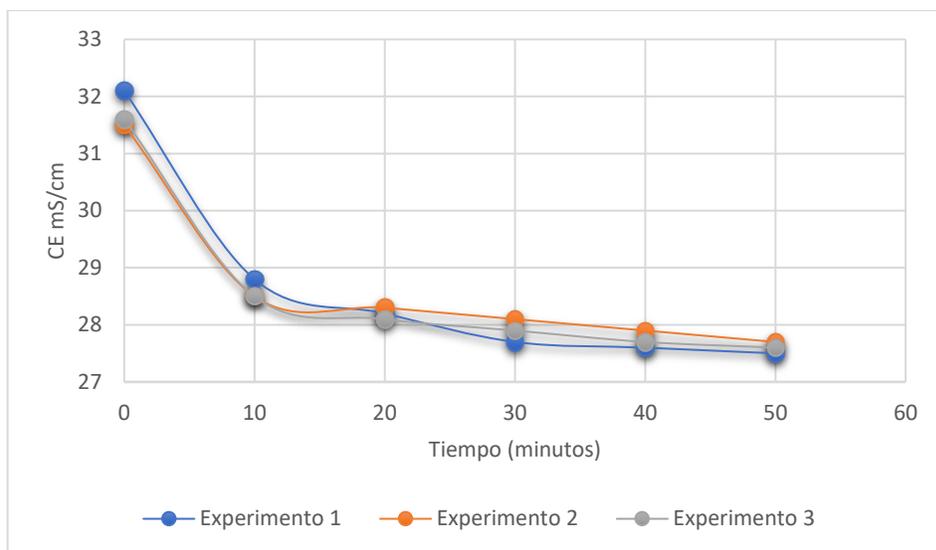
3.4.3.1 Carbón Activado Hydraffin 40 N. En la **Tabla 37** son expuestos los resultados de las mediciones obtenidas de los dos parámetros por experimento para el carbón sin impregnación.

Tabla 37. Resultados de medición para el Carbón Activado hydraffin 40 N

Tiempo	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	pH	CE mS/cm	pH	CE mS/cm	pH	CE mS/cm
0	8,90	32,1	8,92	31,5	8,91	31,6
10	11,32	28,8	11,41	28,5	11,35	28,5
20	11,28	28,2	11,37	28,3	11,28	28,1
30	11,24	27,7	11,33	28,1	11,25	27,9
40	11,20	27,6	11,32	27,9	11,23	27,7
50	11,19	27,5	11,25	27,7	11,2	27,6

Fuente: elaboración propia.

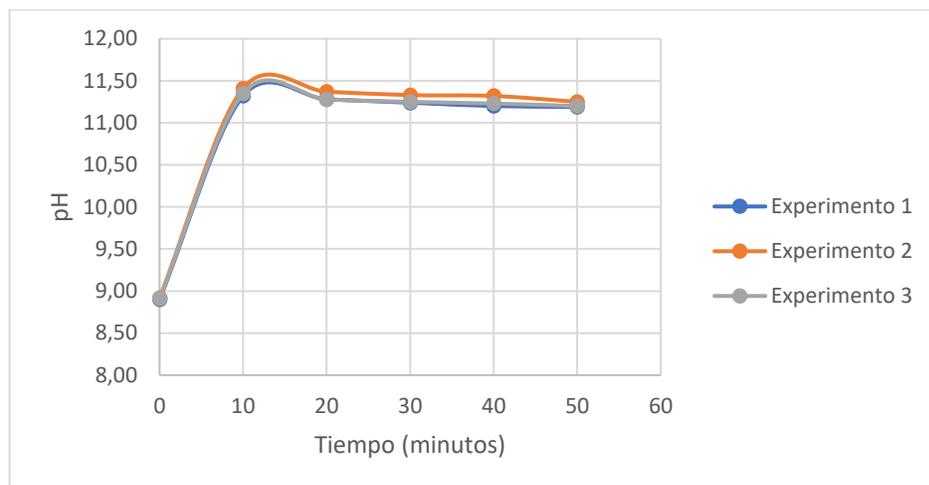
Gráfica 7. Variación de la conductividad eléctrica respecto al tiempo



Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 37** se puede observar la variación de la conductividad eléctrica en Ms/cm medida en intervalos de 10 minutos respecto al tiempo, en un medio líquido ésta se relaciona con la presencia de sales en la solución, es decir, para el caso de estudio es una medida de comportamiento del yoduro de potasio en a la solución; como se evidencia mientras la concentración de sal disminuye en la solución la medida de conductividad disminuye también, lo cual permite inferir que hay una adsorción. Esta disminución ocurre entre los 0 y 20 minutos en medio de los cuales la conductividad alcanza una estabilidad y deja de cambiar, permitiendo definir este rango como un tiempo acorde de agitación.

Gráfica 8. Variación del pH respecto al tiempo



Fuente: elaboración propia.

El segundo parámetro analizado y medido en la primera parte de experimentación fue el pH ya que este permite medir la alcalinidad presentada por el aumento o disminución de la sal de yoduro de potasio. En la **Gráfica 8** se logra evidenciar como a medida que aumenta la concentración de sal en la solución el pH aumenta hasta estabilizarse a los 20 minutos en un rango de pH entre 11,5 y 11.

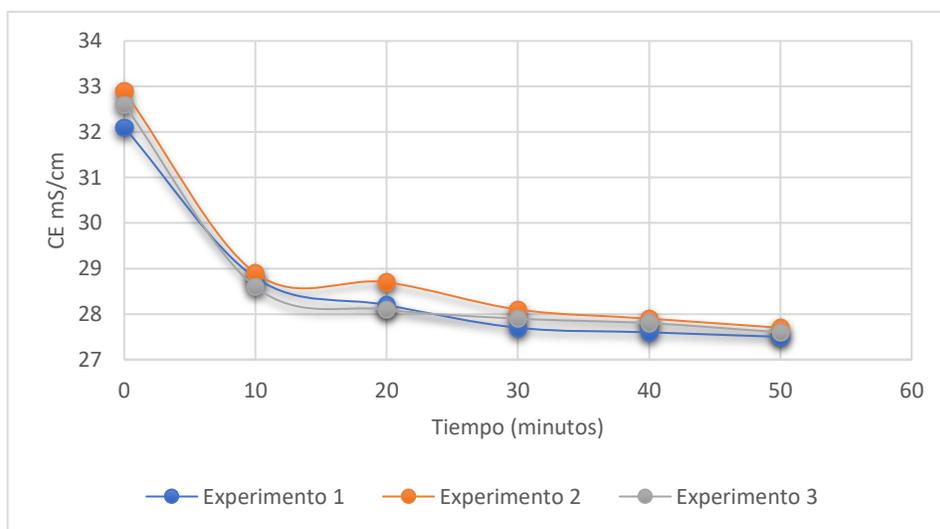
3.4.3.2 Carbón Activado impregnado con NaOH. Siguiendo la metodología propuesta se repitió la experimentación usando como adsorbente el carbón previamente impregnado con NaOH, en la **Tabla 38** se exponen los resultados obtenidos para la medición de los parámetros de análisis.

Tabla 38. Resultados obtenidos en los 3 experimentos de estabilización y tiempo de agitación para el CA impregnado en NaOH

	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
Tiempo	pH	CE mS/cm	pH	CE mS/cm	pH	CE mS/cm
0	9,30	33,1	9,34	32,9	9,28	32,6
10	11,9	29,5	11,87	28,9	11,92	28,6
20	11,71	29,4	11,78	28,7	11,91	28,1
30	11,65	29,6	11,7	28,1	11,86	27,9
40	11,50	29,3	11,68	27,9	11,85	27,8
50	11,45	29,0	11,67	27,7	11,8	27,6

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 9. Variación de la conductividad eléctrica respecto al tiempo para el carbón activado impregnado en NaOH

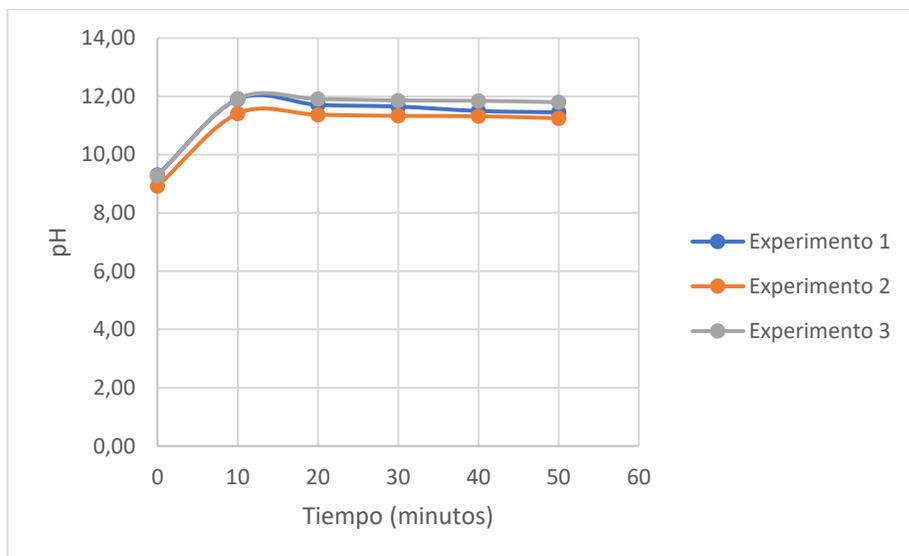


Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 9** se muestra el cambio de la conductividad eléctrica durante los 50 minutos de agitación, el comportamiento de la adsorción es muy similar al del carbón sin impregnación, se observa una estabilización del parámetro medido entre los 10 y 20 minutos de agitación. La adsorción ocurre entonces dentro de los primeros 20

minutos, demostrado por la caída de la conductividad que responde a la disminución de concentración de sal en la solución. El comportamiento de los 3 experimentos es muy similar disminuyendo el % de error y garantizando un patrón de comportamiento.

Gráfica 10. Variación del pH respecto al tiempo para la adsorción por medio de carbón activado impregnado con NaOH



Fuente: elaboración propia.

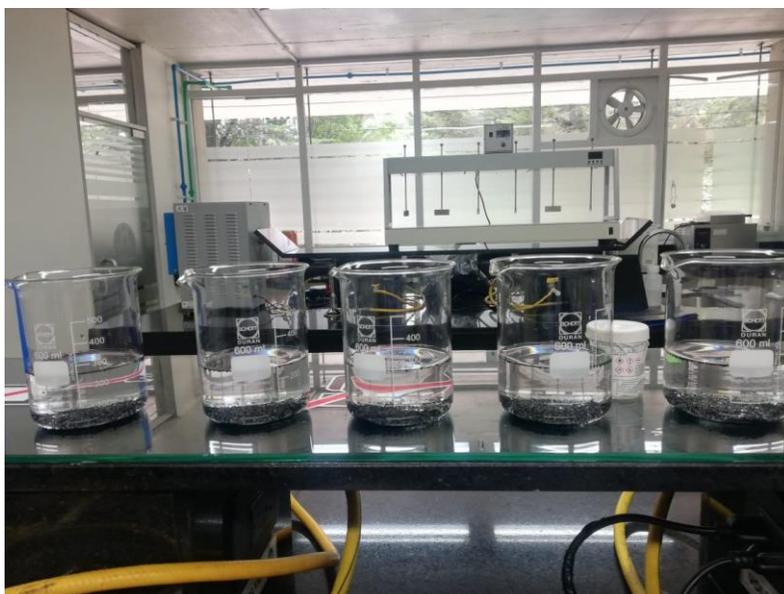
En la **Gráfica 10** se presentan los resultados para el comportamiento del pH durante la adsorción de ^{127}I en carbón activado impregnado, respecto al pH de partida es posible ver que la solución es un poco más básica que la analizada en la adsorción de carbón activado sin impregnar (véase **Gráfica 8**), esto puede deberse al carácter alcalino del adsorbente usado para este experimento en cuestión. De igual manera el tiempo de agitación y estabilización acorde se evidencia de nuevo entre los 10 y 20 minutos.

3.5 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN. GRAVIMETRÍA

Basados en los análisis y desarrollos experimentales previamente expuestos se determinó el tiempo de 20 minutos con una agitación a 125 rpm, usando 2g de carbón activado, como los parámetros fijos para la prueba de adsorción. Todo el experimento se desarrolló a temperatura ambiente, que para el momento del análisis fue de 18° C. La finalidad de este experimento es poder determinar el porcentaje de remoción para cada uno de los carbones activados usados por medio de prueba de gravimetría.

3.5.1 Metodología. Se prepararon 5 soluciones a diferentes concentraciones de yoduro de potasio como soluto sobre 200 mL de agua destilada como disolvente por experimento, en la imagen 52 se ven las soluciones preparadas para cada repetición. Posteriormente se usaron 2g de carbón activado como adsorbente. La **Tabla 39** muestra las especificaciones de preparación de cada solución, el experimento se desarrolló por completo usando ambos carbones activados por separado, por un lado, el carbón activado sin impregnar y por otro lado el carbón activado impregnado con NaOH. Se realizaron 3 repeticiones por experimento y por tipo de carbón.

Imagen 55 Soluciones a distintas concentraciones de sal de yoduro de potasio con Carbón activado como adsorbente.



Fuente: elaboración propia.

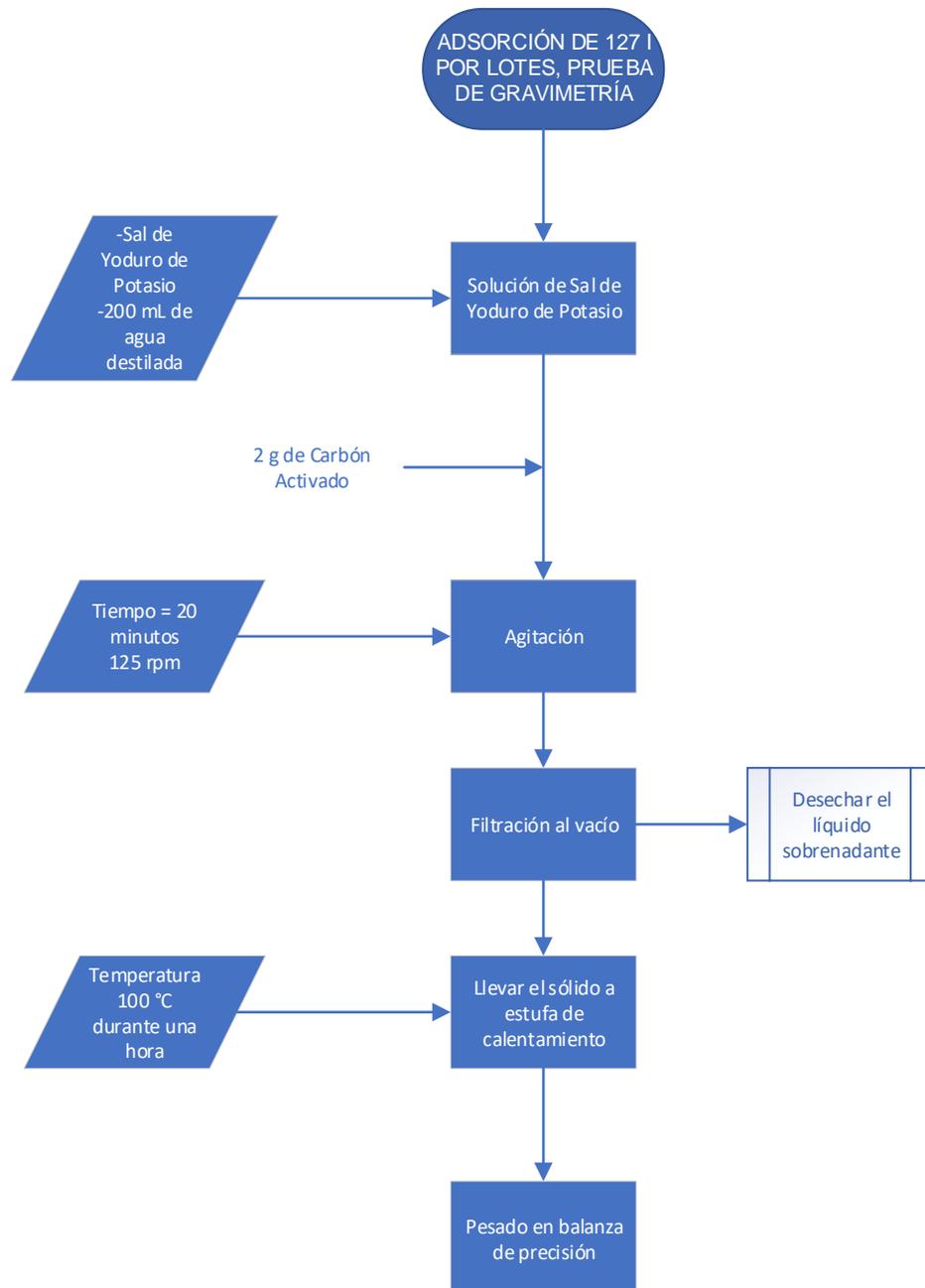
Tabla 39. Especificación de las soluciones preparadas por experimento para la adsorción

	masa KI (g)	m Carbón Activado (g)	V H2O (ml)	Ci (g/L)
Solución 1	1	2	200	5
Solución 2	1,5	2	200	7,5
Solución 3	3	2	200	15
Solución 4	5	2	200	25
Solución 5	7	2	200	35

Fuente: elaboración propia.

Preparadas las soluciones se prosiguió a realizar todo el experimento, el cual es explicado en el **Diagrama 9**.

Diagrama 9 Diagrama de Flujo para el experimento de adsorción de ^{127}I por lotes, PRUEBA DE GRAVIMETRÍA



Fuente: elaboración propia.

Las pruebas gravimétricas deben realizarse en una balanza de precisión que permita una disminución del error en el cálculo de la masa de ^{127}I adsorbido.

3.5.2 Resultados y Análisis. A continuación, son presentados los resultados obtenidos en las pruebas de adsorción por lotes para cada uno de los tipos de carbón activado usados.

3.5.2.1 Remoción del Carbón Activado Hydraffin 40 N. En la **Tabla 40** son expuestos los resultados para cada uno de los experimentos de adsorción sobre los valores de concentración de la solución de yoduro de potasio.

Tabla 40. Resultados de retención prueba de gravimetría para el C.A. Hydraffin 40N

Masa de KI (g)		1	1,5	3	5	7
Masa retenida (g)	Experimento 1	0,503901	1,000027	1,223863	1,754612	2,170720
	Experimento 2	0,512524	0,997985	1,276789	1,689561	2,284873
	Experimento 3	0,499896	1,015467	1,224897	1,456345	2,253971
% de retención	Experimento 1	50,39	66,67	40,80	35,09	31,01
	Experimento 2	51,25	66,53	42,56	33,79	32,64
	Experimento 3	49,99	67,70	40,83	29,13	32,20

Fuente: elaboración propia.

La experimentación permitió mostrar retención del ^{127}I en un carbón activado sin impregnación, los valores son consecuentes a bibliografía expuesta al principio de este capítulo donde según RILEY, Brian 2016 el carbón activado presentaba porcentajes de remoción entre el 20% y el 80% para isotopos del yodo.

La **Tabla 40** permite evidenciar la influencia del aumento en la concentración de yodo sobre la adsorción, como la teoría la expresa a mayor concentración se favorece en menor medida el porcentaje de remoción, esto es posible observarlo en las soluciones entre 1,5 g y 7 g donde a mayor concentración menor es el porcentaje de remoción sobre una misma cantidad de adsorbente no variable. De igual forma es posible plantear la hipótesis de que la disminución de la concentración a órdenes por debajo de 1g afecta el porcentaje de retención, haciendo más difícil la separación de radioisótopos del yodo. Esto podría probar las dificultades presentadas a la hora de tratar descargas contaminadas con altos niveles de radiación a nivel generadores pero que su equivalente en peso es menor a los órdenes de $1 \times 10^{-8}\text{g}$.

El mayor porcentaje de remoción evidenciado es para la solución de 1,5g de sal de yoduro de potasio en donde para el experimento 3 se obtuvo un porcentaje de 67,70% de sal retenida, es decir muy cerca de los $\frac{3}{4}$ de sal total retenida, siendo este un valor muy favorable para las pruebas llevadas a cabo.

3.5.2.2 Remoción del Carbón Activado impregnado con NaOH. En la **Tabla 41** se muestran los resultados correspondientes a la adsorción llevada a cabo con carbón activado modificado por medio de una impregnación de NaOH.

Tabla 41. Resultados de retención prueba de gravimetría para el C.A. impregnado con NaOH

		Gravimetría				
Masa de KI (g)		1	1,5	3	5	7
	Experimento 1	0,714489	1,195679	1,469089	1,834612	2,294530
Masa retenida (g)	Experimento 2	0,701234	1,17459	1,498713	1,989561	2,295579
	Experimento 3	0,728987	1,21976	1,545679	1,978678	2,305678
	Experimento 1	71,45	79,71	48,97	36,69	32,78
% de retención	Experimento 2	70,12	78,31	49,96	39,79	32,79
	Experimento 3	72,90	81,32	51,52	39,57	32,94

Fuente: elaboración propia.

El desarrollo del experimento permitió evidenciar que la impregnación por medio de NaOH es afín al radio yodo también en corrientes líquidas y no solo para corrientes gaseosas donde ya se había probado. Como se observa en la **Tabla 41** para todas las soluciones hubo adsorción, obteniendo resultados que mejoran la eficiencia en la retención comparado con el carbón activado hydriffin 40 N (**Tabla 42**).

Al comparar el experimento 3, sobre la solución de 1,5g de sal se obtiene que se superan los porcentajes de retención medidos según la bibliografía para una

adsorción usando un carbón activado impregnado con Plata, material con alta afinidad por el yodo radiactivo. El costo bajo de la impregnación por medio de NaOH hace favorable el resultado de la experimentación.

El comportamiento de la adsorción para este caso presenta un patrón similar al del carbón Hydrffin 40N, en el cual se evidencia como la concentración de sal interfiere sobre el porcentaje de remoción usando la misma cantidad de material adsorbente invariable. El aumento en la concentración de yoduro de potasio desfavorece el proceso de adsorción.

Tabla 42. Comparativa de los porcentajes de adsorción por tipo de carbón activado

Masa de KI (g)		1 g	1,5 g	3 g	5 g	7 g	
Porcentajes de adsorción	Hydrffin 40 N	Experimento 1	50,39	66,69	40,80	35,09	31,01
		Experimento 2	51,25	66,53	42,56	33,79	32,64
		Experimento 3	49,99	67,70	40,83	29,13	32,20
	Impregnado con NaOH	Experimento 1	71,45	79,71	48,97	36,69	32,78
		Experimento 2	70,12	78,31	49,96	39,79	32,79
		Experimento 3	72,90	81,312	51,52	39,57	32,94
	H 40 N		50,54	66,97	41,40	32,67	31,95
	Promedio del porcentaje de adsorción						
	Impregnado con NaOH		71,49	79,78	50,15	38,69	32,84
Diferencia del porcentaje adsorción promedio		20,95	12,81	8,76	6,02	0,89	

Fuente: elaboración propia.

El aumento en la eficiencia de remoción es posible evidenciarla en la **Tabla 42** que permite comparar los porcentajes de adsorción obtenidos por experimento para cada tipo de carbón y para cada concentración de sal, es posible determinar que la impregnación con NaOH del carbón activado influye en la retención del radio yodo aumentando la eficiencia adsorción en soluciones de bajas concentraciones entre el 12% y el 21% por encima del carbón activado sin impregnación. Esto se puede explicar por medio de la reacción explicada en la que se forma yoduro de sodio.

3.6 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La adsorción es un fenómeno fisicoquímico de suma importancia en donde existen diferentes modelos para caracterizar la adsorción de un fluido sobre una superficie sólida, así como la adsorción de gases en una superficie sólida. Como se explicó en la bibliografía la cantidad de material adsorbido en un sistema depende de la temperatura y la concentración del adsorbato. Si durante el desarrollo experimental la temperatura se mantiene constante, el grado de adsorción puede estudiarse como función de la concentración y generar así lo que se conoce como la isoterma de adsorción.

Las isotermas de adsorción son la forma más habitual de representar el equilibrio de adsorción, el cual es alcanzado mediante la relación de cantidad adsorbida y la concentración en fase líquida. Múltiples modelos de adsorción han sido publicados en la literatura para determinar el comportamiento de un proceso de adsorción y de los datos experimentales obtenidos siendo los modelos de Langmuir y de Freundlich dos modelos conocidos y ampliamente usados.⁹³

Para el caso del desarrollo experimental realizado se escogieron entonces los modelos de Langmuir y de Freundlich para determinar si alguno de estos dos modelos representa de manera acertada el proceso llevado a cabo para separar ¹²⁷I en carbón activado tanto sin impregnar como para el carbón impregnado.

3.6.1 Isotherma de Langmuir. La ecuación de Langmuir fue establecida sobre consideraciones cinéticas para describir la adsorción de gases sobre sólidos. Esta ecuación fue derivada para los sistemas líquido-sólido. El modelo se basa sobre tres hipótesis: la adsorción ocurre sobre una sola capa del adsorbente; las energías de adsorción son distribuidas de manera homogénea sobre toda la superficie del adsorbente y no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas.⁹⁴

$$q = \frac{q_{max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}}$$

Donde:

q= Cantidad adsorbida por gramo de adsorbente (g/g)

q_{max}= Máxima capacidad de adsorción bajo las condiciones dadas

b= Coeficiente de relación entre el adsorbato y el adsorbente

C_{eq}= Concentración de la solución en equilibrio (mol/L)

⁹³ SUPERFICIES SÓLIDAS: ADSORCIÓN Y CATÁLISIS HETEROGÉNEA. Universidad de Valencia. [en línea] <https://www.uv.es/tunon/pdf_doc/Superficies_Solidas_A.pdf> [citado el 25 de enero de 20220]

⁹⁴ EQUILIBRIO DE BIOSORCIÓN DE PLOMO (II) Y CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FT-IR Y SEM-EDAX EN ALGA *Ascophyllum nodosum*, [en línea], <<http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v81n3/a06v81n3.pdf>>, [citado el 15 de octubre de 2019]

La ecuación de Langmuir puede ser linealizada de la siguiente manera:⁹⁵

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{b} + \frac{1}{bq_{max}} \left(\frac{1}{C_{eq}} \right)$$

Esta ecuación sigue la forma de la ecuación de la recta $y=mx+b$. Al graficar $1/q$ en el eje y frente a $1/C_{eq}$ en el eje x se puede determinar si el modelo Langmuir es capaz de representar el desarrollo experimental de adsorción llevado a cabo. Las constantes b y q_{max} pueden ser evaluadas por medio del intercepto y la pendiente.

3.6.2 Isoterma de Freundlich. El modelo de Freundlich, es una ecuación empírica donde se tiene como principio que debido a que la mayoría de las superficies de adsorción son heterogéneas, existen múltiples sitios disponibles para la adsorción, es decir, el calor de adsorción varía entre un sitio y otro.⁹⁶ Para este modelo no existe un límite máximo de adsorción y muestra una distribución exponencial de sitios activos. La ecuación que describe el modelo de Freundlich es la siguiente:⁹⁷

$$q = K_F C_{eq}^{1/n}$$

Donde:

q = Cantidad adsorbida por gramo de adsorbente (g/g)

C_{eq} = Concentración de la solución en equilibrio (mol/L)

K_f = Constante de la capacidad de adsorción

n = Constante indicativa de la intensidad de adsorción.

Un rango de n entre 2 y 10 representa una buena intensidad de adsorción.

El modelo de Freundlich puede ser linealizado al graficar $\log(q_e)$ Vs $\log(C_e)$, y su ecuación que sigue el modelo lineal es la siguiente:

$$\log(q) = \log K_f + \frac{1}{n} \log C$$

Las constantes de capacidad y de adsorción K_f y n pueden ser determinadas usando el intercepto y la pendiente de la ecuación de la recta, respectivamente.

⁹⁵ HARTANI, Khaled. ALSOUSY, Khaled. AILA, Hisham. Studies of the adsorptive decoloration of aqueous solutions by MDFSD. En: Arabian Journal of Chemistry. (2011)

⁹⁶ RIVAS, Carlos. NUÑEZ, Oswaldo. LONGORIA, Francisco. GONZALEZ, Lucy. ISOTERMA DE LANGMUIR Y FREUNDLICH COMO MODELOS PARA LA ADSORCIÓN DE COMPONENTES DE ACIDO NUCLEICO SOBRE WO_3 . En: Revista Saber, Universidad de Oriente Venezuela. Vol 26. No 1 pp. 43-49 (2014)

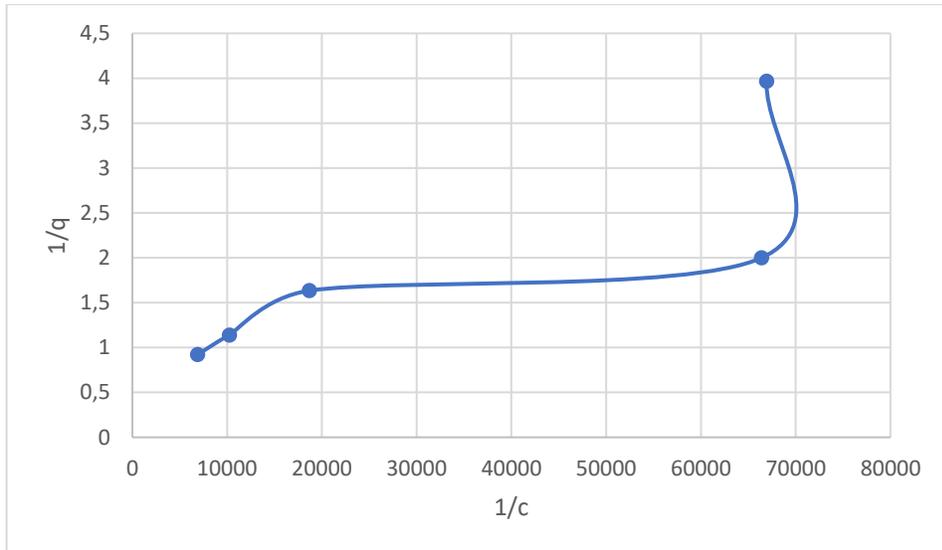
⁹⁷ FIGUEROA, Danilo. MORENO, Anderson. HORMZA, Angelina. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín

3.6.3 Resultados y análisis. Se realizó el modelamiento de ambas isothermas para los 3 experimentos realizados con la finalidad de analizar un posible comportamiento del tipo de adsorción llevada a cabo en la experimentación. Se decide linealizar las isothermas para evidenciar si alguno de los modelos representa el experimento de adsorción desarrollado en el capítulo.

3.6.3.1 Isothermas para el carbón activado hydraffin 40N

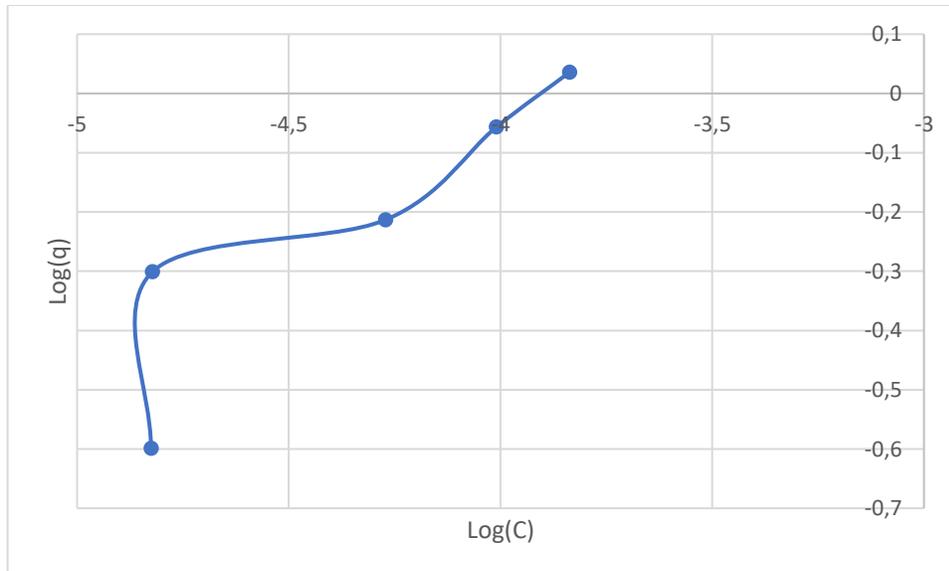
Experimento 1.

Gráfica 11. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 1.



Fuente: elaboración propia.

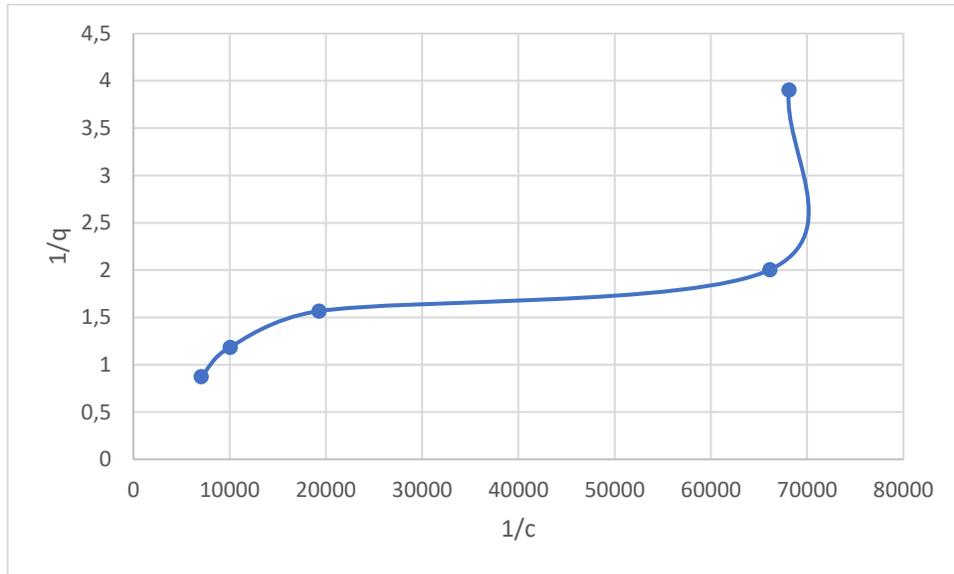
Gráfica 12. Isoterma de Freundlich linealizada para el carbon Hydraffin 40N a 18°C en el experimento 1.



Fuente: elaboración propia.

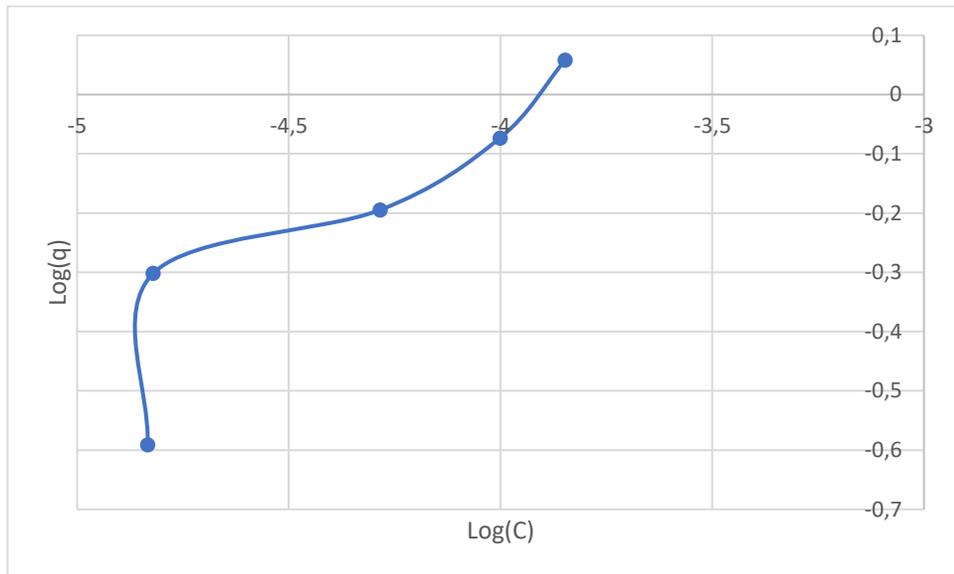
Experimento 2.

Gráfica 13. Isoterma de Langmuir linealizada para el carbón Hydriffin 40N a 18°C en el experimento 2.



Fuente: elaboración propia.

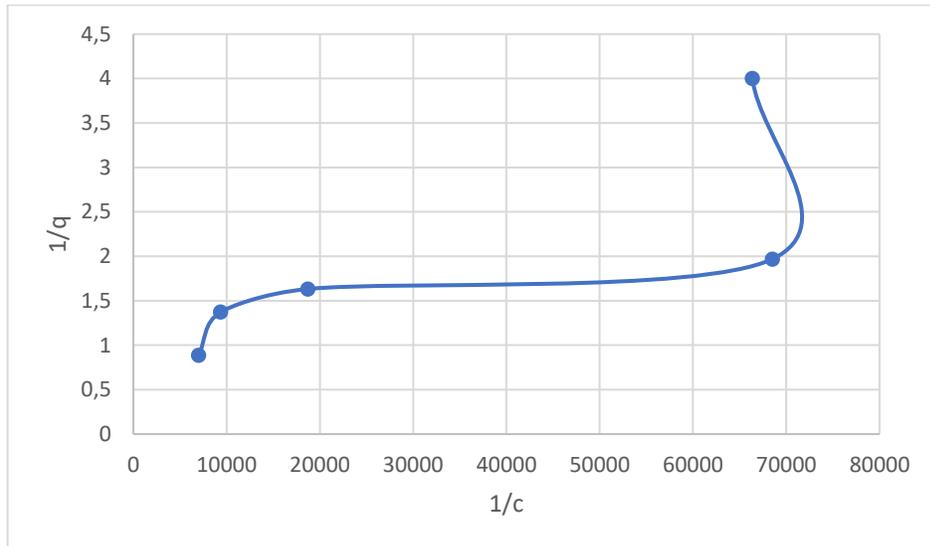
Gráfica 14. Isoterma de Freundlich linealizada para el carbon Hydriffin 40N a 18°C en el experimento 2.



Fuente: elaboración propia.

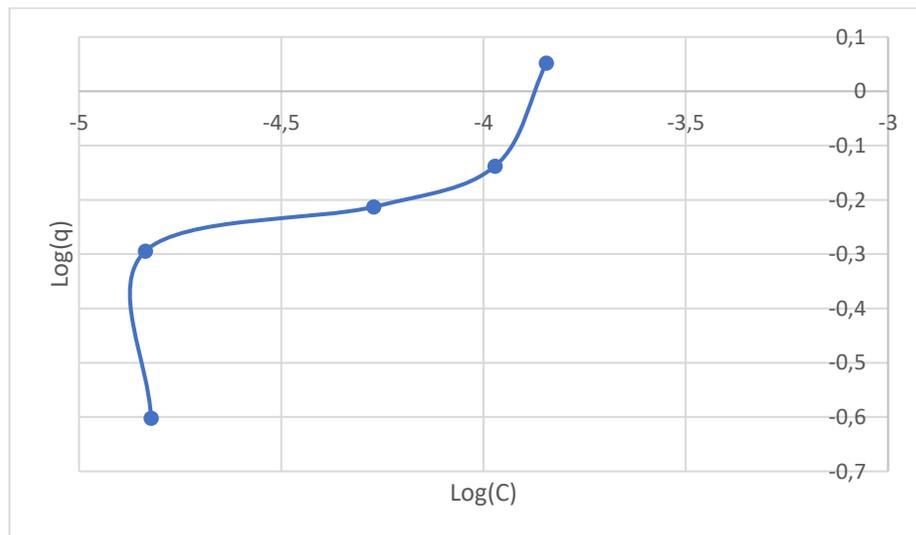
Experimento 3.

Gráfica 15. Isoterma de Langmuir linealizada para el carbón Hydriffin 40N a 18°C en el experimento 3.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 16. Isoterma de Freundlich linealizada para el carbon Hydriffin 40N a 18°C en el experimento 3.



Fuente: elaboración propia

Análisis

En las **Gráfica 11**, **Gráfica 13** y la **Gráfica 15** son presentadas las linealizaciones de Langmuir efectuadas para cada una de las repeticiones respectivas llevadas a cabo usando el carbón hydraffin 40N. Es posible ver que para cada repetición se obtuvo resultados similares, de igual manera se evidencia que la disminución en la concentración en masa del yodo interviene directamente en el comportamiento de la adsorción desfavoreciendo el proceso de separación, esto explica por qué la isoterma presenta en su lado derecho un comportamiento que podría considerarse atípico. Para todas las repeticiones es la solución con 1,5 g de KI sobre la cual se logra una separación más efectiva, por debajo de esta concentración puede verse desfavorecida la adsorción, de igual manera, manteniendo las condiciones invariables de cantidad de adsorbente, el aumento en el KI por encima de 4 desfavorece la separación. De manera teórica se obtuvo la ecuación de la recta para Langmuir obteniendo una desviación cerca del 30% para los tres experimentos, esto permite determinar que el modelo de Langmuir no logra representar la adsorción llevada a cabo usando hydraffin 40 N como adsorbente, esto indica entonces que la adsorción no se da en la monocapa ni es de tipo homogénea.

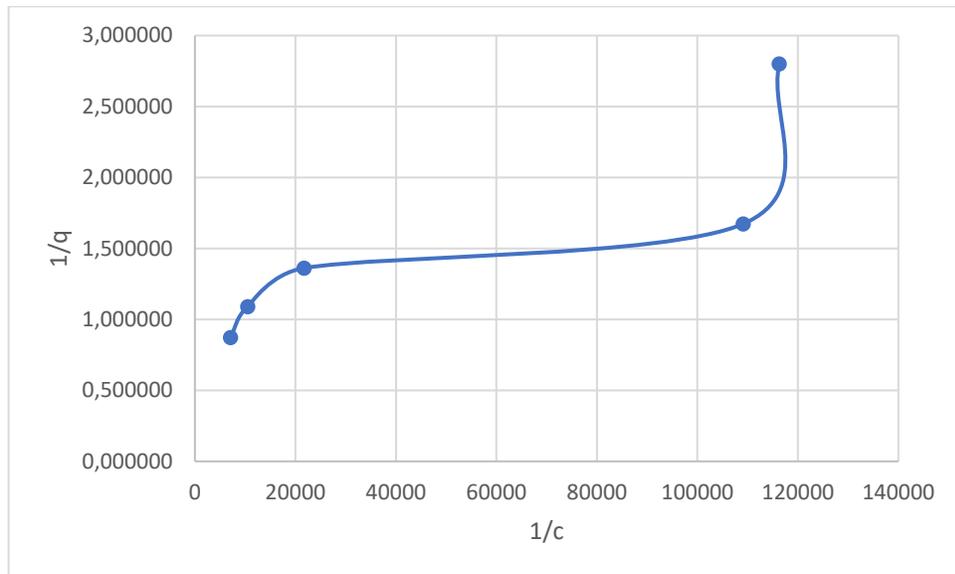
Para el caso de la isoterma de Freundlich presentada en las **Gráfica 12**, **Gráfica 14** y **Gráfica 16** que corresponden a cada una de las repeticiones llevadas a cabo usando el carbón activado sin impregnar, la isoterma presenta un comportamiento que se puede considerar atípico y como se explicó anteriormente se alude a que experimentalmente una cantidad de KI por debajo de los 1,5 g afecta directamente el comportamiento de la adsorción, desfavoreciéndolo. Realizando la linealización y obteniendo la ecuación de la recta se obtiene una constante de capacidad de adsorción cerca de los $K_f=84$ g/g y una constante de intensidad de adsorción en promedio para los tres experimentos de $n=2,0296$. El valor de n se encuentra dentro del rango entre 2 y 10 el cual representa una intensidad de adsorción aceptable. La ecuación presenta una desviación estándar para los tres casos de cerca del 17% la cual se considera no aceptable, por ende, se determina que el modelo de Freundlich aunque se acerca a representar el comportamiento por encima del modelo de Langmuir no es capaz de representar la experimentación llevada a cabo.

Esto confirma que el carbón activado como adsorbente es una matriz heterogénea, en la que los calores de adsorción son diferentes. De igual manera es supuesto que la adsorción es de tipo física, es decir una fisiadsorción, la cual se da en la monocapa, pero no del todo, ya que esta isoterma también comprende adsorciones de tipo multicapa.

3.6.3.2 Isotermas para el carbón activado impregnado con NaOH.

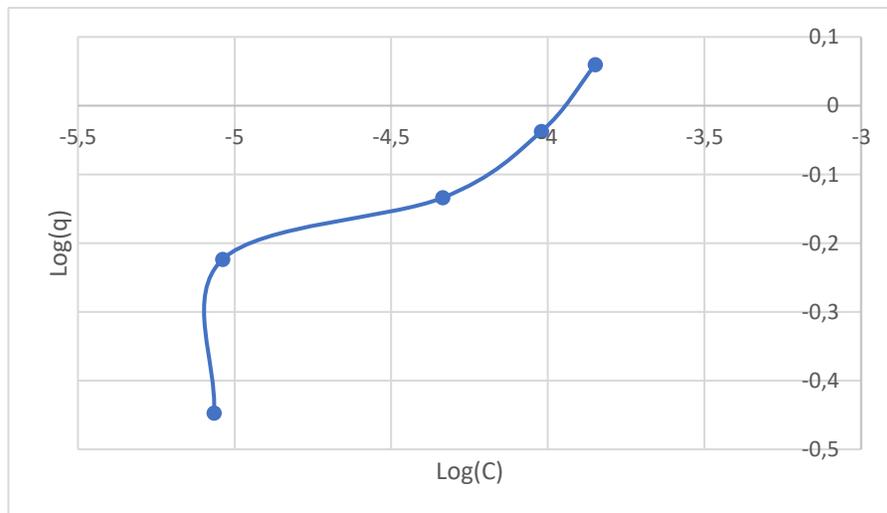
Experimento 1

Gráfica 17. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado impregnado con NaOH a 18°C del experimento 1.



Fuente: elaboración propia.

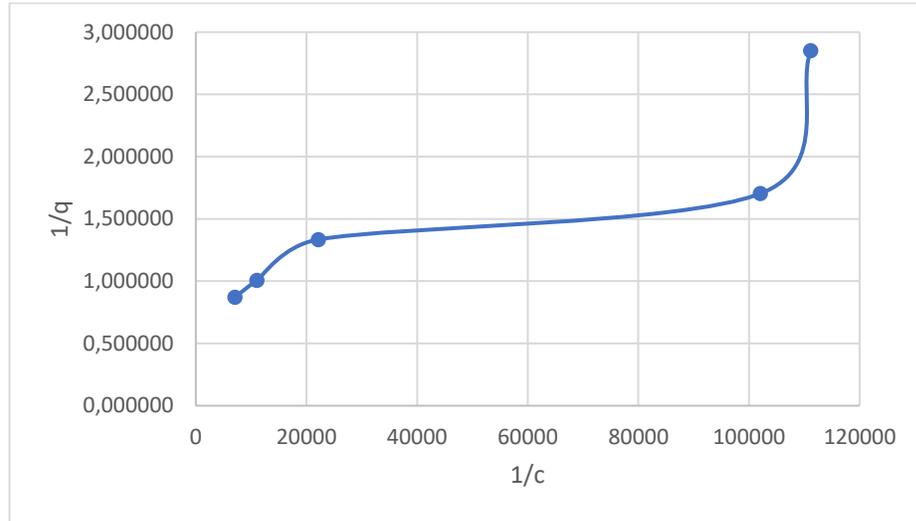
Gráfica 18. Isoterma de Freundlich para la adsorción de 127I en carbón activado impregnado por NaOH del experimento 1.



Fuente: elaboración propia.

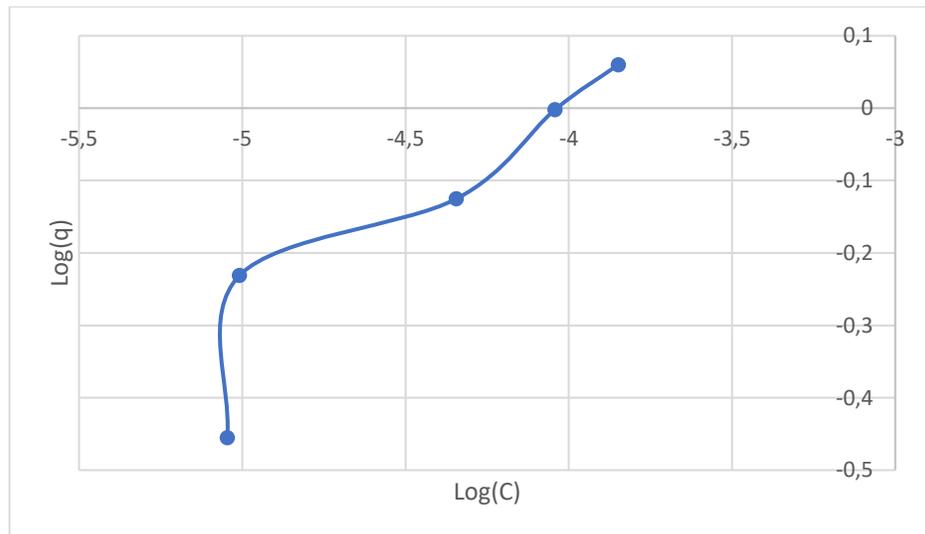
Experimento 2

Gráfica 19. Isoterma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado impregnado con NaOH a 18°C del experimento 2



Fuente: elaboración propia.

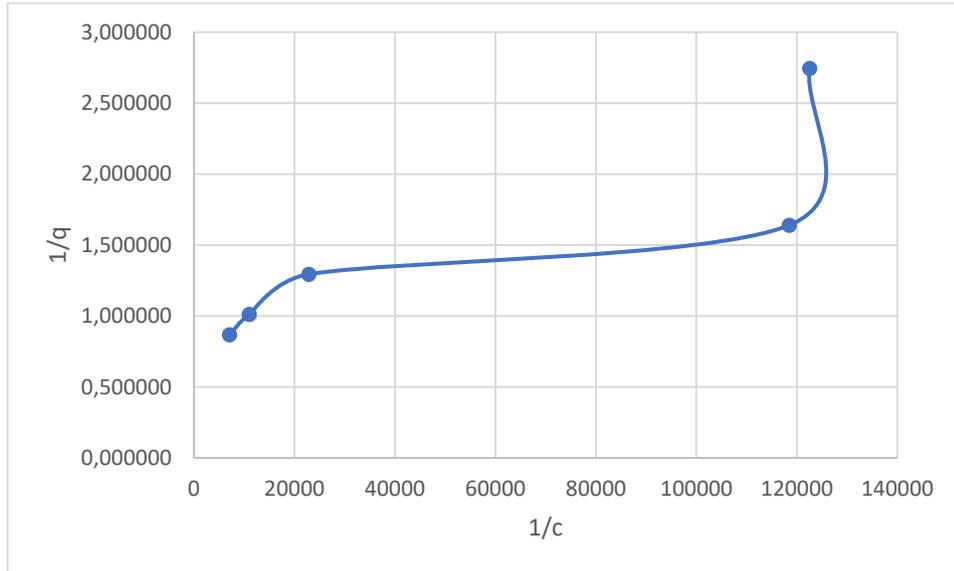
Gráfica 20. Isoterma de Freundlich para la adsorción de 127I en carbón activado impregnado por NaOH para el experimento 2.



Fuente: elaboración propia.

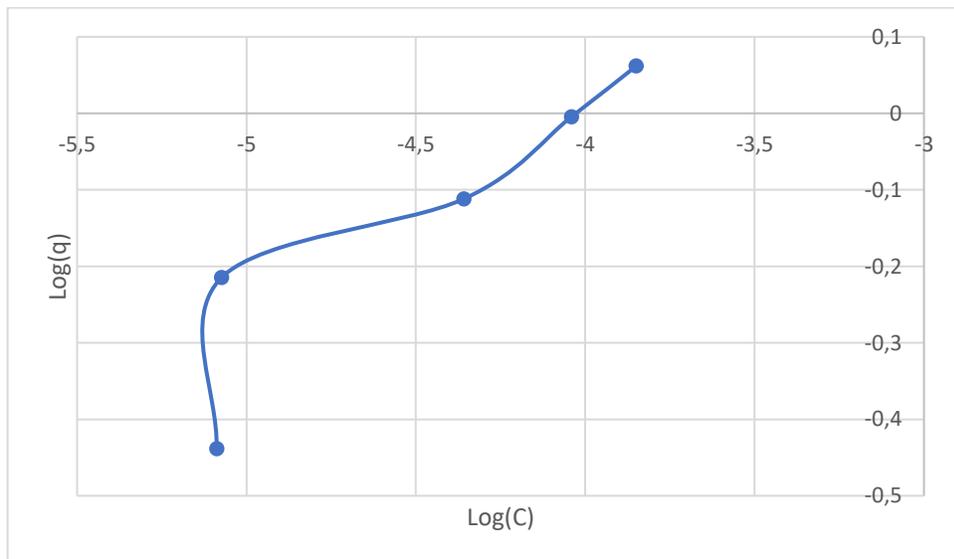
Experimento 3

Gráfica 21. Isotherma adsorción de Langmuir linealizada para el carbón activado impregnado con NaOH a 18°C del experimento 3



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 22. Isotherma de Freundlich para la adsorción de 127I en carbón activado impregnado por NaOH para el experimento 3



Fuente: elaboración propia.

Análisis

Son representados los equilibrios de adsorción por medio de las isothermas de adsorción a una temperatura de 18°C, en las **Gráfica 17, Gráfica 19 y Gráfica 21** es posible observar el modelo de Langmuir aplicado a la adsorción de ^{127}I sobre carbón activado impregnado con NaOH, el cual obtuvo un aumento en la eficiencia de adsorción comparado con el carbón hydrafin 40N. Para esta isoterma se obtuvo un factor de correlación de 0,7759 con una desviación igual al 22,41%, mejorando la representación que presentó este modelo para el carbón sin impregnar. Aunque se obtuvo una menor desviación para este modelo que para el primer caso el valor obtenido está por encima del máximo error aceptado, debido a esto se determina que el modelo de Langmuir no representa la experimentación llevada a cabo usando carbón impregnado con NaOH.

De igual manera se usó el modelo de Freundlich para entender el equilibrio de adsorción y poder representar el tipo de adsorción de la manera más cercana y precisa posible. Las **Gráfica 18, Gráfica 20 y Gráfica 21** se muestran la linealización del modelo de Freundlich aplicado a los tres experimentos respectivamente de adsorción ^{127}I en carbón activado impregnado con NaOH, este modelo obtuvo el factor de correlación más alto siendo este de 0,8643 con una desviación del 13,57%. De igual manera que en casos anteriores, de la ecuación es posible obtener las constantes, siendo la constante de capacidad de adsorción cercana a $k_f=24,4287$ g/g y la constante de intensidad de adsorción cercana a $n=2,8969$ para las repeticiones. Para este caso también es muy alto el valor de la desviación, por ende, se determina que el modelo de Freundlich no representa la adsorción de KI usando carbón activado con NaOH

La bibliografía relacionada en el desarrollo teórico muestra como el carbón activado por medio de NaOH aumenta su área superficial y sitios activos, siendo esta matriz heterogénea, por consiguiente, con variación en los calores de adsorción. El tipo de adsorción que se presenta es de tipo mixta, una fisorción potenciada por las fuerzas de Van der Waals y una quimisorción potenciada por la reacción de formación de los complejos yoduro de sodio (Na^{131}I), más yoduro de sodio y agua ($\text{Na}^{131}\text{IO} + \text{H}_2\text{O}$), presentada en el numeral **3.4.1**. Esto podría explicar la razón por la cual la isoterma de Freundlich no logra representar por completo la adsorción llevada a cabo.

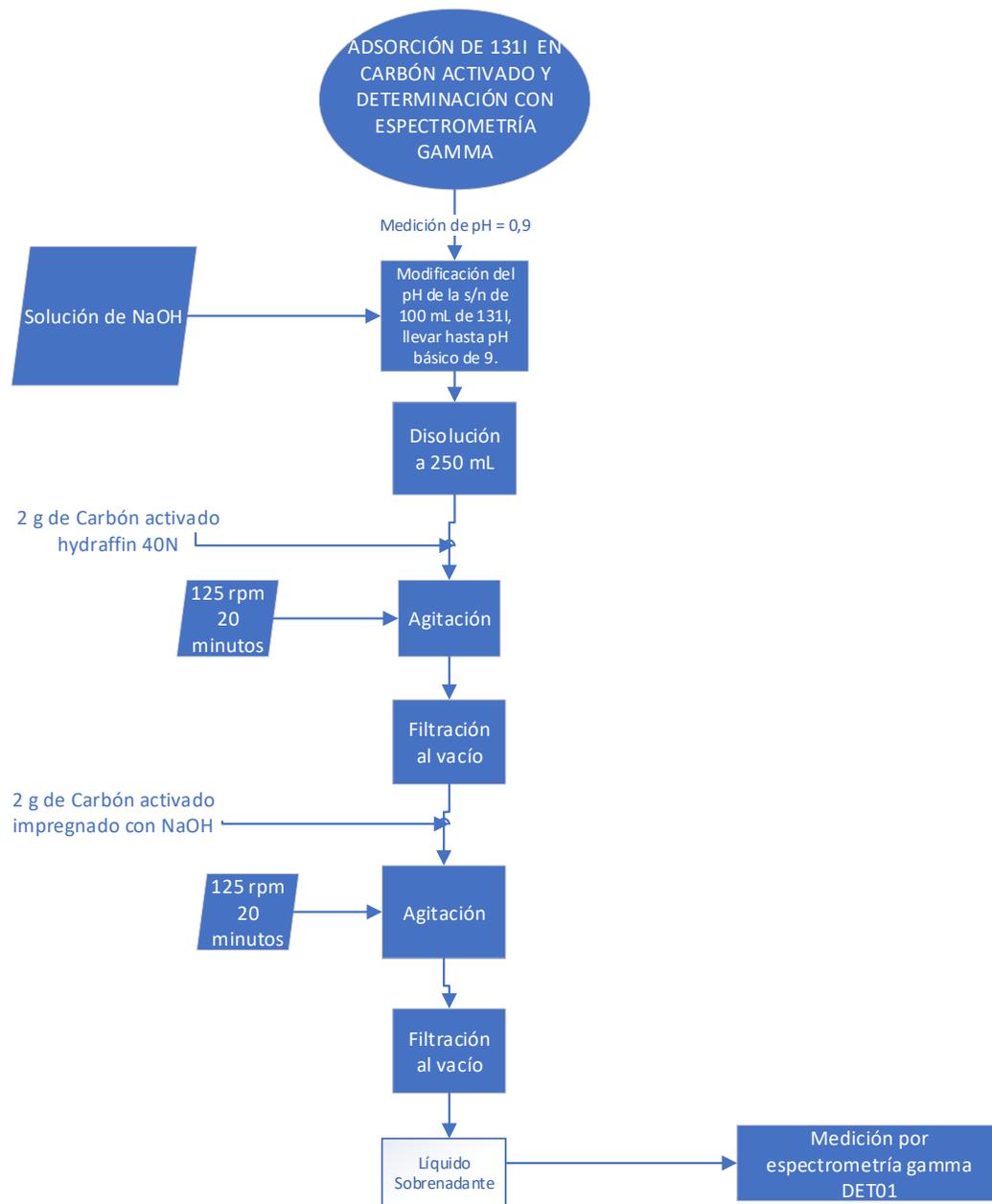
3.7 PRUEBA DE ADSORCIÓN CON ^{131}I

Después de realizar el desarrollo experimental usando el único radioisótopo estable del yodo, el ^{127}I , por temas de control y manejo de desechos radiactivos, y obteniendo muy buenos resultados para la adsorción con remociones de hasta el 81% de yodo se abrió la posibilidad de realizar una prueba usando una solución de ^{131}I con una actividad conocida y libre de control por parte de los estatutos gubernamentales. Esto basado en que las pruebas de adsorción realizadas se

hicieron con cantidades muy altas de yodo. Cómo se evidenció en el numeral 3.3 de este documento el equivalente en masa total excretado por un paciente en su tratamiento completo es de $9,69 \times 10^{-7}$ g, siendo esta una cantidad muy pequeña, se sabe que la disminución del adsorbato bajo las mismas condiciones de experimentación desfavorece la eficiencia de la adsorción.

Para esta prueba se usó una solución de ^{131}I con una actividad de 5000 Bq, la cual al terminar todo el experimento de adsorción fue medida su actividad en el espectrómetro DET01 para luego determinar su equivalente en masa y así calcular el % de remoción total. En el **Diagrama 10** se presenta el diagrama de flujo llevado a cabo en el experimento.

Diagrama 10. Diagrama de flujo de prueba adsorción del ^{131}I en carbón activado en 2 etapas



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en el **Diagrama 10** la prueba de adsorción se realizó en dos etapas, usando ambos carbonos, la primera etapa de adsorción se realizó con el carbón hydrffin 40N y la segunda etapa con el carbón impregnado con NaOH. El experimento se realizó a las mismas condiciones de adsorción de las pruebas de adsorción con ^{127}I , con una temperatura ambiente de 18°C. Al terminar la última

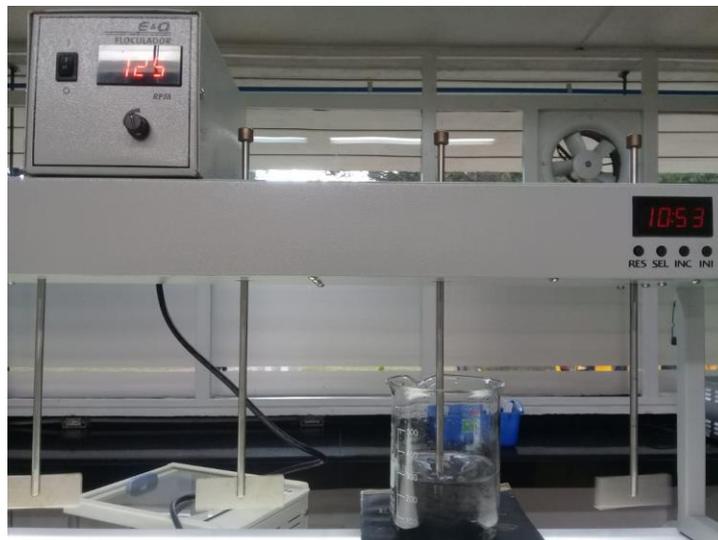
etapa de filtración al vacío el líquido sobrenadante fue llevado a la geometría de 100 ml para ser medido en el espectrómetro gamma DET01 del Servicio Geológico Colombiano.

Imagen 56. Balón aforado con solución de 100ml de ^{131}I



Fuente: elaboración propia.

Imagen 57. Etapa de agitación de la solución con carbón activado impregnado con NaOH como adsorbente



Fuente: elaboración propia.

Los resultados levantados del espectrómetro gamma DET01 del Servicio Geológico se presentan en la **Tabla 43** :

Tabla 43. Datos obtenidos por análisis de espectrometría gamma para la prueba de adsorción de ¹³¹I

Referencia	Valor
Peso (g)	114,45
Fecha	09/10/19
Área	984770 +/- 0.10%
Integral	1002378
Tiempo de análisis (s)	828000
Actividad Bq/Kg	3671.596783

Fuente: elaboración propia.

3.7.1 Porcentaje de adsorción. Para el cálculo del porcentaje de adsorción se emplearon dos métodos, el primero es de forma teórica por medio de la actividad específica y se muestra a continuación:

El segundo método es netamente experimental utilizando la concentración de actividad inicial y la obtenida después de la adsorción.

Lo primero que se hizo fue hallar el valor exacto de la alícuota que se tomó:

Ecuación 13. Cálculo de la masa neta de la alícuota.

$$m_{NB3} = W_{B4} - W_{BV4}$$

Donde:

m_{NB3} : masa neta de la alícuota

W_{B4} = Peso balón afora vacío

W_{BV4} = peso balón aforado lleno

$$m_{NB3} = (155,0158 - 101,2837) \text{ g}$$

$$m_{NB3} = 53,7321 \text{ g}$$

La alícuota que se utilizó para la adsorción con ^{131}I fue tomada de la dosis solicitada de 1 MBq para la calibración de los equipos, para saber la concentración de actividad que tiene este alícuota se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Actividad de la alícuota en el tiempo cero

$$A_1 = A_0 \left(\frac{m_{NB3}}{m_{NB1}} \right) \left(1 - \frac{m_{NP}}{100} \right)$$

Donde:

A_1 = concentración de actividad alícuota en tiempo cero

A_0 = Actividad de la capsula de ^{131}I

m_{NB3} = Masa neta de la alícuota del balón aforado

m_{NB1} = Masa neta del balón aforado 1 en el cual se diluyo la capsula de ^{131}I

m_{NP} = Masa neta de perdidas

$$A_1 = 1032000 \left(\frac{53,7321}{102,37861} \right) \left(1 - \frac{0,23759}{100} \right)$$

$$A_1 = 540345,0967 \text{ Bq}$$

$$I = A_1 * 0,0286$$

$$I = 15453,86976$$

Ecuación 15. Actividad de la alícuota al momento de la preparación

$$A_2 = A_1 e^{\frac{(-\ln 2)(t_2 - t_1)}{t_{1/2}}}$$

$$A_2 = 540345,0967 \text{ Bq} \left(e^{\frac{(-\ln 2)(86400 \text{ seg})(4/10/2019 \ 3:00:00 \text{ p.m.} - 31/07/2019 \ 9:05:00 \text{ a.m.})}{693377,28 \text{ seg}}} \right)$$

$$A_2 = 1298,56993 \text{ Bq}$$

$$I = 1298,56993 \text{ Bq} * 0,0286$$

$$I = 55,15709999$$

Ecuación 16. Concentración de actividad de alícuota en momento de preparación

$$a_2 = \frac{A_2}{m}$$

$$a_2 = \frac{1298.56993 \text{ Bq}}{0.1012198 \text{ kg}}$$

$$a_2 = 19053.2873 \text{ Bq/kg}$$

a_2 es la concentración de actividad presente en el balón aforado de 100ml, pero en el momento de llevar acabo la experimentación de la adsorción se realizó una dilución hasta 250 ml por lo cual se debe hallar la concentración con la cual se trabajó la adsorción, esta se halla por:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$C_2 = \frac{19053.2873 \text{ Bq/kg} * 100\text{ml}}{250\text{ml}}$$

$$C_2 = 7621,314919 \text{ Bq/kg}$$

Luego de haber realizado la experimentación de la adsorción se llevó un volumen de 100 ml a lectura por espectrometría gamma en la cual se obtuvo una concentración de actividad de 5130,20552 Bq/kg (a_3), como esta concentración de actividad es leída luego de un tiempo transcurrido y además hay un tiempo adicional el cual es el que dura realizándose la lectura se debe hallar la concentración de actividad en el momento de la preparación, esta concentración de actividad es encontrada mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 17. Concentración de actividad de alícuota del proceso de adsorción en el momento de preparación.

$$a_4 = a_3 e^{\frac{(-\ln 2)(t_2 - t_1)}{t_{1/2}}}$$

$$a_4 = (5130,20552 \text{ Bq/kg}) * e^{\frac{(-\ln 2) 345600 \text{ seg}}{693377,28 \text{ seg}}}$$

$$a_4 = 7247,314833 \text{ Bq/kg}$$

Ecuación 18. Porcentaje de adsorción

$$\% \text{ adsorción} = \frac{C_2 - a_4}{C_2} * 100\%$$

$$\% \text{ adsorción} = \frac{7621,314919 \text{ Bq/kg} - 7247,314833 \text{ Bq/kg}}{7621,314919 \text{ Bq/kg}} * 100\%$$

$$\% \text{ adsorción} = 4,907\%$$

Tabla 44. Consolidado de resultados porcentaje de adsorción de forma experimental.

BALON 3		
m_{NB3}	53,7321	g
Fecha cero	31/07/2019 9:05	
$t_{1/2}$	693377,28	s
m_{NP}	102,37861	g
m_{NB1}	0,23759	g
A_1	540345,0967	Bq
I	15453,86976	
Fecha preparación	4/10/2019 15:00	
masa solución balón 3	0,1012198	l
Actividad a preparación (Ap)	1928,56993	Bq
Incertidumbre (Ap)	55,15709999	
Concentración de actividad	19053,2873	Bq/l
Concentración de actividad por f de dilución	7621,314919	Bq/l
Concentración producto separación i	5130,20552	Bq/kg
fecha medición	9/10/2013 13:58	
TD	345600	s
concentración producto llevada a preparación	7247,314833	Bq/kg
% de separación	4,907290804	%

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la **Tabla 44** el porcentaje de adsorción es bajo, esto no quiero decir que el método de adsorción sea malo o que el adsorbente no funcione pues como se evidencia en la experimentación de adsorción con ^{127}I si se llega a remover una cantidad de isotopos del yodo, pero cuando la concentración es más alta, (por encima de 1 g de sal) es decir la concentración favorece o afecta la adsorción. Como el experimento que se realizó de adsorción con el ^{131}I la concentración en masa es del orden de 1×10^{-7} g y su actividad es alta, los cuales son los panoramas a los que se enfrentan en los hospitales, no es viable implementar este método de adsorción con carbón activado debido a que los resultados fueron insatisfactorios y la implementación de un proceso de adsorción sería un costo elevado y no se justificaría porque solo se adsorbe el 4% del ^{131}I .

4. PARAMETROS TÉCNICOS DEL MÉTODO DE REMOCIÓN

En este capítulo se hablará de las especificaciones técnicas desarrollados para el sistema de tratamiento y control a proponer. Cómo se especificó anteriormente todo sistema de separación requiere posterior a su tratamiento un sistema de tanques de retención por decaimiento, y debido a que después del desarrollo experimental realizado y con los resultados obtenidos de la prueba de adsorción usando la muestra no controlada de ^{131}I (se evidenció que la poca cantidad en masa desfavorece la adsorción obteniéndose puntualmente para este caso una adsorción sólo del 5 %), solo se realizaron las especificaciones técnicas para el esquema de sistemas tanques de retención por decaimiento. Se plantea un sistema entonces de decaimiento únicamente que cumple con la normatividad de vertimiento de manera satisfactoria.

Se presentan de igual manera los parámetros más importantes a tener en cuenta para la propuesta de remoción del ^{131}I de acuerdo con la necesidad actual de pacientes en hospitales por semana en Bogotá, como lo son la composición de la orina, las normas que se deben tener en cuenta en el manejo de este residuo, así como un acercamiento a una propuesta usando el método de remoción por adsorción el cual necesita ser investigado para poder aplicarlo.

El enfoque metodológico empleado para esta propuesta de remoción se ha determinado en base a la *Guía Técnica Para El Establecimiento Del Programa De Gestión Segura De Desechos Radiactivos En Colombia* desarrollada por el ingeniero Fernando Mosos director de este proyecto.

4.1 COMPOSICIÓN DE ORINA

Es necesario conocer la composición de la orina ya que los desechos hospitalarios cargados con ^{131}I son en su mayoría líquidos productos de la orina. Por ende, su composición fisicoquímica afecta directamente el sistema de remoción por decaimiento a proponer.

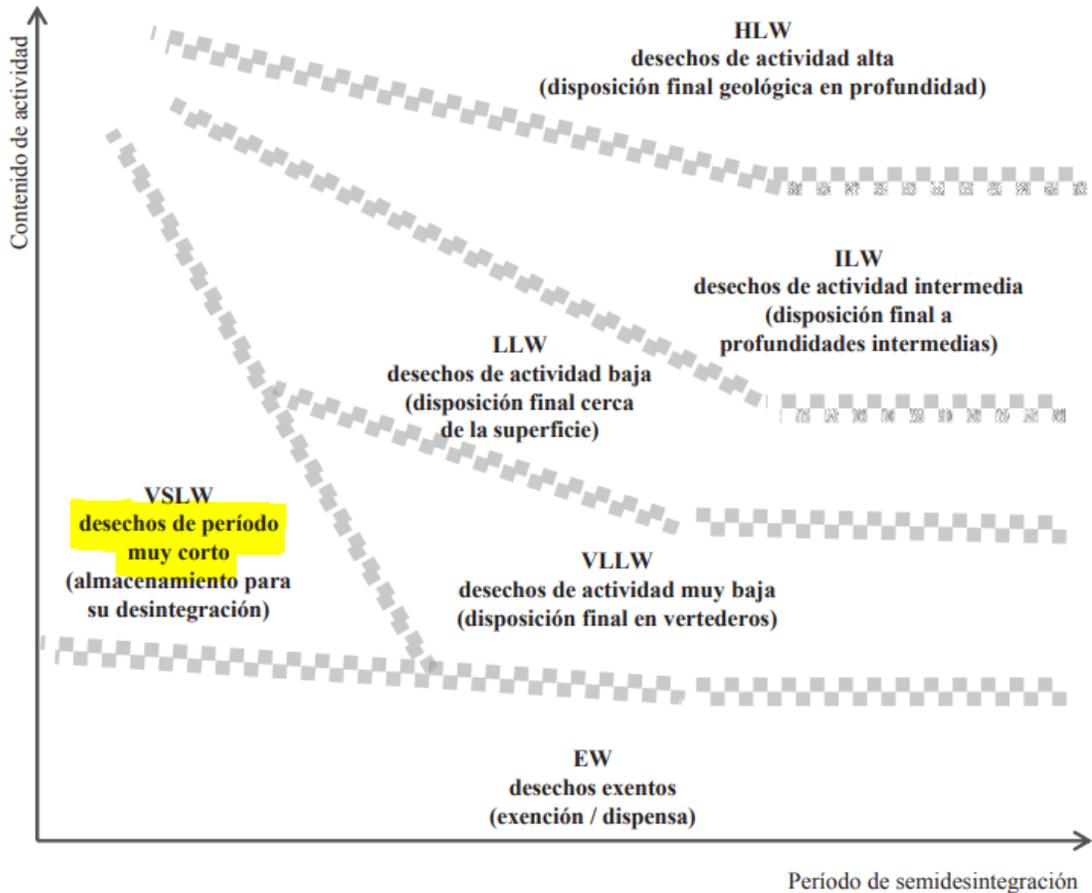
Es uno de los elementos fundamentales en el momento de hacer un postulado de remoción puesto que será donde se va a encontrar el ^{131}I , la orina es un líquido secretado por los riñones y que se sale del cuerpo a través del aparato urinario, está compuesta generalmente por un 95 % de agua, un 2 % de sales minerales y 3 % de urea y ácido úrico.

El ser humano produce cerca de 1.4 L de orina al día y aproximadamente cerca de la mitad de los sólidos son urea el principal producto de degradación del metabolismo de las proteínas, produciéndose cerca de 20 g de urea por litro. De interés para el desarrollo de este trabajo son las sales las cuales equivalen a unos 10 g por cantidad de orina expulsada al día.

4.2 NORMAS GUIA PARA EL TRAMIENTO DE ¹³¹I

La **Imagen 58** se tomó de las “Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente” y con lo cual se tiene información de la disposición final del ¹³¹I.

Imagen 58. Ilustración conceptual del sistema de clasificación de desechos



Fuente; Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente.

La “POLÍTICA PARA LA GESTIÓN DE DESECHOS RADIOACTIVOS EN COLOMBIA” brinda información acerca de la clasificación de los desechos radiactivos teniendo una serie de parámetros a continuación, se presentará el fragmento de la norma el cual es de interés para el desarrollo de las especificaciones técnicas de remoción.

La clasificación de los desechos radiactivos se lleva a cabo según la concentración de actividad y periodos de semidesintegración de los radionúclidos presentes de conformidad con las opciones de gestión, basado en la seguridad a largo plazo.

En la **Tabla 45** se presenta la clasificación a la cual pertenece el ^{131}I según la tabla de clasificación de desechos radioactivos, su descripción y la opción de dispensa.

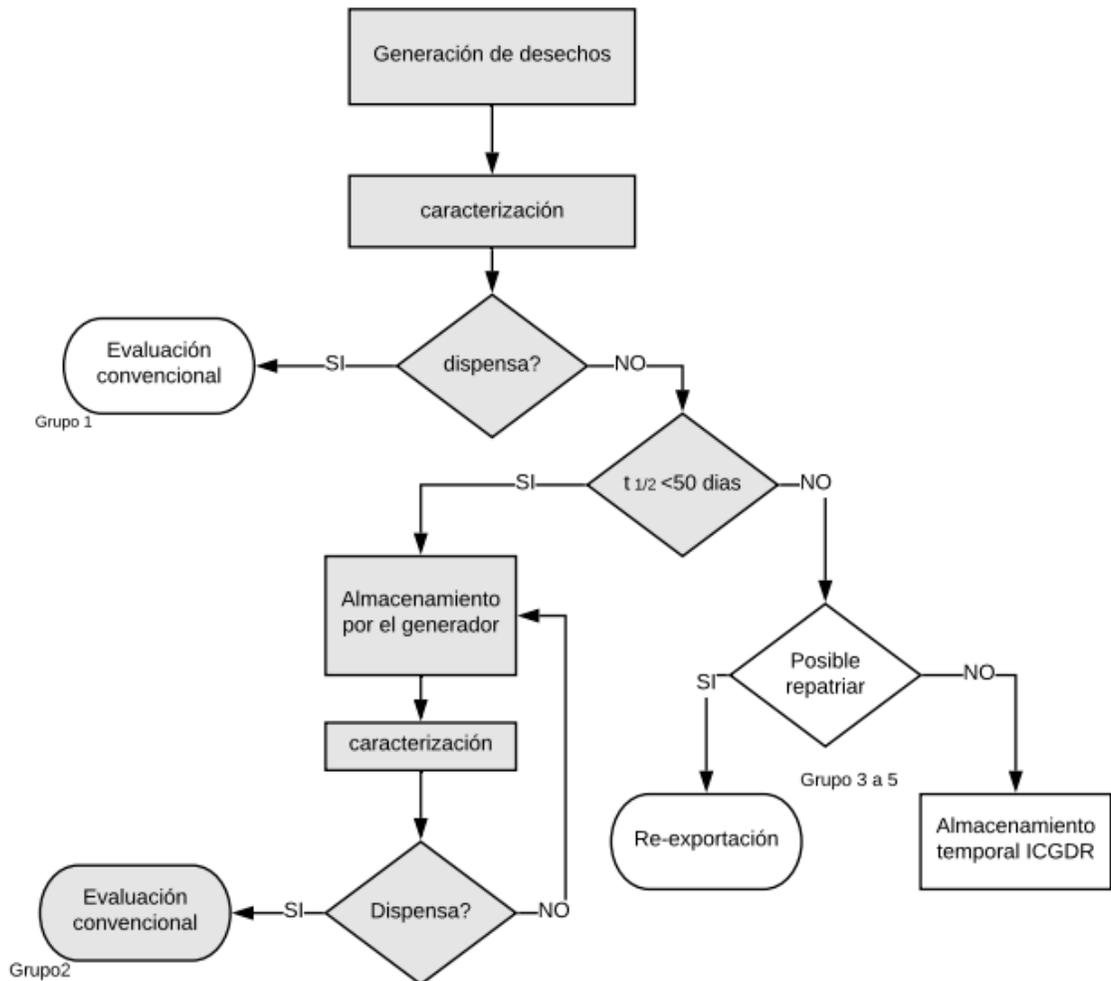
Tabla 45. Clasificación del yodo 131 según la Política de Gestión de los desechos radioactivos en Colombia.

Grupo	Clase	Descripción	Opción de gestión
1	Desechos exentos	Materiales que contienen radionúclidos que satisfacen el criterio de exención, exclusión o dispensa del control regulatorio establecido para propósitos de protección radiológica.	Exención, exclusión o dispensa, siguiendo los procedimientos establecidos en la normatividad.
2	Desechos de muy corta vida.	Materiales que contienen solamente radionúclidos de muy corto periodo de semidesintegración, con concentraciones de actividad por encima de los niveles de dispensa.	Almacenamiento por un periodo de tiempo limitado, por unos pocos años, hasta que la actividad haya alcanzado los niveles de dispensa, siendo luego permitida su dispensa y manejo como desecho convencional.

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radioactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Según lo anterior el ^{131}I se clasifica como desecho un radiactivo de muy corta vida, estos desechos se almacenan hasta que la actividad disminuye por debajo de los niveles de dispensa, lo que permite que los desechos dispensados se gestionen como desechos convencionales y por lo cual en la propuesta que se plantea más adelante se hace necesario la implementación de un sistema de almacenamiento.

Imagen 59. Flujo de proceso de gestión de desechos para ^{131}I .



Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

4.3 REALIDAD DEL TRATAMIENTO CON ^{131}I EN COLOMBIA

Tener claridad de la frecuencia y la importancia del uso del ^{131}I en los tratamientos médicos permite realizar los cálculos de especificaciones técnicas centrados y aterrizados a la realidad a la cual se ven enfrentados los hospitales que ofrecen estos servicios en el país.

En Colombia el tratamiento con ^{131}I es usado para el tratamiento de pacientes con enfermedades de tiroides tanto benignas, como el hipertiroidismo, como malignas como el cáncer diferenciado de tiroides. La administración se realiza en forma de NaI por vía oral, en forma de cápsulas o forma líquida, o bien por perfusión. El yodo se absorbe en el tracto gastrointestinal, pasa al torrente sanguíneo y es

parcialmente atrapado y alojado en el tejido tiroideo funcional, eliminando el restante con las excretas, sudor, saliva, etc., siendo la orina la forma principal de eliminación abarcando entre el 70 y el 90 % de la actividad administrada.⁹⁸

Los tratamientos comúnmente más usados son los siguientes:⁹⁹

Endocrinología Nuclear

- Valoración de la patología tiroidea (nódulos tiroideos, hipertiroidismo, cáncer de tiroides, hipotiroidismo neonatal e infantil).
- Valoración de hipertiroidismo primario y secundario.
- Valoración de tumores neuroendocrinos, feocromocitomas, neuroblastomas.
- Valoración de la patología de paratiroides.

Área terapéutica

- Ablación y tratamiento de pacientes con cáncer diferenciado de tiroides con altas dosis de Yodo 131.
- Tratamiento ambulatorio de hipertiroidismo con Yodo 131.

El cáncer de tiroides (CDT) tratado con ¹³¹I ha tenido un gran aumento a nivel mundial, específicamente en Colombia se ha evidenciado un incremento, según el instituto nacional de cancerología, en una publicación del año 2015, se evaluó la realidad de la incidencia del CDT entre los años 2007 y 2011 este estudio indicó que la incidencia de cáncer de tiroides estimada para un hombre anual es 247 mientras para una mujer su incidencia estimada anual es 2.201 evidenciándose que la población más propensa a padecer esta enfermedad es la femenina.¹⁰⁰

⁹⁸ CRITERIOS DE ALTA DE PACIENTES Y MEDIDAS PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL PÚBLICO DESPUÉS DE TRATAMIENTOS METABÓLICOS CON 131I. Foro sobre protección radiológica en el medio sanitario. CSN/SEPR/SEFM. España. Marzo 2011.

⁹⁹ CENTRO MÉDICO IMBANACO [Sitio Web]. Medicina nuclear. [Citado el 2 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.imbanaco.com/servicios-y-programas/servicios-a-pacientes/medicina-nuclear/#servicios>

¹⁰⁰ DÍAZ, Deisy y PUENTES, Luz. ESTUDIO DE COSTOS MÉDICOS DIRECTOS EN PACIENTES ADULTOS COLOMBIANOS, QUE SE ENCUENTREN EN ESTADIO T3 DE CÁNCER DE TIROIDES LOCALIZADO USANDO YODO 131 COMO TERAPIA. Trabajo de grado Química Farmacéutica. Bogotá D.C.: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Facultad de Ciencias de la Salud. 2018. 72 p

Anualmente se evidencia un total 2448 casos en promedio y una prevalencia que llega por encima de los 4000 casos. Según estas estadísticas un hospital actualmente trata, usando ^{131}I , máximo 6 personas a la semana.

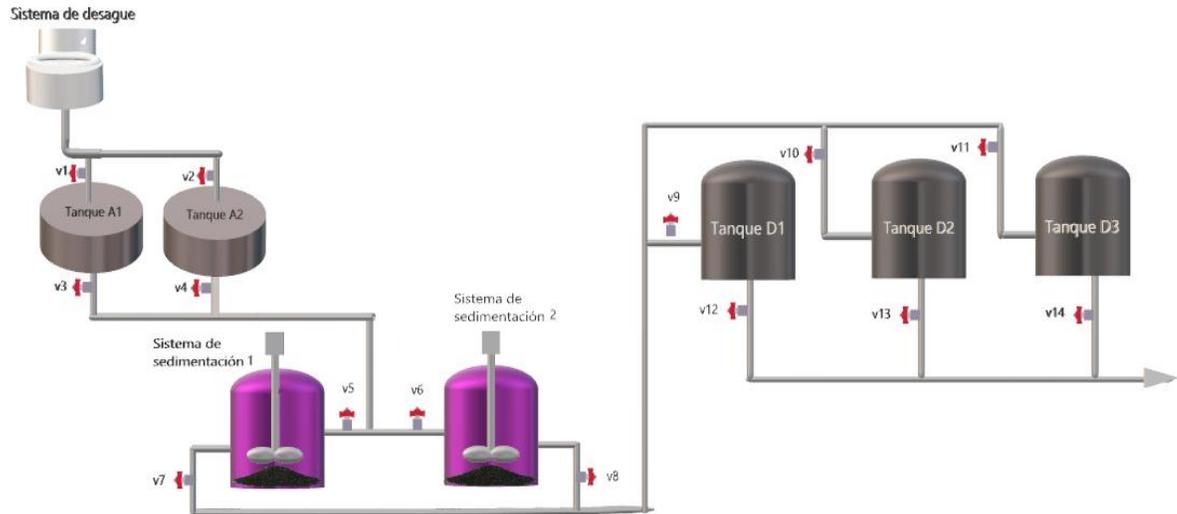
4.4 DISEÑO Y ASPECTOS LOCATIVOS EN GESTIÓN DEL DESECHO RADIATIVO ^{131}I

Los aspectos del diseño están entorno al ^{131}I que se usa con fines médicos ya que es donde más es utilizado y es la actividad donde más se genera este residuo. Se propone un diseño que incorpora un sistema de remoción por medio de la adsorción como ya se mencionó en el anterior capítulo, con un sistema de decaimiento el cual es necesario y es el recomendado por norma.

Los centros médicos que tienen autorización para tratamientos con radionúclidos con el fin de garantizar la protección del público y del medio ambiente deben asegurarse de que no haya contaminación cruzada, irradiación externa y que sus vertimientos estén con los niveles de actividad sugeridos que para el caso del ^{131}I es 10000000 Bq/año sin que se supere en cada vertimiento 1,9 Bq/L además se deben tener zonas especiales para los pacientes tratados debido a que el suministro de estos radionúclidos generan no solo efectos en el paciente tratado sino en aquellos que estén muy próximos a él y en esto también influye la cotidianidad con la que se encuentren.

A continuación, se presenta un esquema en la **Imagen 60**, de un sistema que contiene una serie de tanques de almacenamiento, un sistema de tanque de sedimentación y un sistema de retención y decaimiento con 3 tanques. Este sistema propuesto para la remoción de ^{131}I en una instalación de medicina nuclear debe estar confinado en un depósito totalmente blindado con recubrimiento de hormigón. La corriente del vertimiento líquido se hace pasar primero por unos tanques A1 y A2 que cumplen la función de almacenar la orina proveniente de los cuartos donde se hacen tratamientos con ^{131}I por un máximo de 12 horas cada uno, luego se abre dejando pasar las descargas líquidas hacia los tanques de sedimentación, donde por alrededor de 3 a 4 horas se estará ejecutando el proceso de adsorción y purificación del ^{131}I , en las horas restantes antes de abrir la válvula que dirige el agua hacia los tanques de decaimiento, se estará generando el proceso de sedimentación.

Imagen 60. Sistema de remoción con adsorción, retención y decaimiento.



Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan las consideraciones y estimaciones de volúmenes de los tanques A1, A2, tanques de sedimentación 1 y 2 y la concentración de actividad de ^{131}I saliente luego del sistema de adsorción y sedimentación hacia los tres tanques de retención y decaimiento:

Se sabe que una persona elimina aproximadamente 1.4 L de orina al día, más el volumen de agua de las descargas del inodoro que es aproximadamente 6 litros por descarga, con estos datos se hace el volumen aproximado del tanque A1 y A2

Ecuación 19. Volumen de los tanques de almacenamiento A1 y A2

$$V = 1.4L * p * d * 6L * h$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

V = volumen de los tanques A1 y A2

p = Número de pacientes

d = Número de descargas

h = *Número de habitaciones*

Considerándose que una persona baja aproximadamente 7 veces el inodoro al día se tiene:

$$V = 58.8L * p * d$$

De este mismo volumen se parte para calcular el de los tanques de sedimentación donde se ejecuta el proceso de adsorción se le adiciona el volumen del carbón activado necesario para una concentración de actividad de ^{131}I promedio que es dependiente de los registros históricos de cada hospital.

Ecuación 20. Volumen de los tanques de adsorción y sedimentación

$$V_2 = 58.8L * p * d + V_{CA}$$

Fuente: elaboración propia

Donde:

$V_2 =$ *Volumen de los tanques de adsorción y sedimentación*

$V_{CA} =$ *Volumen del carbón activado*

Luego del proceso de adsorción se ha reducido en un % la concentración de actividad, las especificaciones de los tanques de decaimiento son tomadas de la guía técnica del Ingeniero químico Fernando Mosos:

Ecuación 21. Actividad que entra al sistema de retención y decaimiento.

$$a_v = n * a_0 * f * (1 - X)$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Donde:

$a_v =$ *actividad vertida a los tanques de decaimiento*

$a_0 =$ *actividad representativa*

$n =$ *número de habitaciones*

$f =$ *fracción de la actividad administrada que es excretada por el paciente en el tiempo de hospitalización(t_1)*

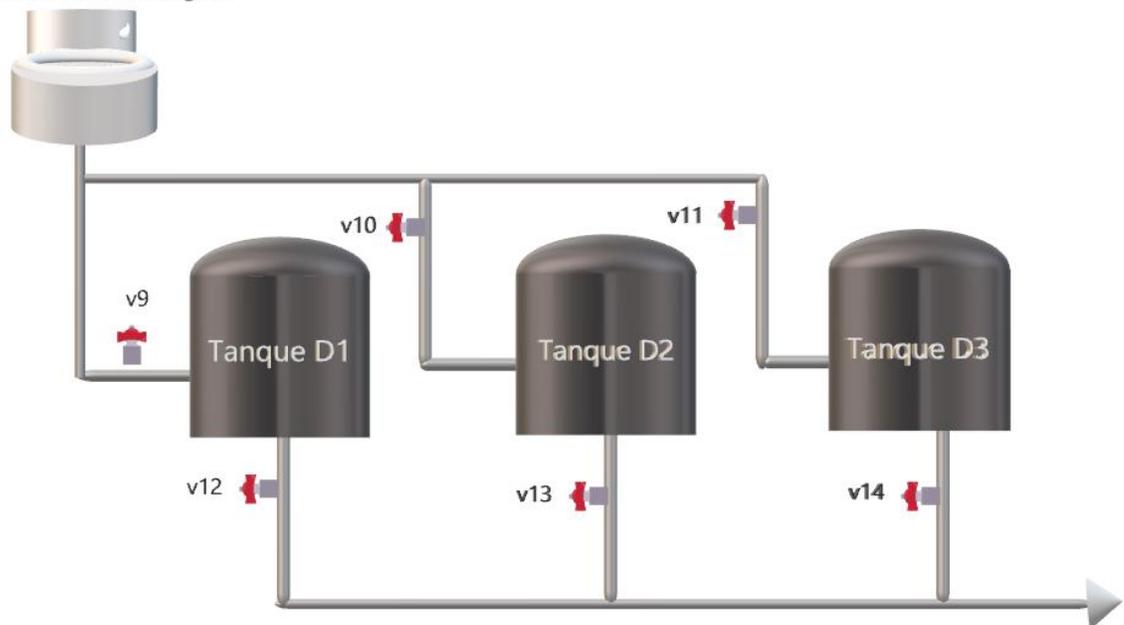
$X =$ *fracción de adsorción*

Es importante recalcar que este sistema de adsorción, retención y decaimiento solo se puede llevar acabo si se le hace una modificación al carbón activado con la que se puede remover más concentración de actividad de lo contrario y para este caso

en particular no es viable la implementación del sistema de adsorción puesto que no hay una remoción significativa por lo cual no se hace viable y se toma directamente la opción del sistema remoción de retención y decaimiento que se muestra a continuación.

Imagen 61. Sistema de remoción con retención y decaimiento.

Sistema de desagüe



Fuente: elaboración propia

El sistema de retención propuesto consiste en una serie de n tanques iguales, donde uno se encuentra en turno de llenado y los demás se encuentran llenos en turno de decaimiento. Considerando que el tanque número 3 se encuentra en turno de llenado, recibiendo los efluentes de todos los baños de las habitaciones de yodo terapia o del sistema de adsorción y sedimentación; cuando dicho tanque se llena, se cierra la válvula de acceso v11, dejándolo en turno de decaimiento. En forma simultánea, se vacía rápidamente el tanque 1 y se deja en turno de llenado, abriendo la válvula v9. Para una mayor comprensión, la **Tabla 46** presenta la configuración de las válvulas del sistema en los diferentes turnos de llenado y decaimiento.¹⁰¹

Tabla 46. Configuración de las válvulas del sistema

Turno	V9	V10	V11	V12	V13	V14
-------	----	-----	-----	-----	-----	-----

¹⁰¹ MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Llenado tanque 3	C	C	A	C	C	C
Vaciado tanque 1	C	C	C	A	C	C
Llenado tanque 1	A	C	C	C	C	C
Vaciado tanque 2	C	C	C	C	A	C
Llenado tanque 2	C	A	C	C	C	C
Vaciado tanque 3	C	C	C	C	C	A

Fuente: Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia¹⁰²

4.5 DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE REMOCIÓN

Los centros médicos que tienen autorización para tratamientos con radionúclidos con el fin de garantizar la protección del público y del medio ambiente deben asegurarse de que no haya contaminación cruzada, irradiación externa y que sus vertimientos estén con los niveles de actividad sugeridos que para el caso del ¹³¹I es 10000000 Bq/año sin que se supere en cada vertimiento 1,9 Bq/L además se deben tener zonas especiales para los pacientes tratados debido a que el suministro de estos radionúclidos generan no solo efectos en el paciente tratado sino en aquellos que estén muy próximos a él y en esto también influye la cotidianidad con la que se encuentren.

Los aspectos del diseño se enfocan específicamente al ¹³¹I como desecho que se usa con fines médicos, este desarrollo consta de un sistema compuesto por 3 tanques de decaimiento y su finalidad es determinar los parámetros más importantes del sistema, tales como el caudal, tiempo de llenado, la actividad de descarga del tanque, la actividad de descarga al año, estas con el fin de cumplir la regulación nacional.

Para el desarrollo de este objetivo se usó el planteamiento y las ecuaciones propuestas en la Guía de gestión para desechos del Grupo 2, ubicada como literal d. del anexo B de la Guía Técnica. del documento titulado “*Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia*” desarrollado por el Ingeniero Jackson Fernando Mosos Patiño, director

¹⁰² MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

de este proyecto y profesional especializado en la Dirección de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano.

4.5.1 Parámetros del Sistema de Tanques. A continuación, en la **Tabla 47** y en la **Tabla 48** se presentan los datos usados para desarrollar el método de cálculo, los parámetros fueron fijados por determinación del equipo de trabajo y referencia bibliográfica.

Tabla 47. Datos de entrada del método

Variable	Símbolo	Unidades	Valor	Fuente
Número de Tanques	M		3	Propia
Volumen de los tanques	V	l	10000	Propia
Tiempo de hospitalización	t ₁	días	4	. ¹⁰³
Tiempo de habitación sin paciente	t ₂	días	0,5	Estimativo
Número de habitaciones	N	N°	6	Propia
Actividad administrada	a ₀	Bq	5,55x10 ⁹	. ¹⁰⁴
Fracción excretada por paciente	F		0,8	. ¹⁰⁵
Periodo del ¹³¹ I	T _{1/2}	días	8,02	. ¹⁰⁶

Fuente: elaboración propia.

¹⁰³ BARRERAS, Caballero. BRÍGIDO Flores. LASSERRA Sánchez. HERNÁNDEZ García, RETENCIÓN DE LOS RESIDUALES DE I-131 EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL MÓDULO DE MEDICINA NUCLEAR DE CAMAGÜEY, 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, Cuba, October 26-29, 1999.

¹⁰⁴ CRUZ Emeterio, A. MAYORGA Manuel, QUIVERIO Noelia . VILLADA Julian. PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE ¹³¹I DE VERTIMIENTOS LÍQUIDOS EN UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO ¹²⁷I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA 2013 Rio de Janeiro, RJ, Brazil, April 15-19, 2013 SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - SBPR

¹⁰⁵ Cavalieri RR. IODINE METABOLISM AND THYROID PHYSIOLOGY: CURRENT CONCEPTS. Thyroid 1997;7:177-81.

¹⁰⁶ J. Turner E., RADIATION AND RADIATION PROTECTION, Germany: Wiley Verlag GmbH & Co., (2007).

Tabla 48. Datos de entrada del método. (Continuación)

Variable	Símbolo	Unidades	Valor	Fuente
Caudal de excretas descargada por paciente por día	q_p	litros/día	1,5	¹⁰⁷
Caudal de agua vertida por un inodoro	q_b	Litros/días	17,1	Estimativo

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Desarrollo del método de cálculo. Todos los parámetros para desarrollar las ecuaciones son conocidos y están especificados en la **Tabla 47** y en la **Tabla 48**.

El primer paso es calcular la tasa de ingreso de núcleos radiactivos \dot{N} , que está dada por la **Ecuación 22**.

Ecuación 22. Tasa de ingreso de núcleos radiactivos

$$\dot{N} = \frac{na_0fT_{1/2}}{\ln 2(t_1 + t_2)}$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Reemplazando y resolviendo la ecuación se tiene que:

$$\dot{N} = \frac{(6)(5,55 \times 10^9)(0,8)(8,02)}{\ln 2(4 + 0,5)}$$

$$\dot{N} = 6,8497 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$$

Posteriormente se procede a calcular el caudal promedio de llenado del tanque q , que está dado en litros/día

¹⁰⁷ ICRP, Report of the task group on reference man -Report 23, Int. J. Appl. Radiat. Isot., vol. 28, no. 4, pp. 448-449, 1977.

Ecuación 23. Caudal promedio

$$q = \frac{nt_1(q_p + q_b)}{(t_1 + t_2)}$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Reemplazando.

$$q = \frac{6(4)(1,5 + 17,1)}{(4 + 0,5)}$$

$$q = 99,2 \text{ l/día}$$

Teniendo el caudal promedio de llenado del tanque y conociendo el volumen de los tanques a manejar, es posible conocer el tiempo de llenado en días (t_f).

$$t_f = \frac{V}{q}$$

Reemplazando la ecuación con los valores conocidos en la ecuación:

$$t_f = \frac{30000}{99,2}$$

$$t_f = 100,8065 \text{ días}$$

Después de que el tanque alcanza su máxima capacidad volumétrica, es cerrado y el caudal q debe ser transferido al siguiente tanque, es este momento el tanque tiene su máxima actividad (A_m), esta máxima actividad puede ser conocida por medio de la ecuación de actividad en el tanque como función del tiempo (A_t) y es expresada en la **Ecuación 24**.

Ecuación 24. Actividad en el tanque como función del tiempo

$$A_t = \dot{N} \left(1 - e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}} \right)$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Para determinar la máxima actividad A_m variable t debe ser reemplazada por t_f , como se muestra en la siguiente ecuación donde se reemplaza y se calcula A_m .

$$A_m = 6,8497 \times 10^{11} \left(1 - e^{-\frac{100,8065 \cdot \ln 2}{8,02}}\right)$$

$$A_m = 6,849 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Conociendo la actividad máxima se procede a calcular la actividad de descarga o actividad que será vertida al alcantarillado (A_d) y está dada por la **Ecuación 25**.

Ecuación 25. Actividad de Descarga

$$A_d = A_m \left(e^{-\frac{t_f(m-1) \ln 2}{T_{1/2}}} \right)$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Reemplazando y resolviendo:

$$A_d = 6,849 \times 10^{10} \left(e^{-\frac{100,8065 \cdot (4-1) \cdot \ln 2}{8,02}} \right)$$

$$A_d = 1853,858311 \text{ Bq}$$

Obteniendo la actividad de descarga es posible calcular la actividad de descarga al año (A_n), determinada por la **Ecuación 26**.

Ecuación 26. Actividad de descarga al año

$$A_n = A_d \frac{365 \text{ días}}{t_f}$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

$$A_n = 6712,450172 \text{ Bq}$$

Según la regulación nacional colombiana se regula la concentración de actividad límite (L_d) en Bq/l, para el caso del ^{131}I , como ya se expuso, es de 19 Bq/l y no debe ser superado este valor en el momento de la descarga. Por lo tanto, es necesario conocer cuál será la tasa de emisión en concentración de actividad del sistema (C_d) y se expresa en la **Ecuación 27**.

Ecuación 27. Tasa de emisión en concentración de actividad del sistema

$$C_d = \frac{A_d}{V}$$

Fuente: MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

Reemplazando:

$$C_d = 0,1854 \text{ Bq/l}$$

Cómo se puede observar la concentración de actividad de 1,1854 Bq/l permite determinar que el sistema cumpliría con la normatividad regulatoria nacional, la cual denota un límite de vertimiento en concentración de actividad de 19 Bq/l.

5. EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO

Para un proyecto a nivel ingeniería es de suma importancia determinar la viabilidad financiera, por ende, su evaluación se constituye como una herramienta capaz de determinar esta viabilidad. En este capítulo se desarrolla la evaluación de costos del sistema de tanques de retención por decaimiento propuesto en el capítulo anterior, que puede servir como un parámetro o visión preliminar para un hospital que pretenda desarrollar el montaje de su sistema propio de control de desechos radiactivos generados en los tratamientos con ^{131}I en medicina nuclear. La evaluación de costos se divide en tres partes, las cuales son los costos preliminares, los costos de los tanques de retención y por último los costos de los silos de recubrimiento de seguridad para los tanques, para finalmente obtener los costos totales del proyecto.

5.1 COSTOS DEL SISTEMA DE TANQUES DE RETENCIÓN

5.1.1 Costos preliminares de obra. Toda obra civil acarrea consigo costos previos, en la **Tabla 49** se presentan los costos previos de la obra civil, y son basados en el estudio desarrollado por QUIVERIO, Noelia y VILLADA, Julián (2014) los cuales son necesarios para el desarrollo de la obra. Los rubros son propuestos para la construcción de la obra y son presentados por un tiempo total de obra de 10 meses.

Tabla 49. Costos previos de obra

Descripción	Cantidad	Costo Unidad (\$COP)	Costo Total (\$COP)
Campamento	1	25'000.000,00	25'000.000,00
Instalaciones Provisionales de Energía	1	12'000.000,00	12'000.000,00
Instalación provisional hidrosanitaria	1	8'500.000,00	8'500.000,00
Cerramiento provisional en lámina	90 m	58.144,11	5'232.970,20
Cargue y descargue escombros volqueta 10 m ³		29.960,00	299.600,00
Localización y replanteo	15 días	311.052,00	4'665.780,00
Aseo general	1	3'500.000,00	3'500.000,00
Alquiler baños portátiles	10 Meses	343.200,00	3'432.000,00
Total			62'630.350,20

Fuente: QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA RODRIGUEZ MEDINA. Jaime Enrique. Dirección de propuestas y presupuestos. Cotización Coninsa Ramón H. S.A. NIT. 890.911.431-1.

5.1.2 Costos de Tanque de Retención. Se considera el método de estimación de costos¹⁰⁸ para determinar el costo de un tanque de almacenamiento de techo cónico con una capacidad de 10 m³ (2200 gal), el cual se presenta en la siguiente ecuación, en la cual V es el volumen del tanque en galones:

$$C_A = 210V^{0,31}$$

$$C_A = 210(2200)^{0,31}$$

$$C_A = 2282,29 \text{ US\$}$$

¹⁰⁸ VÉLEZ, Hernán. Estimación de costos de proyectos. Diseño de plantas. Universidad de américa. 30 p. Tabla 6

Siendo este el costo para un material de acero al carbono el cual cuenta con un Índice de costo de plantas del Chemical Engineering (CE) CE=394 que corresponde al año 2000, para lo cual es necesario corregir el costo por inflación para el año 2019 (CE=627.7)¹⁰⁹

$$C_A = 2282,29US \left(\frac{627,7}{394} \right)$$

$$C_A = 3636,024 \text{ US\$}$$

Se consideró por asesoría para efectos de la vida útil del sistema realizar la corrección por material a acero inoxidable que cuenta con un factor igual 2,1.

$$C_A = 3636,024 \text{ US} * 2,1$$

$$C_A = 7635,66 \text{ US\$} = 25'685.237 \text{ COP\$}$$

En la **Tabla 50** se presentan los costos de los 3 tanques de retención planteados.

Tabla 50. Costos de Tanques de retención

Equipo	Especificación	Cantidad	Costo (\$COP)	Unidad	Costo Total (\$COP)
Tanque	10 m ³	3	25'685.237		77'055.711
	Costo Total				77'055.711
	IVA (16%)				12'328.913,8
	Total				89'384.625,8

Fuente: Adaptado de QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA RODRIGUEZ MEDINA. Jaime Enrique. Dirección de propuestas y presupuestos. Cotización Coninsa Ramón H. S.A. NIT. 890.911.431-1.

El total de costos de construcción de los tanques de retención es de 89'384.625,8 COP\$

5.1.3 Costos de Silos de recubrimiento y seguridad. Debido a que es necesario proteger al público y al personal de trabajo de la exposición radiactiva se hace necesario que los tanques de retención estén dispuestos en el subsuelo. En la **Tabla 51** son presentados los cálculos para los silos dispuestos para los tanques de retención, se determinó un volumen de 30 m³ debido a que son 3 tanques de retención cada uno con un volumen de 10 m³.

¹⁰⁹ Chemical Engineering Journal, página web, The Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), última consulta: mayo 2019 www.chemengonline.com/pci

Tabla 51. Costo de construcción del silo de 30 m³ dispuestos para los 3 tanques de retención

Descripción	Cantidad	Costo Unidad (\$COP)	Costo Total (\$COP)
Corte-cargue-botada-descapote	32 m ²	6.800,00	217.600,00
Excavación mecánica	57,6 m ³	29.000,00	1'670.400
Lleno en rajón	16 m ³	43.500,00	696.000,00
Geotextil tejido 2400	32 m ²	4.203,09	134.498,88
Suministro y colocación de lleno en recebo tipo B-200	9,6 m ³	43.500,00	417.600,00
Cimentación silo	32 m ²	289.788,96	9'273.246,72
Muro concreto y plomado para Silo	30 m ³	899.544,07	26'986.320,00
Tapa en concreto	14,5 m ²	162.443,11	2'355.425,1
Acero figurado cimentación	5600 kg	2.106,25	11'795.000,00
Acero figurado muro y tapa	7500 kg	2.106,25	15'796.875,01
Total			69'6342.965,7

Fuente: Adaptado de QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA RODRIGUEZ MEDINA. Jaime Enrique. Dirección de propuestas y presupuestos. Cotización Coninsa Ramón H. S.A. NIT. 890.911.431-1.

5.1.4 Costos totales de obra civil. En la **Tabla 52** es presentado el costo total de obra civil, en que se tienen en cuenta rubros como el impuesto al valor agregado IVA, los porcentajes de administración, imprevistos y utilidad, cada uno con su porcentaje correspondiente.

Tabla 52. Costo total de la obra civil para un volumen de 30 m³

Ítem	Costo (\$COP)	
Administración	17%	11'788.304,2
Imprevistos	3%	2'080.288,97
Utilidad	5%	3'467.148,28
IVA sobre la utilidad	16%	11'094.874,50
Total Costo Directo	Preliminares + Construcción	131'973.316,00
Costo Total Obra Civil		160'403.932,00

Fuente Adaptado de QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. "PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE ¹³¹I EN VERTIMIENTOS LÍQUIDOS DE UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA RODRIGUEZ MEDINA. Jaime Enrique. Dirección

de propuestas y presupuestos. Cotización Coninsa Ramón H.
S.A. NIT. 890.911.431-1.

5.1.5 Costos totales del proyecto. Por último, en la **Tabla 53** se presenta el costo total del proyecto.

Tabla 53. Costo total del proyecto

Especificación	Costo total (\$COP)
Tanques de retención	89'384.625,80
Obra civil	160'403.932,00
Total	249'788.557

Fuente: elaboración propia.

El estudio de costos arrojó un total de **249'788.557 COP\$** el cual incluye la construcción de obra civil y de tanques de almacenamiento en acero inoxidable capaces de cumplir a la normatividad internacional.

6. CONCLUSIONES

- Se encontró que el ^{131}I presenta concentraciones más altas en las horas de la mañana y la cantidad es decreciente conforme transcurre la misma, a partir del mediodía la concentración disminuye significativamente. También, se encontró que en ciertas horas de la mañana la concentración de actividad de este radionúclido es de hasta 3 veces los niveles de orientación de OMS.
- La PTAR del salitre maneja actividades de ^{131}I por debajo de los niveles de referencia de OMS los lunes y martes, el miércoles presenta actividades muy cerca a los niveles de orientación y los jueves y viernes las concentraciones de actividad se encuentran por encima de los niveles de orientación concluyendo que el comportamiento de este radioisótopo durante los días de la semana incrementa gradualmente.
- La presente investigación ha permitido resolver la forma en cómo se comporta el ^{131}I dentro de la PTAR del Salitre, demostrándose que este radionúclido tiende a irse en mayor concentración por las corrientes de agua, también se encontró una gran afinidad con los lodos apoyando así anteriores investigaciones. Por otro lado, aunque se encontraron valores muy altos de ^{131}I en algunas grasas y arenas no hay una tendencia significativa de que el ^{131}I salga por estas corrientes. Para concluir hay salida de ^{131}I en todas las corrientes de la PTAR del Salitre encaminándose principalmente la mayor concentración de este radionúclido por las corrientes de agua tratada y lodos.
- El conocimiento de la actividad de las aguas residuales es útil para establecer las potenciales consecuencias radiológicas del ^{131}I descargado. Estas actividades son importantes para estimar el impacto ambiental en el ecosistema, así como para evaluar las posibles dosis efectivas recibidas por las personas expuestas a estas aguas como los trabajadores de tratamiento de aguas residuales y aquellas que viven por la ribera del río Bogotá.
- Se evidencia la falta de conocimiento e investigación en Colombia frente al impacto de los radioisótopos, a tal punto de que se están utilizando como restauradores de tierras Bio-lodos altamente cargados de ^{131}I sin tener conocimiento alguno de la presencia de este radioisótopo en ellos.
- Las salidas de agua tratada de la PTAR del Salitre, biosólido, arenas y grasas contienen concentraciones de actividad de ^{131}I , para el caso de las aguas tratadas se encuentran varias concentraciones por encima de los niveles de orientación de OMS generando potencialmente el incremento de este

radionúclido en diferentes actividades humanas y sin tener ninguna precaución de ello.

- Se determinó que modificar el carbón activado impregnándolo con NaOH favorece la adsorción de ^{127}I , aumentando la eficiencia de adsorción comparado con el carbón activado hydraffin 40N, como lo evidencia la **Tabla 42. Comparativa de los porcentajes de adsorción por tipo de carbón activado**, siendo el máximo obtenido de un 20,95 % de aumento en la eficiencia. Es decir que el sistema si es afín al ^{131}I
- Por medio de las pruebas realizadas usando ^{131}I en una actividad conocida y del orden de magnitud de las descargas, para determinar si a escala de generadores es consistente realizar una adsorción, se determinó que el porcentaje de adsorción es demasiado bajo, esto debido a que, en la realidad, aunque se manejan actividades de descarga muy alta, la cantidad en masa de ^{131}I es muy baja, del orden 1×10^{-9} g, desfavoreciendo la adsorción. Según esto no sería viable desarrollar una propuesta a nivel de generadores usando adsorción bajo las condiciones y variables analizadas.
- Por medio del desarrollo del método de cálculo se logró presentar una propuesta que consta de 3 tanques de retención y decaimiento con un volumen de 10000 l, capaces de atender una capacidad de 6 habitaciones por hospital que se encuentren en tratamiento simultaneo con ^{131}I , obteniendo como resultado favorable que se cumpliría la regulación colombiana en cuanto al vertimiento, el sistema presentaría una concentración de actividad en el vertimiento (C_d) = 0,1854 Bq/l muy por debajo del límite de descarga el cual es de 19,1 Bq/l para el ^{131}I teniéndose un muy buen desempeño frente a las especificaciones técnicas del sistema de retención y decaimiento.
- Se hace necesario la implementación de normativas que limiten o den niveles de referencia en aguas residuales puesto que hay un vacío de conocimiento en este campo de estudio y se muestra la importancia de que este se implemente debido a las concentraciones de actividad de ^{131}I en aguas que se utilizan para las actividades humanas.
- Se realizó el estudio de costos para un sistema de retención por decaimiento que consta de 3 tanques de retención, el cual dio como valor total del proyecto, incluyendo la obra civil, de 249'788.557 COP

7. RECOMENDACIONES

- Implementar un sistema de cubiertas para las operaciones al aire libre de la PTAR del salitre con un sistema de recolección de gases donde puedan tener algún tratamiento antes de llegar al aire libre, puesto que muchas sustancias presentes en estas aguas son bastante volátiles convirtiéndose en un factor de contaminación ambiental.
- Teniendo en cuenta que los niveles de ^{131}I se encuentran por encima de los niveles de orientación de OMS, se debe desencadenar una investigación específica ya que los resultados no implican directamente que el agua sea insegura. Es importante tener en cuenta que el uso del ^{131}I es permanente y supondría una condición radiológica crónica.
- Revisar la presencia de ^{131}I por medio de un muestreo en los alimentos provenientes de las zonas aledañas al río Bogotá analizando su concentración de actividad de y sus implicaciones en la salud humana.
- Realizar un estudio para la implementación de un método de remoción de radionúclidos en la planta de tratamiento de aguas del salitre ya que actualmente no se tiene ningún control de los radionúclidos en las operaciones establecidas, buscando así poder gozar de un agua con una mejor calidad.
- Hacer un estudio de las dosis recibidas por los trabajadores de la PTAR del salitre y sus posibles implicaciones en la salud.
- Evaluar la posibilidad de la instauración de una Planta de Tratamientos de Aguas en la zona sur de Bogotá ya que hoy por hoy no hay ningún tipo de control de estas aguas.
- Hacer un muestreo enfocado al ^{131}I en las cuencas que desembocan sus aguas en la PTAR del salitre para así poder determinar qué zonas de la ciudad son las principales causantes de que se superen los niveles de orientación para este radionúclido.
- Investigar las enfermedades presentadas en los habitantes que se encuentran en la ribera del río Bogotá y la posible relación de estas enfermedades con la presencia de ^{131}I en estas aguas.
- Realizar un control a las nuevas urbanizaciones mediante interventorías para que éstas al entregar las obras, cumplan con el requisito de sistemas de

alcantarillado separados y evitar así las conexiones erradas, esto podría realizarse siempre y cuando haya una actualización de la norma. El mismo control, podría realizarse en cada una de las cuencas aferentes de los principales canales: Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo, al igual que en los 13 Humedales.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for low-level Analysis of iodine radioisotopes in water: Pennsylvania, USA: ASTM, 2013. 5 h. (ASTM D4785.14825)

BARQUERO,R.; AGULLA,M. M. and RUIZ,A. Liquid discharges from the use of radionuclides in medicine (diagnosis). En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. vol. 99, no. 10, p. 1535-1538

BARQUERO,R., et al. Liquid discharges from patients undergoing 131I treatments. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. vol. 99, no. 10, p. 1530-1534

CADENA, Daniel. ELABORACIÓN DE FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL MONITOREO AMBIENTAL DEL YODO MOLECULAR 131 EN EL ÁREA DE MEDICINA NUCLEAR DEL HOSPITAL ANDRADE MARÍN. Trabajo de grado Biofísico. Riombamba, Ecuador. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Facultad de ciencias.

CASTRO, Fidel. Energía Nuclear y Desarrollo. Realidades del átomo contemporáneo. Buenos Aires, Argentina. Ediciones Del Sol, 1991 - 406 páginas.

CRUZ, Emeterio. MAYORGA, Manuel. QUIVERIO, Noelia y VILLADA, Julián. PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE 131I DE VERTIMIENTOS LÍQUIDOS EN UNA UNIDAD SANITARIA DE MEDICINA NUCLEAR EMPLEANDO 127I COMO PATRÓN DE REFERENCIA. IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA 2013. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, April 15-19, 2013. SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA – SBPR.

EISBERG, Robert. RESNICK, Robert (1994). Física cuántica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. México D.F.: Limusa. 968-18-0419-8, 978-9681804190

FUJIWARA,Hideshi. Observation of radioactive iodine (131I, 129I) in cropland soil after the Fukushima nuclear accident. En: SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT. Oct 1,.vol. 566-567, p. 1432-1439

GONZÁLEZ RIVERO,Levi; TURCIOS TRISTÁ,Silvia Elena and VELASCO MIRABAL,Milagros. Aplicaciones clínicas del radioyodo 131 (I131) en las enfermedades del tiroides. Editorial Ciencias Médicas, 2012. 256-263

HORMANN,Volker and FISCHER,Helmut W. The physicochemical distribution of 131 I in a municipal wastewater treatment plant. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. Nov.vol. 178-179, p. 55-62

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. : El instituto. 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

International Commission on Radiological Protection, "Release of patients after therapy with unsealed radionuclides," Ann. ICRP, vol. 34, no. 2, pp. 1-79, 2004.

International Atomic Energy Agency - IAEA, "Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research - TECDOC 1000," Vienna, 1998.

JIMÉNEZ, Fernando, et al. Levels of ¹³¹I and Six Natural Radionuclides in Sludge from the Sewage Treatment Plant of Valladolid, Spain. En: WATER, AIR, & SOIL POLLUTION. May.vol. 217, no. 1, p. 515-521

KOSAKA, Koji, et al. Removal of radioactive iodine and cesium in water purification processes after an explosion at a nuclear power plant due to the Great East Japan Earthquake. En: WATER RESEARCH. Sep 15,.vol. 46, no. 14, p. 4397-4404

KRAWCZYK, E.; PIÑERO-GARCÍA, F. and FERRO-GARCÍA, M. A. Discharges of nuclear medicine radioisotopes in Spanish hospitals. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. Feb.vol. 116, p. 93-98

KULYUKHIN, S.; KAMENSKAYA, A. and KONOVALOVA, N. Chemistry of radioactive iodine in aqueous media: Basic and applied aspects. En: RADIOCHEMISTRY. Apr.vol. 53, no. 2, p. 123-141

LISETH ANDREA OSPINA PERDIGÓN. PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DEL RADIO DE INCIDENCIA DEL ¹³¹I A TRAVÉS DE UNA METODOLOGÍA DE MUESTREO EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ. Fundación Universidad de América, 2018. p. |48.

MESTANZA, María. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2012. 318 p.

MARTÍNEZ, J., et al. Presence of artificial radionuclides in samples from potable water and wastewater treatment plants. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. Jul.vol. 192, p. 187-193

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Reglamento para la Gestión de Desechos Radiactivos en Colombia. Resolución 41178 del 2 de diciembre de 2016 [en línea] <<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180//23517//37308-Resoluci%C3%B3n-41178-2Dic2016.pdf>>

MONTENERO, Michael P.; DILBONE, Elizabeth K. and WAPLES, James T. The removal of particle-reactive radionuclides in shallow water: Bottom scavenging versus particle settling of iodine-131 and beryllium-7. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. Oct.vol. 177, p. 128-134

MONTENERO, Michael P.; DILBONE, Elizabeth K. and WAPLES, James T. Using medically-derived iodine-131 to track sewage effluent in the Laurentian Great Lakes. En: WATER RESEARCH. Oct 15,.vol. 123, p. 773-782

MOSOS, Fernando. Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia. Tesis de Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2018

MOSOS, F. ABADÍA, A. Gómez J.W. y Casallas, P. Montaje para la determinación in situ por espectrometría gamma de descargas líquidas de ¹³¹I en servicios de terapia. Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares. Servicio Geológico Colombiano. Edición, Octubre de 2017.

PAILLAHUEQUE, Gabriela. EFECTOS SECUNDARIOS A CORTO Y MEDIANO PLAZO DEL TRATAMIENTO CON ¹³¹I EN PACIENTES CON CÁNCER DIFERENCIADO DE TIROIDES. Tesis de grado. Hospital Clínico de la Universidad de Chile. Servicio de Medicina Nuclear, Departamento de Medicina. Universidad de Chile. Santiago.

QUIVERIO, Noelia. VILLADA, Julián. “Propuesta De Un Sistema Para La Remoción De ¹³¹I En Vertimientos Líquidos De Una Unidad Sanitaria De Medicina Nuclear Empleando ¹²⁷I Como Patrón De Referencia”. Tesis de Grado Ingeniería Química. Universidad de América. 2014.

RILEY, Brian J., et al. Materials and processes for the effective capture and immobilization of radioiodine: A review. En: JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS. Mar.vol. 470, p. 307-326

Setting authorized limits for radioactive discharges : practical issues to consider, report for discussion. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.

SUNDELL-BERGMAN, S., et al. A new approach to assessment and management of the impact from medical liquid radioactive waste. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. vol. 99, no. 10, p. 1572-157

TAVERA, Edgner Maer. Temas selectos de operaciones unitarias para la carrera de ingeniería industrial. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Instituto de ciencias básicas a ingeniería. 12 p.

VÉLEZ, Hernán. Estimación de costos de proyectos. Diseño de plantas.

Universidad de américa. 30 p.

ANEXOS

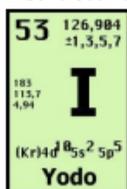
ANEXO A

UNIDADES RADIATIVAS

- 1 Becquerelio (Bq) = 1 desintegración por segundo
- 1 Curio (Ci) = 37,000,000,000 Becquerelios = 37 GBq
- 1 Ci = 1000 mCi
- 1 mCi = 1000 μ Ci
- 1 GigaBecquerelio (GBq) = 1000 MegaBecquerelios (MBq)
- 1 GBq = 27 mCi 1 MBq = 27 mCi
- 1 mCi = 0.037 GBq = 37 MBq
- 1 mCi = 0.037 MBq = 37,000 Bq
- 1 Gray (Gy) = 100 Rad 1 cGy = 0.01 Gy = 1 Rad
- 1 Rem = 1 Rad x QF 1 Sievert (Sv) = 100 Rem
- 1 Rem = 1000 millirem (mRem) 1 mSv = 100 mRem

ANEXO B
FICHA DE SEGURIDAD DE ¹²⁷I.¹¹⁰

- **Nombre de la sustancia:** Yodo.
- **Número CAS:** 7553-56-2.
- **RTECS:** NN1575000.
- **Fórmula química:** I₂.
- **Estructura química:**



- **Masa molar:** 252,18g/mol.
- **Sinónimos:** Cristales de yodo, yodo sublimado.
- **Usos recomendados:** Ingrediente en germicidas, antisépticos, desinfectante para piscinas, reactivo analítico, entre otros.
- **Número de atención de emergencias:** TRANSMEDIC 2280-0999 / 2245-3757 (TM 203 503 Campus Omar Dengo, TM 203 504 Campus Benjamín Núñez) 911 Servicio de emergencia, 2261-2198 Bomberos de Heredia.

¹¹⁰ Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica. Ficha de seguridad del Yodo (en línea)
<http://www.quimica.una.ac.cr/index.php/documentos-electronicos/category/13-hojas-de-seguridad?download=357:yodo&start=260> [citado el 1 de Noviembre de 2019]
[citado el 1 de Noviembre de 2019]

Descripción de peligros:



Corrosivo



Peligroso para el ambiente

Información pertinente a los peligros para el hombre y el ambiente:

Este producto puede generar irritación y quemaduras por contacto en el hombre y otros organismos.

Sistemas de clasificación:

-NFPA(escala 0-4):



-HMIS(escala 0-4):

SALUD	2
INFLAMABILIDAD	1
REACTIVIDAD	0

Consejos de prudencia:

- Utilice el equipo de protección indicado para resguardar sus vías respiratorias y la piel.
- Alejar de llamas y fuentes de ignición.

Composición

Número CAS	Componentes peligrosos	% m/m
7553-56-2	Yodo	99.5 %

- **Información general:** Sustancia nociva para la salud. Busque atención médica de inmediato.
- **Contacto ocular:** Lavar inmediatamente los ojos con abundante agua por al menos durante 15 minutos, manteniendo abiertos los párpados para retirar cualquier acumulación en estas superficies. No utilice ningún tipo de ungüento para los ojos. Si se usan lentes de contacto, estos se deben retirar de los ojos. Buscar atención médica.
- **Contacto dérmico:** Retirar inmediatamente la ropa contaminada. Lavar con abundante agua y jabón no abrasivo las zonas contaminadas de la piel y cubra la piel con un emoliente. En caso de una seria exposición lavar con jabón desinfectante y cubrir con una crema antibacterial. Puede usarse agua fría. Busque atención médica.
- **Inhalación:** Trasladar a la víctima al aire fresco. Afloje el cuello y el cinturón de la víctima. Si la persona no respira, dar respiración artificial. Si la respiración es dificultosa, suministrar oxígeno. Llamar al médico inmediatamente.
- **Ingestión:** Beber agua abundante o leche. Administrar harina hervida. Laxantes: sulfato sódico (1 cucharada sopera en 250 mL de agua).

Efectos por exposición

- **Contacto ocular:** Muy peligroso por ser irritante, causa inflamación en los ojos caracterizada por lagrimeo, enrojecimiento y picazón. Así mismo puede provocar conjuntivitis.
- **Contacto dérmico:** Irritante y es absorbido por la piel. Puede producir quemaduras en la piel y ulceraciones. Inflamación en la piel es caracterizada por picazón, enrojecimiento, descamación o sensación abrasiva.
- **Inhalación:** Irrita las vías respiratorias. Reacción alérgica, bronquitis, dificultades respiratorias
- **Ingestión:** Peligroso en caso de ingestión. Puede causar irritación del tracto digestivo con náuseas, vómito y diarrea. Puede afectar la conducta (somnia, debilidad muscular), la respiración (diseña). Pueden aparecer enfermedades como hipersensibilidad con fiebre, altralgia, engrandecimiento de los nódulos linfáticos y eosinofilia. Se han descrito también púrpura trombocitopénica trombótica y periarteritis nodosa por hipersensibilidad al yodo.

Estado físico	Sólido, Gránulos
Color	Morado
Olor	Picante
Umbral olfativo	No disponible
pH	5,4 (solución saturada)
Punto de fusión	180 °C
Punto de ebullición	114°C
Punto de inflamación	No disponible
Tasa de evaporación	No disponible
Límites de explosión	No explosivo
Presión de vapor a 25°C	0,04 kPa
Densidad relativa de vapor (aire=1)	8,8
Densidad relativa (agua=1)	4,933
Solubilidad en agua a 20°C	0,03 g en 100 mL a
Solubilidad en otros disolventes	Parcialmente soluble en acetona. Soluble en metanol.
Coefficiente de reparto n-octanol/agua (Log pow)	2,49
Temperatura de autoinflamación	No aplica
Temperatura de descomposición	No disponible
Peligro de explosión	No explosivo
Viscosidad	No disponible

- **Reactividad:** Oxidante.
- **Estabilidad:** Estable bajo condiciones normales.
- **Incompatibilidad:** Aceite de terpentina y derivados, acetiluros, aluminio, compuestos amoniacales, azidas, carburos, flúor, halogenuros, magnesio, metales alcalinos, metales en polvo.
- **Productos de polimerización:** No ocurre.
- **Productos peligrosos de la descomposición:** Yoduro de hidrógeno. Óxidos de potasio y yodo.

ANEXO C

FICHA DE SEGURIDAD DE ¹³¹I.¹¹¹

NOMBRE DEL MEDICAMENTO CAPSION 50 a 3700 MBq cápsula Ioduro (¹³¹I) de sodio para tratamiento.

COMPOSICIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA 1 cápsula dura contiene entre 50 MBq y 3700 MBq de Ioduro (¹³¹I) de sodio en la fecha y hora de calibración. El ¹³¹I se obtiene por fisión de uranio-235 en un reactor nuclear. El ¹³¹I tiene un período de semidesintegración de 8,02 días.

El ¹³¹I decae a ¹³¹Xe (¹³¹Xe) estable, emitiendo radiación gamma con energías de 365 keV (81,7%), 637 keV (7,2%) y 284 keV (6,1%), y radiaciones beta de energía máxima de 606 keV . Excipiente(s) con efecto conocido 1 cápsula dura de Capsion contiene 110 mg de sodio.

FORMA FARMACÉUTICA

Cápsula dura.

Cuerpo naranja y tapa verde.

DATOS CLÍNICOS

Indicaciones terapéuticas El tratamiento con Ioduro (¹³¹I) de sodio está indicado en adultos y niños para:

Hipertiroidismo: Tratamiento de la enfermedad de Graves, bocio multinodular tóxico o nódulos tiroideos autónomos.

Tratamiento del carcinoma papilar y folicular de tiroides, incluida la enfermedad metastásica. El tratamiento con Ioduro (¹³¹I) de sodio se suele asociar con una intervención quirúrgica y medicamentos anti tiroideos.

Contraindicaciones

Hipersensibilidad al principio activo

Embarazo y lactancia: Cuando sea necesario administrar radiofármacos a mujeres en edad fértil, es importante determinar si está o no embarazada. Toda mujer que presente un retraso en la menstruación debe considerarse que está embarazada

¹¹¹ Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) https://cima.aemps.es/cima/pdfs/es/ft/71189/71189_ft.pdf [citado el 1 de Noviembre de 2019]

mientras no se demuestre lo contrario. En el caso de duda sobre un posible embarazo (si presenta un retraso en la menstruación, si la menstruación es irregular, etc.), debe ofrecerse a la paciente técnicas alternativas que no impliquen el uso de radiaciones ionizantes (si existiesen).

Pacientes con disfagia, estenosis esofágica, divertículo esofágico, gastritis activa, erosiones gástricas y úlcera péptica

Pacientes con sospecha de disminución de la motilidad gastrointestinal.

Resumen del perfil de seguridad Las frecuencias de las reacciones adversas notificadas se han obtenido a partir de la bibliografía médica. El perfil de seguridad del yoduro (^{131}I) de sodio varía en gran medida en función de las dosis administradas y, a su vez, las dosis que se administran dependen del tipo de tratamiento (es decir, tratamiento de una enfermedad benigna o maligna). Además, el perfil de seguridad depende de las dosis acumuladas administradas y de los intervalos de dosificación que se empleen.

Como resultado, las reacciones adversas notificadas se han agrupado según si se producen durante el tratamiento de una enfermedad benigna o maligna. Las reacciones adversas más frecuentes son: hipotiroidismo, hipertiroidismo transitorio, trastornos de las glándulas salivales y lagrimales, y efectos locales de la radiación.

Además, en el tratamiento de cáncer, pueden aparecer frecuentemente reacciones adversas gastrointestinales y depresión de la médula ósea.

Propiedades farmacocinéticas

Absorción: Tras su administración oral, el yoduro (^{131}I) de sodio se absorbe con rapidez en la porción superior del tracto gastrointestinal (90 % en 60 minutos). La absorción se ve influenciada por el vaciado gástrico. Aumenta por el hipertiroidismo y disminuye por el hipotiroidismo.

En estudios sobre los niveles de actividad en suero mostraron que, tras un rápido incremento, sobre 10 a 20 minutos, se alcanza un equilibrio tras unos 40 minutos. Tras la administración oral de solución de yoduro (^{131}I) de sodio se alcanza un equilibrio al mismo tiempo. Distribución y captación por los órganos.

La farmacocinética es similar a la del yodo no radiactivo. Tras entrar en el torrente sanguíneo se distribuye en el compartimento extratiroideo, desde donde es captado predominantemente por el tiroides que extrae aproximadamente el 20% del yoduro en el primer paso o es excretado por vía renal. La captación del yoduro en el tiroides alcanza un máximo tras 24-48 horas, 50% el pico máximo es alcanzado tras 5 horas.

La captación se ve influenciada por varios factores: edad del paciente, volumen de la glándula tiroidea, aclaramiento renal, concentración plasmática de

ioduro y otros medicamentos (ver sección 4.5). El aclaramiento de ioduro por el tiroides es normalmente de 5-50 ml/min. En caso de deficiencia de iodo el aclaramiento se incrementa hasta 100 ml/min y en el caso de hipertiroidismo puede llegar hasta 1.000 ml/min. En caso de sobrecarga de ioduro el aclaramiento puede decrecer hasta 2-5 ml/min. El ioduro se acumula también en los riñones.

Las glándulas salivales y la mucosa gástrica captan pequeñas cantidades de ioduro (^{131}I) de sodio, que también se detectará en la leche materna, placenta y plexos coroideos.

Biotransformación: El ioduro que ha sido captado por el tiroides sigue la ruta metabólica conocida de las hormonas tiroideas y es incorporado por organificación para la síntesis de las hormonas tiroideas.

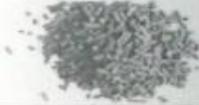
Eliminación: La excreción urinaria es del 37-75 %, la excreción fecal es aproximadamente del 10 % y la excreción por el sudor es casi insignificante. La excreción urinaria se realiza por aclaramiento renal, que constituye aproximadamente el 3% del flujo renal y es relativamente constante de una persona a otra. El aclaramiento es más bajo en el hipotiroidismo y en la insuficiencia renal y más alto en hipertiroidismo. En pacientes eutiroideos con función renal normal, el 50-75% de la actividad administrada se excreta en orina en las 48 horas.

Semivida: La semivida efectiva del iodo radiactivo en plasma es del orden de 12 horas en plasma sanguíneo y es aproximadamente de 6 días en la glándula tiroidea. Por tanto, tras la administración de ioduro (^{131}I) de sodio, cerca del 40 % de la actividad tiene una vida media efectiva de 6 horas, y de 8 días para el 60 % restante. Insuficiencia renal Los pacientes con insuficiencia renal pueden tener disminuido el aclaramiento del iodo radiactivo, lo que puede dar lugar a un incremento en la exposición a la radiación por el ioduro (^{131}I) de sodio administrado.

Un estudio mostró, por ejemplo, que en los pacientes con insuficiencia renal sometidos a diálisis peritoneal continua ambulatoria (CAPD) tienen un aclaramiento de radio iodo 5 veces más bajo que los pacientes con función renal normal.

ANEXO D

FICHA TÉCNICA DEL CARBÓN ACTIVADO HYDRAFFIN 40 N



KENNDATENBLATT / TECHNICAL DATA SHEET

Hydraffin 40 N
Carbón activado granulado

Especificaciones:

Granulometría (mm)	0.4 - 1.7 (12x40 mesh)
Densidad aparente (kg/m ³)	490 ± 30
Contenido en agua (% en peso) (recien envasado)	< 5
Contenido en cenizas (% en peso)	< 15
Indice de yodo (mg/g)	1000 ± 50

Características típicas:

Densidad aparente después de contralavado (kg/m ³)	env. 440
Superficie interna (m ² /g) (BET-método)	env. 900 > 90
Resistencia a la abrasión	
Altura de semidecoloración (cm)	env. 4

Observaciones:
Los datos arriba mencionados se basan en métodos de análisis de Donau Carbon.
Se pueden facilitar sobre demanda.

Atención:
Carbón activo húmedo secuestra el oxígeno del aire.
asegurar una buena aireación de los aparatos. Tomar muestras de la atmósfera
Observar estrictamente las instrucciones de trabajo.

Donau Carbon GmbH
Königsplatz 27-33
D-65926 Frankfurt am Main, Germany
Tel: +49-69-4011-426
Fax: +49-69-4011-459
Email: sales@donau-carbon.com

Donau Carbon US LLC
551 N. US Highway 41
Dunnellon, FL 34432, USA
Tel: +1-352-465-5959
Fax: +1-352-465-0679
Email: sales.us@donau-carbon.com



Unser QM-System ist zertifiziert
Our QM-system is certified



DONAU CARBON GmbH

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Client:	BIOCIDAS Y QUIMICOS S.A.S. Bodega L187	
Your order no.:	IMP 101	Our order no.: 8057465
Date of delivery:	08.04.2019	Our delivery no.: 80016364
Activated carbon "Hydraffin 40 N"		Lot-no.: CG-13983

Apparent density (kg/m ³)	497
Moisture content (wt.%) (as packed)	1,4
Iodine adsorption (mg/g)	978
Ash content (wt.%)	12,9
Granulation (mesh)	12x40

Production Date	10.09.2018
Expiration Date	09.10.2021

Issued under authority of Quality Assurance / Laboratory of Donau Carbon GmbH



Donau Carbon GmbH - A Company of DONAU CHEMIE Group
 Registered Office: 60509 Frankfurt am Main, Commercial Register Frankfurt am Main HRB 52062 - VAT Reg. No. DE 221 329 278 - Board of Management: Jürgen Rieß
 Bank for International Payments AG, Frankfurt/Main Account: 367 92 33 50 010 HYVEDEMN430 IBAN: DE19 9002 2181 0267 0033 60
 Commerzbank AG, Mainz Account: 3518 05 31 000 00000000 IBAN: DE94 9005 0101 0008 3880 31

ANEXO E

Materiales

A continuación, se describen los materiales usados para la experimentación. Como ya se expuso anteriormente la evaluación se hizo usando el único radioisótopo estable del yodo, el ^{127}I , esto debido a las implicaciones técnicas, de seguridad y de normatividad necesarias para trabajar con el ^{131}I o con cualquier otro radioisótopo no estable. Cabe resaltar que los radioisótopos en cuerpos de agua se encuentran en forma de yoduros, por esto medir una adsorción para un radioisótopo como el ^{127}I permitirá por consiguiente medir una separación del ^{131}I .¹¹²

Materia Prima.

Las materias primas usadas para evaluar la remoción de ^{131}I usando ^{127}I se clasifican según su estado físico inicial.

Líquidos. El único líquido inicial usado fue el agua destilada, las indicaciones técnicas se encuentran en la tabla siguiente.

Especificaciones del Agua Destilada.

Agua destilada

Calcio	No
Amonio	No
Cloruros	No
Sulfatos	No
Conductividad Eléctrica	No
Ph	7,00
CO ₂	1 a 10 µS/cm máx.

Fuente: Hoja de datos de seguridad de sustancias. Agua destilada. [en línea] [citado en septiembre de 2019]. Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/DIRA/infoweb/dira/info/U0698122.PDF>

Sólidos. En fase sólida fueron usados 3 materiales, divididos en adsorbente, adsorbato y reactivo de impregnación.

¹¹² KRAWCZY E. PIÑERO, F. FERRO. DISCHARGES OF NUCLEAR MEDICINE RADIOISOTOPES IN SPANISH HOSPITALS. En: Journal of Environmental Radioactivity, 2012. Vol 116, pp 93-98.

Adsorbente. Carbón Activado Vegetal. En la tabla siguiente se exponen algunas especificaciones de interés del adsorbente usado, en el **ANEXO A** se encuentra la ficha técnica correspondiente.

Especificaciones técnicas del carbón activado usado.

Hydraffin 40 N (Donau Carbon)	
Granulometría (nm)	0,4 – 1,7 (12x40 mesh)
Densidad aparente (kg/m ³)	490 ± 30
Contenido en agua (% en peso)	< 5
Índice de yodo	1000 ± 50
Contenido en Cenizas (mg/g)	< 15



Fuente: Ficha Técnica Carbón Hydraffin 40N

Adsorbato. Yoduro de Potasio (KI). Se puede observar en la tabla las características técnicas del adsorbato utilizado.

Especificaciones técnicas del Yoduro de Potasio.

Yoduro de Potasio	
Formula Química	KI
Masa Molar	166,01 g/mol
Tipo de reactivo	Sal de haluro



Fuente: Universidad de América.

Compuesto de impregnación. (NaOH). Se partió de NaOH sólido para realizar la impregnación del carbón activado, las especificaciones técnicas pueden verse en la tabla siguiente.

Especificaciones técnicas del Hidróxido de Sodio.

Hidróxido de Sodio	
Formula Química	NAOH
Peso Molecular (g/mol)	40
Contenido	99 %



Fuente: Universidad de América.

Equipos. A continuación, se presentan en la tabla los equipos relevantes utilizados en la experimentación para la adsorción.

Especificaciones de los equipos utilizados

Imagen 62

Balanza de Precisión Modelo: Shimadzu AUW220D	
Capacidad máxima	220 g / 82 g
Sensibilidad	0,1 mg/0,01mg
Desviación estándar	≤0,1mg/≤0,05 mg
Linealidad	±0,2 / ±0,1



HI 9813-6 Medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS	
Rango de pH	0,0 a 14.0 pH
Rango EC	0,00 a 4,00 mS/cm
Rango TDS	0 a 1999 ppm (mg/L)

Resolución pH	0,1 ph
Resolución EC	0,01 mS/cm
Resolución TDS	1 ppm (mg/L)
Precisión (a 20°C) pH	± 0,1 pH
Precisión (a 20°C) EC	±2% F.S.
Precisión (a 20°C) TDS	± 2% F.S.



Conductimetro Oakton Waterproof CON 410 Meter

Rango Conductividad	0.00 a 19.99 μ S, 0.0 a 199.9 μ S, 0 a 1999 μ S, 0.00 a 19.99 mS, 0.0 a 199.9 mS
Precisión	±1%
Resolución	0.01 μ S, 0.1 μ S, 1 μ S, 0.01 mS, 0.1 mS



Fuente: Ficha técnica equipos. Universidad de América.